



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

Planejamento de Rotas Veiculares e Otimização de Mobilidade Urbana Utilizando Algoritmo Bioinspirado e Paralelo

Proposta de Dissertação de Mestrado

Fillipe Almeida Paz



São Cristóvão – Sergipe

2023

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

Fillipe Almeida Paz

Planejamento de Rotas Veiculares e Otimização de Mobilidade Urbana Utilizando Algoritmo Bioinspirado e Paralelo

Proposta de 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(a): Rubens de Souza Matos Júnior
Coorientador(a): Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro

São Cristóvão – Sergipe

2023

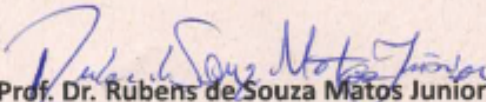


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

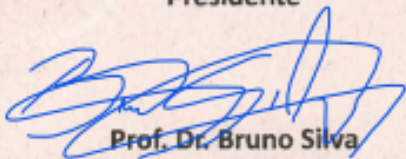
Ata da Sessão Solene de Defesa da Dissertação do
Curso de Mestrado em Ciência da Computação-UFS.
Candidato: **FILLIPE ALMEIDA PAZ**

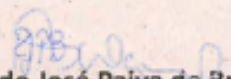
Em 16 dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte dois, com início às 14h00min, realizou-se na Sala de Seminários do PROCC da Universidade Federal de Sergipe, na Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, a Sessão Pública de Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato **FILLIPE ALMEIDA PAZ**, que desenvolveu o trabalho intitulado: "**Planejamento de Rotas Veiculares e Otimização de Mobilidade Urbana Utilizando Algoritmo Bioinspirado e Paralelo**", sob a orientação do Prof. Dr. **Rubens de Souza Matos Junior**. A Sessão foi presidida pelo Prof. Dr. **Rubens de Souza Matos Junior** (PROCC/UFS), que após a apresentação da dissertação passou a palavra aos outros membros da Banca Examinadora, Prof. Dr. **Bruno Silva** (Presbiteriana Mackenzie e Microsoft) e, em seguida, o Prof. Dr. **Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro** (Dcomp/UFS) e o Prof. Dr. **Edward David Moreno Ordenez** (PROCC/UFS). Após as discussões, a Banca Examinadora reuniu-se e considerou o mestrando (a) aprovado "(aprovado/reprovado)". Atendidas as exigências da Instrução Normativa 05/2019/PROCC, do Regimento Interno do PROCC (Resolução 67/2014/CONEPE), e da Resolução nº 04/2021/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.

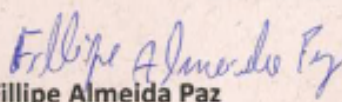
Cidade Universitária "Prof. José Aloísio de Campos", 16 de dezembro de 2022.


Prof. Dr. **Rubens de Souza Matos Junior**
(PROCC/UFS)
Presidente


Prof. Dr. **Edward David Moreno Ordenez**
(PROCC/UFS)
Examinador Interno


Prof. Dr. **Bruno Silva**
(Presbiteriana Mackenzie e Microsoft)
Examinador Externo à instituição


Prof. Dr. **Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro**
(Dcomp/UFS)
Examinador Externo ao Programa


Fillipe Almeida Paz
Candidato

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

P348p Paz, Fillipe Almeida
Planejamento de rotas veiculares e otimização de mobilidade urbana utilizando algoritmo bioinspirado e paralelo / Fillipe Almeida Paz ; orientador Rubens de Souza Matos Júnior. - São Cristóvão, 2023.
80 f.; il.

Dissertação (mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Sergipe, 2023.

1. Algoritmos paralelos. 2. Sistemas inteligentes de veículos rodoviários. 3. Telecomunicações. 4. Inteligência artificial. I. Matos Júnior, Rubens de Souza orient. II. Título.

CDU 004.8

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Deus, por ter me concedido saúde, resiliência e sustento para chegar até aqui, sem Ele este trabalho não teria sido realizado. Gostaria de agradecer aos meus pais pelo investimento e incentivo para a minha formação como pessoa e profissional desde cedo, mas também pela confiança de dispor dos seus esforços para que eu chegasse até aqui. Vocês são indispensáveis. À minha esposa Anne Carolinne gostaria de agradecer pela compreensão quanto à minha ausência em muitos momentos, para dedicar-me à produção dos resultados que compõem este trabalho. Obrigado também por todos os cafés preparados nesses anos durante as longas noites dedicadas à pesquisa.

Ao meu orientador Rubens Matos, sou cordialmente grato por todo apoio, conselhos e conhecimento ao longo desses anos. Realmente um profissional extremamente competente e dedicado, sempre buscando dar o melhor de si para ver o crescimento de seus alunos. Obrigado por nortear-me nas decisões de pesquisa e inspirar-me confiança na qualidade dos resultados que produzimos neste trabalho.

Deixo o meu agradecimento também a toda equipe de pesquisadores do ELAN, com destaque para Itauan Ferreira e Filipe Nascimento. Agradeço pelos debates e discussões que enriqueceram este trabalho. Ao professor Ricardo Salgueiro, meu muito obrigado por ter aberto as portas do ELAN e confiado na minha capacidade como pesquisador.

Escrever esse texto de agradecimento me remete a diversos sentimentos e momentos que me moldaram ao longo da caminhada até a conclusão do mestrado em Ciência da Computação. Apesar da estrada às vezes escura e os passos por vezes cansados, Nós chegamos ao final dessa etapa.

Resumo

A concentração da população mundial nas áreas urbanas tem imposto desafios à qualidade de vida dos cidadãos. Congestionamentos, aumento da poluição atmosférica, desperdício de recursos naturais e redução da produtividade dos cidadãos são alguns exemplos de prejuízos decorrentes da mobilidade precária nas cidades. Simultaneamente, tecnologias aplicadas às cidades podem ajudar na mitigação desses efeitos, melhorando a qualidade de vida da sociedade e fomentando um ambiente mais sustentável ambiental e economicamente.

Processos e tecnologias de coleta, análise transmissão de dados compõem o ecossistema das cidades inteligentes e podem auxiliar na tomada de decisão de forma a otimizar os recursos. Contudo, ainda que a quantidade de dados a respeito a situação do tráfego urbano seja considerável, o planejamento dinâmico de rotas veiculares que leve em consideração uma grande quantidade de vias, veículos e cálculos sobre os dados em tempo real vê-se limitado em virtude do tempo de computação envolvido.

Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar experimentalmente o impacto de roteamento veicular dinâmico sobre métricas relativas à mobilidade urbana e tempo de computação. Foram avaliados algoritmos heurísticos, clássicos e bio-inspirados sob diferentes condições de fluxo viário, com ênfase no PPUMO (*Parallel and Pheromone-based Urban Mobility Optimization*), algoritmo para roteamento veicular proposto neste trabalho.

Ficou evidenciado nos Resultados deste trabalho que o PPUMO foi capaz de produzir os melhores resultados dentre os tratamentos analisados com relação às métricas *Timeloss* (redução de até 27.8%, em média); *Trip Duration* (redução de até 28.4%, em média); *Jams* (redução de até 73.9%, em média) para condições de elevada carga no sistema de tráfego. Foi possível constatar ainda que o PPUMO chegou a apresentar um tempo replanejamento de rotas 10000 vezes menor se comparado aos algoritmos seriais. Especialmente com relação ao tempo de viagem dos veículos, pois apresentou-se como a melhor escolha em 80% dos cenários avaliados. Finalmente, com relação ao comprimento de rota, o PPUMO alcançou resultados menores ou próximo do menor se comparado ao caso base e distanciou-se das abordagens que realizaram replanejamento de rotas em até 32.4%, em média.

Este trabalho contribui para: a identificação de pontos positivos e fraquezas associadas ao uso de roteamentos dinâmicos baseados em algoritmos determinísticos ou probabilísticos, clássicos ou bioinspirados. Aqui também é proposta uma arquitetura de roteamento veicular dinâmico que prevê o uso de redes 5G V2X para a transmissão de dados em um Sistema Inteligente de Transporte. Por fim, intenciona-se que as implementações deste trabalho sirvam como artefato de software para o desenvolvimento de soluções para a maximização da mobilidade urbana.

Palavras-chave: Otimização. Computação paralela. ITS. Mobilidade urbana. 5G.

Abstract

The concentration of the world's population in urban areas has posed challenges to the quality of life of citizens. Traffic jams, increased air pollution, waste of natural resources and reduced productivity of citizens are some examples of damage resulting from poor mobility in cities. Simultaneously, technologies applied to cities can help mitigate these effects, improving society's quality of life and producing a more environmentally and economically sustainable environment.

Processes and technologies for data collection, analysis and transmission make up the ecosystem of smart cities and can help in decision-making in order to optimize resources. However, although the amount of data regarding the situation of urban traffic is considerable, the dynamic planning of vehicular routes that takes into account a large amount of roads, vehicles and calculations on real-time data is limited due to the computing time involved.

In this context, this work aims to experimentally evaluate the impact of dynamic vehicular routing on metrics related to urban mobility and computing time. Heuristic-based, classical and bio-inspired algorithms were evaluated under different road flow conditions, with emphasis on PPUMO (Parallel and Pheromone-based Urban Mobility Optimization), an algorithm for vehicular routing proposed in this work.

It was evidenced in the Results of this work that PPUMO was able to produce the best results among the treatments when analyzed in relation to the metrics *Timeloss* (reduction of up to 27.8%, on average); *Trip Duration* (up to 28.4% reduction on average); *Jams* (up to 73.9% reduction on average) for high load conditions on the traffic system. It was also possible to verify that the PPUMO presented a route replanning time 10000 times smaller compared to the serial algorithms. Especially with regard to vehicle travel time, as it was the best choice in 80% of the evaluated scenarios. Finally, with regard to route length, PPUMO achieved lower or close to lower results compared to the base case and distanced itself from the approaches that performed route replanning by up to 32.4%, on average.

This work contributes to the identification of strengths and weaknesses associated with the use of dynamic routing based on deterministic or probabilistic, classical or bioinspired algorithms. Here is also proposed a dynamic vehicular routing architecture that foresees the use of 5G V2X networks for data transmission in an Intelligent Transport System. Finally, it is intended that the implementations of this work serve as a software artifact for the development of solutions for the maximization of urban mobility.

Keywords: Optimization. Parallel computing. ITS. Urban mobility. 5G.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Arquitetura de <i>Edge Computing</i> para Rede Veicular, adaptada de (LIU et al., 2020).	19
Figura 2 – Arquitetura de comunicação VANET. Fonte: do autor.	20
Figura 3 – À esquerda a configuração ENDC e à direita a configuração <i>Standalone</i> . Adaptado de (NARDINI et al., 2020).	21
Figura 4 – Percentual de cobertura do 5G em alguns países.(OOKLA, 2021)	22
Figura 5 – Comparativo de velocidade de <i>upload</i> em diferentes países.(OOKLA, 2021)	23
Figura 6 – Comparativo de velocidade de <i>download</i> em diferentes países.(OOKLA, 2021)	24
Figura 7 – Simulador SUMO em execução com modelo do centro da cidade de Aracaju-SE	26
Figura 8 – Arquitetura do VEINS (VEINS, 2020)	27
Figura 9 – Arquitetura Experimental	28
Figura 10 – A curva normal e sua relação com o <i>p-value</i> . Autor: (MCLEOD, 2019).	33
Figura 11 – Fluxograma de execução do Mapeamento Sistemático preconizado por (FALBO, 2018).	34
Figura 12 – Proporção de trabalhos selecionados e aceitos no mapeamento sistemático de acordo com a base de busca.	40
Figura 13 – Distribuição dos trabalhos de acordo com a base de busca.	40
Figura 14 – Trabalhos aceitos no mapeamento sistemático de acordo o ano de publicação.	41
Figura 15 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com o foco de estudo.	43
Figura 16 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com a intervenção estudada.	44
Figura 17 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com as tecnologias utilizadas.	45
Figura 18 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com o tipo de pesquisa.	46
Figura 19 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com os veículos de publicação.	46
Figura 20 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com o método de pesquisa utilizado.	47
Figura 21 – Arquitetura de Solução utilizando 5G	59
Figura 22 – O mapa do centro da cidade de Aracaju utilizado nas simulações. Fonte: o autor.	63
Figura 23 – Estágios do Experimento	66
Figura 24 – Comprimento de Rota	69
Figura 25 – Congestionamentos	70
Figura 26 – Boxplots para o número de congestionamentos para cada taxa de entrada.	71
Figura 27 – Tempo de Viagem	72
Figura 28 – Boxplots de Duração de Viagem para cada taxa de entrada	73
Figura 29 – Tempo Perdido	74
Figura 30 – Tempo de Computação	75
Figura 31 – Colisões	76
Figura 32 – Vias Incorretas.	78

Lista de tabelas

Tabela 1 – Quadro comparativo dos padrões 3GPP V2X e IEEE 802.11p (WANG; MAO; GONG, 2017)	22
Tabela 2 – Relação de artigos aceitos.	38
Tabela 3 – Relação de trabalhos aceitos e questões de pesquisa respondidas.	39
Tabela 4 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com as ferramentas utilizadas para avaliação/validação.	42
Tabela 5 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com as métricas utilizadas.	44
Tabela 6 – Casos de teste	57
Tabela 7 – Cenário de simulação	63
Tabela 8 – Cenário de Seleção de Parâmetros do PPUMO	64
Tabela 9 – Valores de mediana do PPUMO e A* Paralelo para cada taxa de entrada. . .	75

Lista de abreviaturas e siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
DCOMP	Departamento de Computação
DVRP	<i>Dynamic Vehicle Routing Problem</i>
DSRC	<i>Dedicated Short-Range Communications</i>
ENDC	<i>E-UTRA/NR Dual Connectivity</i>
EMS	<i>Event Management System</i>
GA	<i>Genetic Algorithms</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
H-ARQ	<i>Hybrid Automatic repeat ReQuest</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution Advanced</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
OBU	<i>On-Board Unit</i>
SIT	Sistemas Inteligentes de Transporte
SUMO	<i>Simulation of Urban Mobility</i>
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TIS	<i>Traveler Information System</i>
TMS	<i>Traffic Management System</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
P2I	<i>Pedestrian to Infrastructure</i>
PIA	<i>Pigeon-Inspired Algorithm</i>
PPUMO	<i>Parallel and Pheromone-based Urban Mobility Optimization</i>

VANET	<i>Vehicular Ad-hoc Network</i>
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure</i>
V2P	<i>Vehicle to Pedestrian</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>
UFS	Universidade Federal de Sergipe

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Objetivos	15
1.2	Escopo Negativo	15
1.3	Contribuições do Trabalho	16
1.4	Estruturação do Trabalho	16
2	Fundamentação Teórica	18
2.1	Sistemas Inteligentes de Transporte	18
2.2	Redes Ad-hoc Veiculares baseadas em 802.11p	19
2.3	Redes 5G V2X	20
2.4	Roteamento Veicular Dinâmico	24
2.5	SUMO e OMNeT++	25
2.6	Algoritmos Bioinspirados	28
2.7	Algoritmos Heurísticos	29
2.8	Algoritmos Meta-heurísticos	30
2.9	Teste de Hipóteses	31
2.9.1	Testes Paramétricos e Não-Paramétricos	31
2.9.2	Curva Normal e o <i>p-value</i>	32
3	Busca Bibliográfica	34
3.1	Mapeamento Sistemático sobre 5G e ITS	34
3.1.1	Planejamento	35
3.1.2	Objetivo	35
3.1.3	Definição das bases de busca	35
3.1.4	Estratégia de pesquisa	35
3.1.5	Questões de pesquisa	35
3.1.6	Definição da <i>String</i> de Busca	36
3.1.7	Critérios de inclusão e exclusão	36
3.1.8	Condução	37
3.1.9	Resultados	39
3.2	Trabalhos Relacionados	48
4	Modelagem de Solução	52
4.1	Parallel and Pheromone-based Urban Mobility Optimization	52
4.2	Arquitetura de Solução	58
4.3	Requisitos e Cobertura	59

5	Metodologia	62
5.1	Seleção de Parâmetros do PPUMO	64
5.2	Preparação do Experimento, Coleta e Integração dos Dados	64
5.3	Análise sobre os Dados	66
6	Resultados	68
6.1	Comprimento da Rota	68
6.2	Congestionamentos	70
6.3	Duração de Viagem	71
6.4	Tempo Perdido	73
6.5	Tempo de Computação	74
6.6	Colisões	76
6.7	Vias Incorretas	77
7	Considerações	79
	Referências	81

1

Introdução

O processo de concentração da população nas áreas urbanas tem feito surgir inúmeros desafios sob o ponto de vista da economia local, transporte, gerenciamento de tráfego, meio ambiente e qualidade de vida para os cidadãos ([ISMAGILOVA et al., 2019](#)). Soluções para alguns dos desafios mencionados têm sido propostas com o auxílio de tecnologias que consolidaram-se no contexto do que chamamos internet das coisas: uma infraestrutura capaz de interligar efetivamente o mundo real e o mundo digital, "permitindo que os objetos da vida cotidiana sejam conectados em qualquer lugar em qualquer momento, para interligar uns com os outros e trocar dados e conhecimentos" ([AMADEO et al., 2019](#)). Nesse cenário surge o conceito de Cidades Inteligentes, que passou a receber inúmeras definições.

De acordo com [Giffinger e Gudrun \(2010\)](#), uma cidade inteligente "é uma cidade bem ajustada e voltada para o futuro na economia, pessoas, governança, mobilidade, meio ambiente e vida, construída sobre combinação inteligente de capacidades e atividades de cidadãos autônomos, independentes e conscientes". Na visão de ([DAMERI, 2013](#)) "uma cidade inteligente é uma área geográfica bem definida, na qual tecnologias de ponta, como TIC (Tecnologias de Informação e Comunicação), logística, produção de energia e assim por diante, cooperaram para criar benefícios para os cidadãos em termos de bem-estar, inclusão e participação, qualidade ambiental, desenvolvimento inteligente; é regido por um conjunto de disciplinas bem definido, capaz de estabelecer as regras e políticas para o governo e desenvolvimento da cidade". Diante dessas definições, compreende-se que, nas cidades inteligentes, a tecnologia, a gestão otimizada de recursos naturais e econômicos são alicerces para o bem estar dos cidadãos e a sustentabilidade.

Embora as definições de cidades inteligentes enfatizem o bem-estar dos cidadãos, ainda que os recursos tecnológicos estejam disponíveis, os congestionamentos viários, e um consequente aumento da poluição atmosférica, ainda são prejudiciais à qualidade de vida. Tais relações de causa e efeito são sustentadas por [Rajé, Tight e Pope \(2018\)](#) no que diz respeito, sobretudo, a cidades em desenvolvimento. Adicionalmente, o estudo conduzido por [Davis et al. \(2017\)](#)

evidenciou que, no cenário indiano, as perdas associadas à produtividade, acidentes, poluição do ar e combustível desperdiçado podem chegar a cerca de 8,9 bilhões de dólares.

[Ortúzar \(2019\)](#) reforçou que o congestionamento de veículos é um dos maiores desafios para a mobilidade urbana, além de enfatizar que "congestionamento não pode ser resolvido apenas pela construção de infraestrutura rodoviária".

Ainda nesse contexto, o relatório apresentado em [Schrank et al. \(2019\)](#) informa que de 2000 a 2017 o prejuízo decorrente dos congestionamentos saltou de 75 bilhões de dólares para 175 bilhões de dólares, contabilizando o tempo e o combustível gastos em 495 cidades dos Estados Unidos. Ainda em 2017, foram gastos cerca de 70% a mais no tempo de viagem como efeito de fatores que incluem os congestionamentos. Adicionalmente, elencou-se que os condutores gastaram cerca de 54 horas a mais em 2017 em horários de pico por conta de efeitos dos congestionamentos.

Já em São Paulo, uma das maiores cidades do Brasil, o relatório apresentado em [Cintra \(2014\)](#) aponta que a cidade perdeu R\$ 35 bilhões de reais em 2012, por conta dos congestionamentos. O estudo levou em consideração a população economicamente ativa que deixou produzir riqueza em decorrência do tempo perdido no trânsito. De acordo com o relatório produzido em [INRIX \(2022\)](#) a cidade de São Paulo encontra-se na posição 45 entre as mais congestionadas do mundo e ocupa a segunda posição no Brasil, atrás apenas de Belo Horizonte. Estima-se que o tempo perdido nos congestionamentos seja 45 horas por ano.

Associado às Cidades Inteligentes, pode-se caracterizar os Sistemas Inteligentes de Transportes (SIT), que se utilizam da infraestrutura tecnológica inerente a esse ecossistema para permitir a troca de informações e dados entre veículos, pedestres e infraestrutura, a saber V2V (*Vehicle to Vehicle*), V2I (*Vehicle to Infrastructure*) e V2P (*Vehicle to Pedestrian*), P2I (*Pedestrian to Infrastructure*) ([SUMALEE; HO, 2018](#)). Ainda de acordo com [Sumalee e Ho \(2018\)](#), há três componentes essenciais a um SIT: *coleta* de dados, *análise* de dados e *transmissão* de dados ou informações.

A tecnologia associada à transmissão dos dados, para comunicação veicular tem recebido incrementos consideráveis nas últimas décadas. Antes de 2010, as redes *Ad-hoc* veiculares foram bastante representativas, sobretudo, pelo protocolo IEEE 802.11p ([EICHLER, 2007](#)). Mas, devido a limitações na garantia de *Quality of Service* (QoS) e taxa de transferência ([WANG; MAO; GONG, 2017](#)) com redes 802.11p, há uma tendência de convergência das redes de telefonia celular para atender também ao tráfego de dados veiculares ([STORCK; DUARTE-FIGUEIREDO, 2019](#)).

Diante disso, considerando os desafios associados à mobilidade urbana e as potencialidades associadas às tecnologias de comunicação veicular, podem ser utilizados algoritmos de roteamento veicular visando a mitigação de congestionamentos e outro pontos negativos para a mobilidade urbana e sociedade.

Ao considerar uma elevada quantidade de vias, veículos e variáveis do sistema de tráfego, potencialmente a otimização aplicada às rotas poderá ampliar a efetividade com a qual maximiza a qualidade de indicadores de mobilidade urbana (MACFARLANE, 2019). Cenários de potenciais congestionamentos ou elevado tempo de viagem poderão, por meio de dados coletados do sistema de tráfego e processados em tempo real, ser vislumbrados antes que aconteçam e os condutores prontamente enviados para outras áreas com maior fluidez no tráfego. Com o replanejamento periódico das rotas que considera a dinâmica do sistema de tráfego, é possível conceder a gestores públicos a capacidade de manipular os custos da topologia de modo maximizar o bem-estar e segurança da população, evitando enviar mais veículos para áreas onde ocorreu um acidente ou com fluxo de crianças na saída da escola, por exemplo.

1.1 Objetivos

Com o Covid-19 e as políticas de isolamento ao redor do mundo desde 2020, a mobilidade urbana foi diretamente impactada. Se por um lado muitos trabalhos passaram a ser executados em *home office*, o que reduziu a quantidade de veículos nas ruas, por outro lado, muitos serviços essenciais ainda demandam o deslocamento utilizando a infraestrutura viária. Diante disso, O sistema proposto é capaz de *coletar e processar* dados de tráfego viário e assim *fornecer* rotas replanejadas para veículos e condutores, a fim de otimizar a mobilidade urbana. Adicionalmente, será proposta uma arquitetura de solução que agrega o uso de 5G ao replanejamento periódico de rotas. De modo específico, pode-se enumerar os seguintes objetivos:

- Avaliar as capacidades do roteamento dinâmico para a otimização do tráfego urbano;
- Avaliar algoritmos paralelos, seriais, clássicos e bioinspirados na tarefa de roteamento veicular;
- Avaliar a mobilidade com relação às métricas comprimento de rota, duração de viagem, dentre outras;
- Fornecer um workflow replicável para a execução e análise de experimentos simulados de Mobilidade Urbana;
- Propor uma arquitetura de solução que habilite a implementação em ambiente real do roteamento veicular proposto.

1.2 Escopo Negativo

Este trabalho não tem por objetivo:

- Prover uma análise do replanejamento de rotas em ambiente real;

- Desenvolver um sistema completo de replanejamento de rotas que englobe transmissão de dados, sincronização de sensores, orquestração de nós de processamento;
- Integrar simulações de mobilidade urbana com simulações de redes veiculares;
- Esgotar as possibilidades de parametrização dos algoritmos utilizados para roteamento veicular.

1.3 Contribuições do Trabalho

Este trabalho que este trabalho gera evidências experimentais capazes de permitir ao leitor identificar pontos positivos e fraquezas associadas ao: uso de roteamentos dinâmicos baseados em algoritmos determinísticos, probabilísticos, meta-heurísticos, clássicos ou bioinspirados. Além disso, o uso de redes 5G V2X e V2I será abordado como integrante de solução para a transmissão de dados referentes ao replanejamento de rotas em um SIT.

O procedimento experimental aqui adotado, que utiliza em testes de hipóteses como arcabouço ferramental e teórico, mostra-se replicável para outros trabalhos no âmbito das Cidades Inteligentes. Além disso, esse trabalho conta com implementações que podem servir como artefato para o desenvolvimento de aplicações para Cidades Inteligentes.

Por fim, o PPUMO foi concebido com o objetivo de: prover uma alternativa com analítica, ajustável a diferentes cenários de execução e baseada em feromônio; não requerer uma fase de treinamento à priori para levantamento de probabilidades; suportar a adequação comportamento a diferentes métricas objetivo; manter um baixo o tempo de execução mesmo em cenários de larga escala; considerar uma elevada quantidade de veículos e vias do sistema em cada replanejamento, a fim de priorizar a qualidade global do sistema de tráfego. Por conta disso, compreende-se que pode ser utilizado para atender aos requisitos e restrições elencados acima.

1.4 Estruturação do Trabalho

Este documento está estruturado em 6 capítulos: o Capítulo 1 (Introdução), para apresentar os problemas associados ao crescimento das cidades e como as cidades inteligentes podem potencialmente transformá-las em locais mais sustentáveis; o Capítulo 2 (Fundamentação Teórica), para abordar os principais conceitos e temas que sustentam este trabalho; o Capítulo 3 (Busca Bibliográfica), para trazer evidências acerca das ferramentas que foram escolhidas e a importância desse trabalho, quando analisado juntamente a outras produções, assim como comparar e ressaltar informações relevantes de outros trabalhos que trataram da mesma temática; o Capítulo 4 (Modelagem de Solução), para apresentar as decisões do modelo, representação analítica e arquitetura de solução com 5G; o Capítulo 5 (Metodologia), para expor a metodologia experimental utilizada para comparar e analisar os resultados dos experimentos, bem como

aspectos teóricos associados; o Capítulo 6 (Resultados), para comparar o PPUMO a outras abordagens de roteamento veicular frente a métricas de mobilidade urbana e tempo de computação; e, o Capítulo 7 (Considerações), que trará uma visão geral dos resultados e perspectivas de trabalhos futuros.

2

Fundamentação Teórica

2.1 Sistemas Inteligentes de Transporte

Os Sistemas Inteligentes de Transporte dizem respeito a um campo de estudo que tem como eixo principal o uso de aplicações e tecnologias para mitigar problemas, como altas taxas de acidentes, congestionamentos e a poluição do ar, dentre outros elementos, a fim de proporcionar bem estar aos viajantes (QURESHI; ABDULLAH, 2013). Essa é uma área em desenvolvimento contínuo, alavancado pelo aprimoramentos em processamento de dados, sistemas de localização em tempo real, sensores, infraestrutura de telecomunicações, dentre outros.

O *Traffic Management System* é uma das vertentes associadas à ITS. O gerenciamento de tráfego utiliza-se de sistemas de tempo real como *Event Management System* (EMS) - Sistema de Gerenciamento de Eventos, *Traffic Control System* (TCS) - Sistema de Controle de Tráfego, *Traveler Information System* (TIS) - Sistema de Informação do Viajante - ou ainda, *Video Control System* (VCS) - Sistema de Controle por Vídeo; a fim de produzir melhoria sob o ponto de vista econômico, de mobilidade e de segurança a condutores, passageiros e pedestres.

No trabalho Souza et al. (2017) é possível identificar uma revisão da literatura que elenca 19 artigos em 9 grupos sobre Sistemas de Gerenciamento de Tráfego. Entre os grupos identificados pelos autores estão: detecção cooperativa de congestionamentos, gerenciamento de semáforos, sugestão de rotas, detecção de congestionamento, rerroteamento e ajuste de velocidade, dentre outros. De acordo com os autores, para habilitar as capacidades dos Sistemas de Gerenciamento de Tráfego faz-se necessária a existência de 3 elementos chaves: coleta de informações; processamento das informações; e, entrega de serviços.

A coleta das informações fica a cargo de sensores, dispositivos de *Global Positioning System* (GPS) - Sistema de Posicionamento Global, sensores nas vias, *On-Board Units* (OBUs) - Unidades a Bordo - veiculares, semáforos, câmeras com reconhecimento de tráfego, dentre outros. O processamento de informações possui três abordagens principais: distribuída, centralizada

e híbrida. Na abordagem distribuída, os veículos têm autonomia para processar informações que serão utilizadas nas tomadas de decisão. Enquanto isso, na abordagem centralizada, todo o processamento e armazenamento dos dados é feito majoritariamente em *datacenters*, por exemplo. Por fim, na abordagem híbrida, a carga de armazenamento e processamento dos dados coletados é distribuída entre os RSUs e a nuvem ou *datacenters*. (LIU et al., 2020), ver Figura 1.

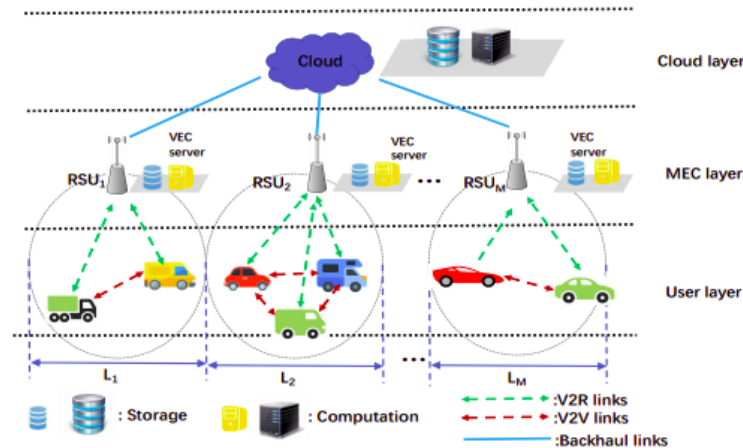


Figura 1 – Arquitetura de *Edge Computing* para Rede Veicular, adaptada de (LIU et al., 2020).

Por fim, a entrega dos serviços focaliza nas aplicações e benefícios que a coleta e o processamento de dados podem trazer aos cidadãos, como a prevenção de congestionamentos, sistemas de alertas de trânsito, sistemas de gerenciamento de semáforos, dentre outros.

É importante perceber que os fluxos de comunicação para os ITS, utilizados para otimizações ou tomadas de decisão, só são possíveis por meio de uma infraestrutura de rede veicular subjacente. Para esse fim, tem sido utilizadas *Vehicular Ad-hoc Networks* (VANETS) – Redes *Ad-hoc* Veiculares – representadas por *Dedicated Short-Range Communications* (DSRC) – Comunicações Dedicadas de Curta Distância. Também vêm sendo padronizadas e utilizadas para esse fim as redes celulares LTE e 5G.

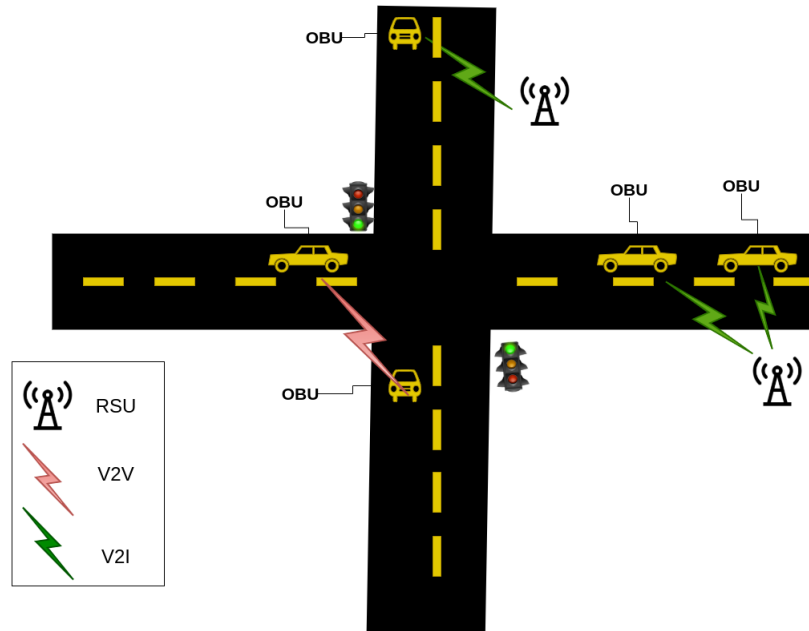
2.2 Redes Ad-hoc Veiculares baseadas em 802.11p

As Redes *Ad-hoc* Veiculares, comumente referidas como VANETs, reportam, sobretudo, ao padrão IEEE 802.11p que, apesar do fim do seu grupo de trabalho (IEEE, 2020), ainda continua relevante. O padrão 802.11p é uma instância da DSRC que se tornou bastante popular e ainda apresenta pontos fortes.

A arquitetura de comunicação de redes VANET possui alguns conceitos-chaves ao seu entendimento, são eles: V2I, que é a comunicação que acontece entre os veículos e a infraestrutura de rede; V2V, que é a comunicação direta entre os veículos; *Roadside Units* (RSU) – Unidades de Beira de Estrada – que são elementos estáticos de infraestrutura com a capacidade de armazenar e transmitir dados; e, OBUs, unidades de coleta e transmissão de dados embarcadas nos veículos.

Tais redes são caracterizadas como *Ad-hoc* devido à efemeridade das topologias em um ambiente inerentemente móvel. É possível ver na Figura 2 a representação de uma VANET.

Figura 2 – Arquitetura de comunicação VANET. Fonte: do autor.



De acordo com (LIU et al., 2020), o padrão 802.11p apresentou menor latência em ambientes com elevado número de nós, enquanto que o padrão LTE apresentou uma perda de pacotes 26% menor. Além disso, o 802.11p apresentou, em geral, melhor performance para distância de cobertura em torno de 250 a 300 metros. Contudo, com o aumento das distâncias entre os veículos, a situação tende ao inverso, pois o padrão LTE V2X (3GPP, 2021b) passa a apresentar melhor desempenho.

2.3 Redes 5G V2X

Apesar da existência do padrão IEEE 802.11p, destinado às comunicações veiculares, as redes celulares têm recebido inúmeros aprimoramentos, ampliando o seu campo de atuação e participação de mercado. Sob padronização da *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) – Projeto de Parceria de 3ª Geração – as redes 5G representam uma evolução ao *Long Term Evolution Advanced* (LTE-A) – Evolução de Longo Termo Avançada – e diferencia-se desta devido a tecnologias como: *massive Multiple Input Multiple Output* (MIMO) – Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas, garantindo múltiplas conexões de *downlink* e *uplink* para um mesmo dispositivo; *beamforming*, para aumentar a eficiência direcional da ondas; ondas milimétricas, podendo operar em faixas espectrais superiores a 30 GHz e suportando elevadas taxas de transferência; e, *small cells*, permitindo propriedades de qualidade de serviço com maior nível de granularidade e eficácia. Tais tecnologias juntas habilitam elevada eficiência espectral, confiabilidade, taxa de transferência e baixa latência às comunicações (GHOSH, 2018).

A 3GPP passou a incluir as comunicações *Device-To-Device* (D2D) desde a *release* 12 (3GPP, 2021a). Nessas comunicações os dispositivos podem comunicar-se diretamente, isto é, independentemente da existência de uma Estação Base para conectar os participantes. Por outro lado, as comunicações veiculares passaram a ser discutidas a partir da *release* 14 e são baseadas na comunicação D2D. Na Figura 3 é possível visualizar duas configurações da infraestrutura do 5G: tanto na configuração *Standalone*, quando apenas esta tecnologia é utilizada nas comunicações; quanto a *E-UTRA/NR Dual Connectivity* (ENDC), quando há a coexistência do 5G com o LTE, para assegurar a retrocompatibilidade das tecnologias.

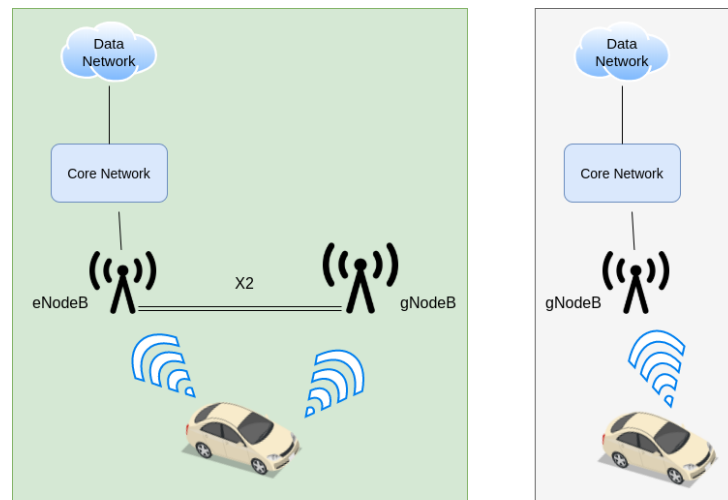


Figura 3 – À esquerda a configuração ENDC e à direita a configuração *Standalone*. Adaptado de (NARDINI et al., 2020).

Na Figura 3 é possível identificar o *gnodeB*, ou gNB, é a terminologia utilizada pela 3GPP para a estação base da tecnologia 5G. O gNB é responsável pela alocação de recursos de rádio para um determinado grupo de dispositivos. Por outro lado, o *enodeB*, ou eNB, desempenha o mesmo papel do gNB, porém, para a tecnologia 4G/LTE. Por sua vez, o *Core Network*, ou Núcleo da Rede, é composto por roteadores IP que conectam estações base a um *gateway* de pacotes (NARDINI et al., 2020). Por fim, *Data Network*, ou Rede de Dados, é uma abstração para a comunicação entre redes heterogêneas.

Um quadro com as principais diferenças entre o padrões IEEE 802.11p e o 3GPP V2X pode ser visualizado no Quadro 1.

Apesar dos avanços dos grupos de trabalho acerca do 5G, observa-se uma adoção lenta e desigual ao redor do mundo. O gráfico da Figura 4 mostra o percentual de disponibilidade do 5G em alguns países do mundo, de acordo com (OOKLA, 2021). É possível identificar que essa cobertura no terceiro trimestre do ano de 2021 não ultrapassou 50%, visto que o primeiro colocado registrou 49.2%. Além disso, mais da metade dos países relacionados apresentou disponibilidade de 5G menor ou igual a 25%. O Brasil, por sua vez, figurou na última posição da lista, com a disponibilidade mensurada menor do que 1%. Dito isso, tal cenário pode ser apontado

	3GPP V2X	IEEE 802.11p
Sincronização	Síncrono	Assíncrono
Multiplexação através dos veículos	FDM ou TDM	Apenas TDM
Codificação do canal	Turbo	Convolutacional
Forma de onda	SC-FDM	OFDM
Mecanismo de Retransmissão	Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ	Sem HARQ
Seleção de Recurso	Transmissão Semi-Persistente com seleção baseada em energia relativa	CSMA/CA

Tabela 1 – Quadro comparativo dos padrões 3GPP V2X e IEEE 802.11p (WANG; MAO; GONG, 2017)

como um desafio para o avanço na pesquisa e desenvolvimento de aplicações que utilizam o 5G como infraestrutura subjacente, a baixa disponibilidade da tecnologia potencialmente limita a execução de experimentos e provas de conceito.

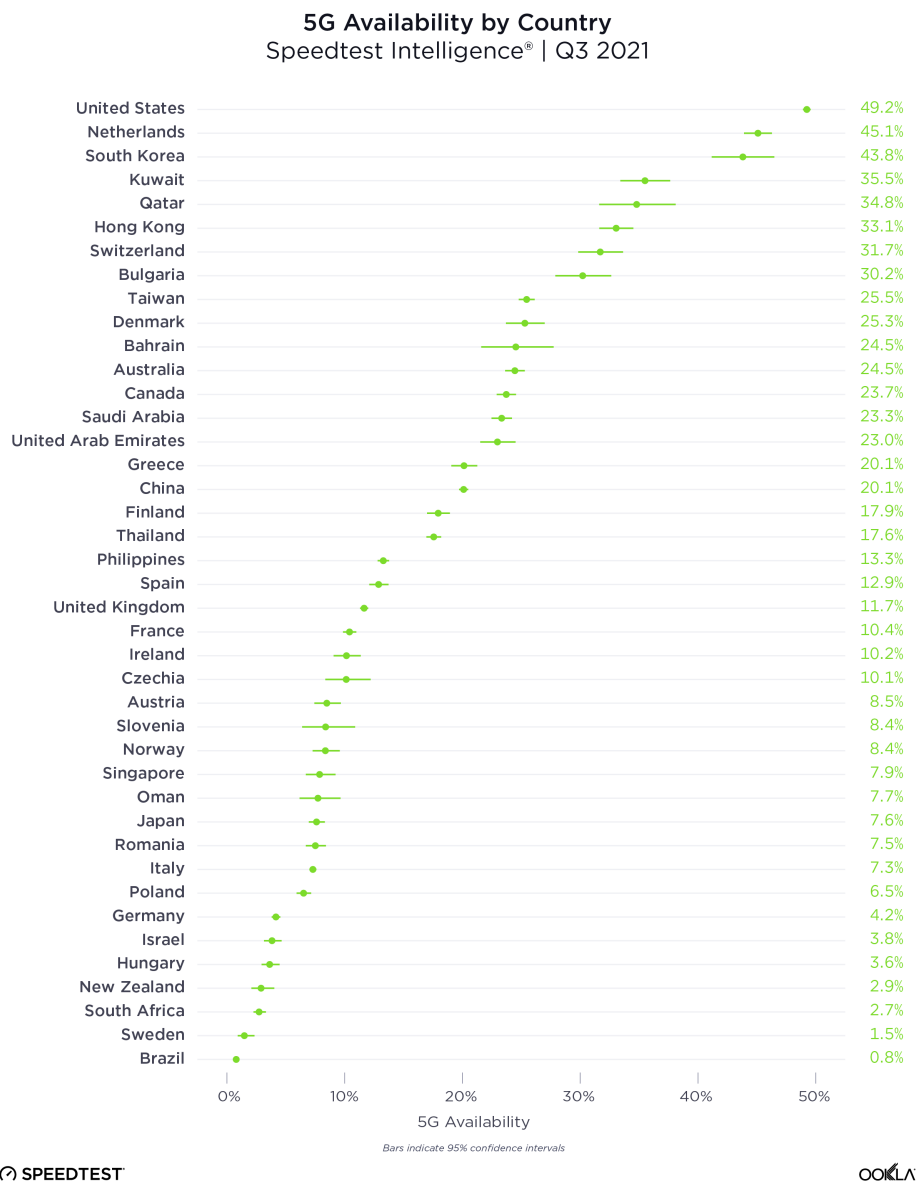


Figura 4 – Percentual de cobertura do 5G em alguns países.(OOKLA, 2021)

Ainda que a disponibilidade do 5G tenha crescido, há desafios relacionados à qualidade do serviço entregue dentro de cada país. O gráficos das Figuras 5 e 6 apontam, por exemplo, que, embora ocupe a primeira posição em se tratando de disponibilidade, os Estados Unidos ocupam a oitava posição quanto a velocidade de upload e a décima posição quanto à velocidade de download. Por outro lado, embora a China apresente apenas cerca de 18% de disponibilidade (Figura 4), registrou velocidade de upload (Figura 5) e download (Figura 6) que a conduziram para a segunda e a quarta posições, respectivamente, no que diz respeito à taxa de transferência.

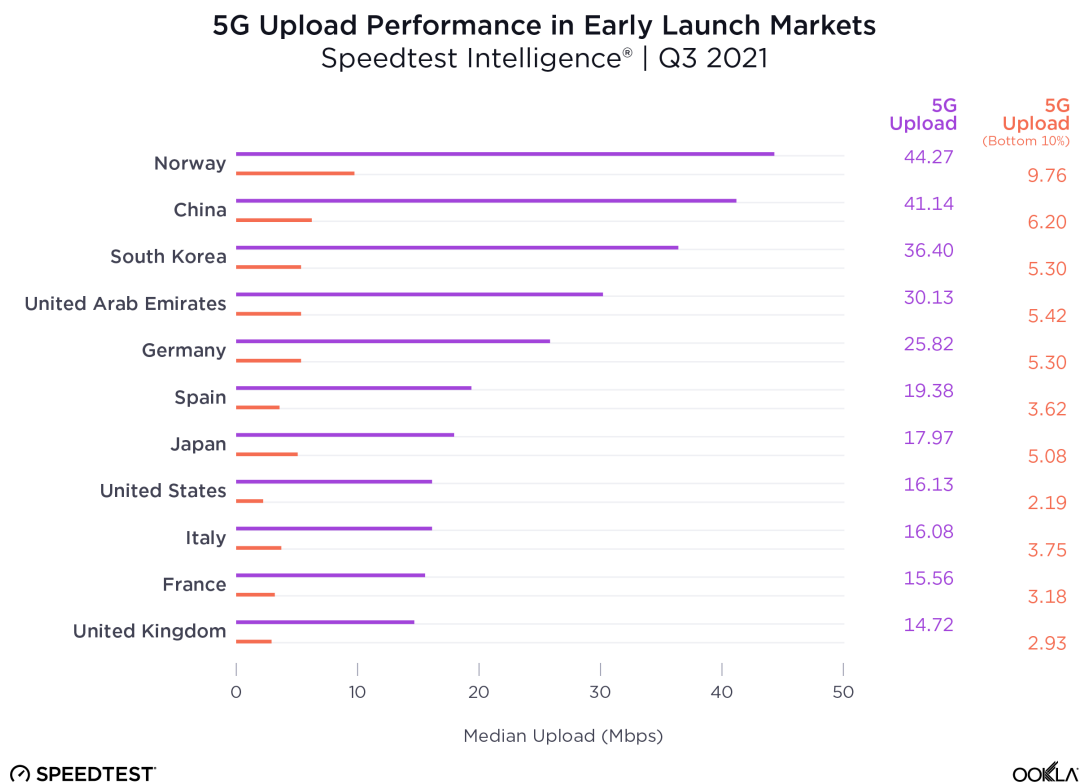


Figura 5 – Comparativo de velocidade de *upload* em diferentes países.(OOKLA, 2021)

Analisando ainda os gráficos das Figuras 5 e 6 observa-se elevada discrepância quanto às taxas de transferência entregues aos usuários de 5G mesmo que dentro de cada país. É possível visto que os resultados 10% piores para upload (Figura 5) e download (Figura 6) não chegam à metade da mediana registrada em para cada país. Nesse contexto, fica evidente o quanto ainda é necessário avançar para que o 5G venha a ser utilizado de forma massiva e homogênea ao redor do mundo e, consequentemente, cada vez mais aplicações possam se beneficiar dos recursos de confiabilidade, elevada largura de banda e ultra-baixa latência propostos pelo 5G.

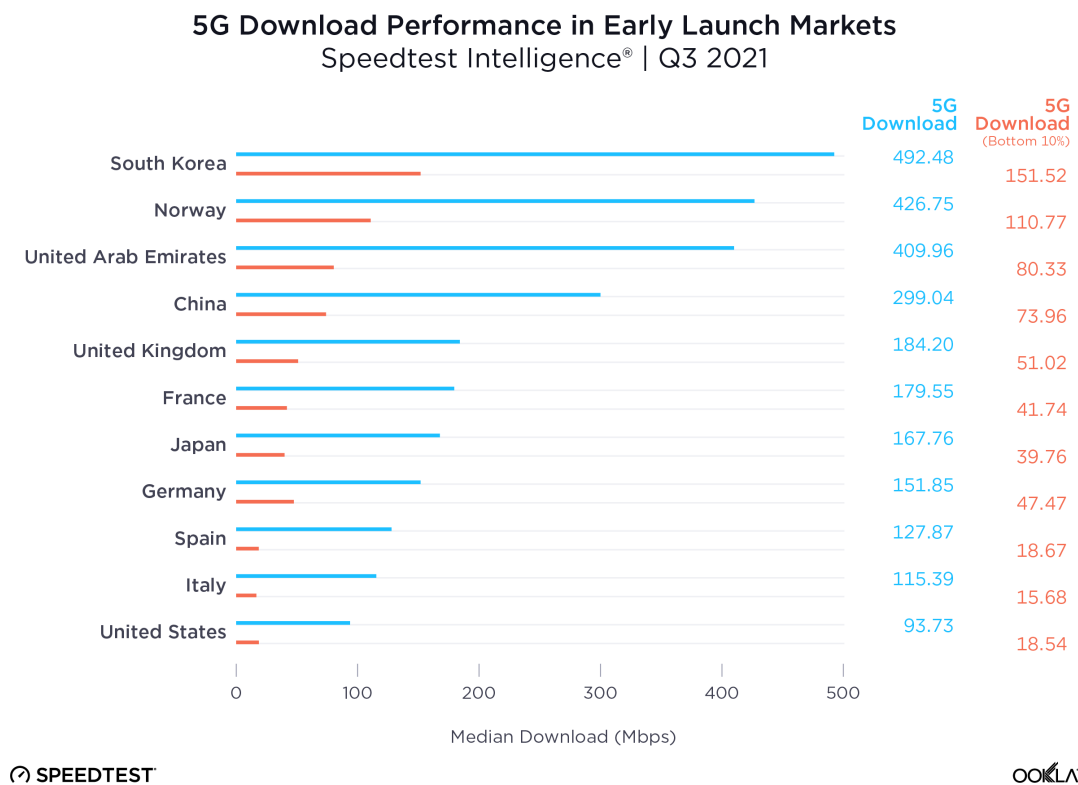


Figura 6 – Comparativo de velocidade de *download* em diferentes países.(OOKLA, 2021)

2.4 Roteamento Veicular Dinâmico

O *Dynamic Vehicle Routing Problem* (DVRP) – Problema do Roteamento Veicular Dinâmico – é uma subclasse do *Traveling Salesman Problem* (TSP) – Problema do Caixeiro Viajante – e enquadra-se como um problema de otimização combinatória. É um problema combinatório, pois as ruas podem ser vistas como nós de um grafo, serem agrupadas para dar origem a uma solução, que é a rota que o veículo deve seguir. De acordo com (XU; PU; DUAN, 2018), "o DVRP é um problema *NP-hard*, por isso algoritmos exatos tradicionais (programação linear, programação dinâmica, algoritmo guloso, etc.) são notoriamente difíceis de resolvê-lo sob limitações de tempo".

Em sua versão original, o DVRP trata de mudanças na rota do *Caixeiro Viajante* devido a alterações nas demandas e arranjos dos consumidores que, nesse caso, mudam ao longo do tempo. Além disso, nessa variante, assim como no TSP, o destino e a origem são os mesmos. No contexto deste trabalho, o roteamento dinâmico é desejável, sobretudo por conta do comportamento efêmero dos custos associados às vias, que no decorrer do dia podem apresentar diferentes taxas de fluxo. Contudo é importante salientar que, diferentemente do TSP, não necessariamente a origem e o destino serão os mesmos e não há necessidade de múltiplas paradas.

Sabendo das restrições de tempo de execução para que as rotas encaminhadas aos veículos

ou condutores reflitam o estado do sistema de tráfego, serão utilizadas, no contexto desse trabalho, estratégias de computação massivamente paralela para a execução de algoritmos de roteamento.

Nesse contexto, os algoritmos bioinspirados têm sido amplamente utilizados para a resolução do problema de roteamento veicular, conforme evidenciado por (OSABA; YANG; SER, 2020) e (ALATTAS, 2021), devido à robustez e adequação de tais algoritmos ao problema.

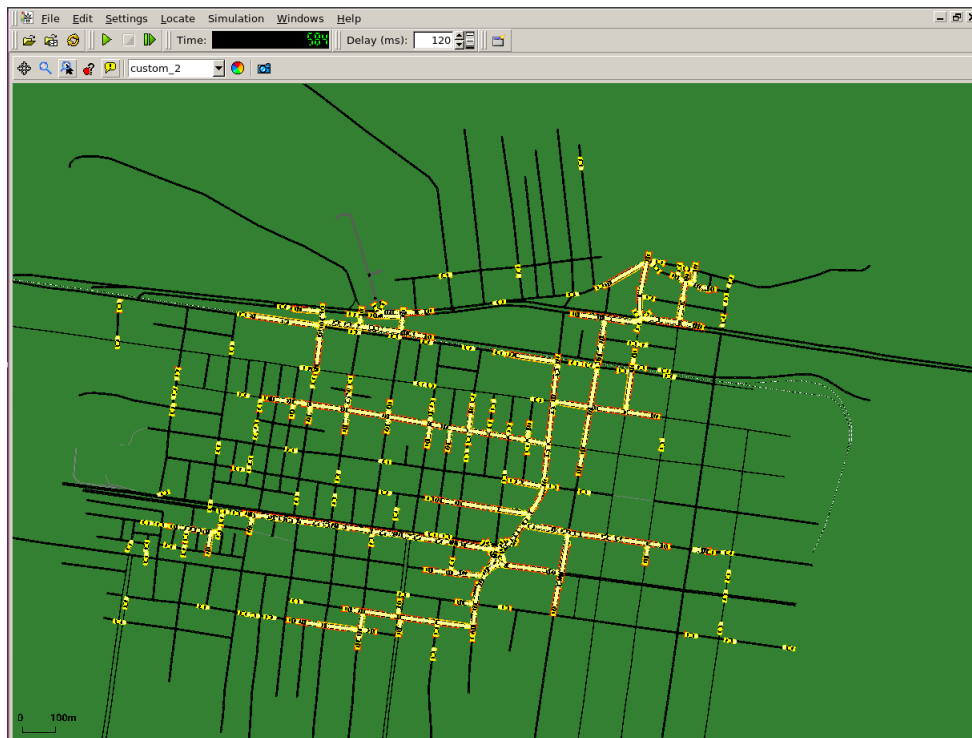
2.5 SUMO e OMNeT++

Dada a relevância do SUMO (Simulation of Urban Mobility) para esta pesquisa, faz-se necessário trazer algumas informações sobre seu objetivo e potencialidades. Disponibilizado desde 2001 pelo Centro Aeroespacial da Alemanha, o SUMO (ver Figura 7) tem sido utilizado em pesquisas sobre: comunicação veicular; escolha de rotas e navegação dinâmica; algoritmos para gerenciamento de semáforos; avaliação de sistemas de vigilância (BEHRISCH et al., 2011). Além disso, o SUMO continua recebendo correções e incrementos, o que permite diferentes perspectivas de análise para um mesmo problema.

O SUMO é uma ferramenta capaz de prover um modelo de simulação que descreve a dinâmica de interações em um sistema de mobilidade urbana. Ele inclui uma significativa quantidade de parâmetros e indicadores que podem ser configurados e observados, respectivamente, a fim de obter uma representação que satisfaz às regras de operação desejadas. Conforme (DLR, 2019), trata-se de "Um pacote de simulação de tráfego urbano de código aberto, altamente portátil, microscópico e contínuo, desenvolvido para lidar com grandes redes de tráfego urbano". O SUMO tem sido referenciado por inúmeros trabalhos dentro da temática de mobilidade urbana e cidade inteligentes como em (LOPEZ et al., 2018), (ALAZZAWI et al., 2018), (XIA et al., 2017).

Uma vez que o código fonte do SUMO é aberto, é possível realizar modificações minuciosas e observar pontos específicos de interesse. O simulador conta ainda com vasta documentação, interfaces bem definidas nas linguagens de programação Python e C++, além de um suporte nativo à depuração. A Figura 7 mostra a interface gráfica do SUMO, que permite a visualização de eventos no sistema de tráfego em tempo de simulação.

Figura 7 – Simulador SUMO em execução com modelo do centro da cidade de Aracaju-SE



Assim como ocorre para os modelos de mobilidade urbana, faz-se necessária avaliação quantitativa do comportamento de modelos de redes veiculares. Nesse contexto, um dos simuladores mais utilizados é o Omnet++. Ele é "um simulador de eventos discretos baseado em C++ para modelagem de redes de comunicação, multiprocessadores e outros sistemas distribuídos ou paralelos" (VARGA; HORNIG, 2008). Os módulos são componentes que ligam-se uns aos outros para a construção das simulações, as saídas de um dado componente servem como entrada para o posterior e assim sucessivamente. Além desta estruturação, o Omnet++ ainda possibilita o planejamento das simulações, assegurando a aleatoriedade entre as execuções e parâmetros. As simulações são resultado do produto cartesiano entre esses parâmetros (NARDINI et al., 2020).

O Omnet++ é baseado na IDE Eclipse e permite a implementação e execução dos códigos num mesmo ambiente. Utiliza-se de arquivos de configuração próprios para a construção das simulações. Os arquivos .NED são destinados à definição da topologia, enquanto que os arquivos .INI são utilizados para a parametrização das simulações. O Omnet++ ainda traz consigo uma ferramenta nativa para a construção de gráficos baseados nos resultados das simulações. É possível ainda fazer o reuso de módulos ao importar bibliotecas e utilizá-las como base para novos modelos.

Uma das bibliotecas utilizadas como base para a simulação de pilhas 5G, LTE ou IEEE 802.11p é a INET. Essa biblioteca provê modelagem para protocolos TCP/IP; protocolos de roteamento, como o BGP e OSPF; interfaces cabeadas e sem fio, como o Ethernet e 802.11p. Com a combinação dos componentes do INET é possível derivar roteadores, *switches* e *hosts*. (OMNET++, 2020) Diante disso, os modelos baseados no INET podem se beneficiar dos módulos

já implementados e focalizar nos aspectos que diferenciam um modelo de outro já implementado.

Por fim, o VEINS é uma biblioteca do Omnet++ que torna possível o tráfego de dados entre os simuladores Omnet++ e SUMO. Através dela é possível coletar, de forma online, informações dos veículos, inclusive a posição, e também enviar informações para como as decisões de rotas. O Veins dispõe de um serviço, escrito em Python, que através de uma porta TCP permite a troca de dados de mobilidade entre o Omnet++ e o SUMO. Por parte do SUMO a comunicação fica a cargo da API Traci, já no Omnet++ essa comunicação é realizada por meio da *Traci Command Interface*. Na Figura 8 é possível visualizar a arquitetura de funcionamento conjunto envolvendo SUMO-VEINS-OMNET++. Na Figura 9 é possível ver uma arquitetura experimental composta pelo SUMO, GPU (*Graphical Processor Unit*) Veins, Omnet++ e as interligações entre eles. São elencados também as entradas e saídas de cada bloco num contexto de roteamento veicular dinâmico.

Figura 8 – Arquitetura do VEINS (VEINS, 2020)

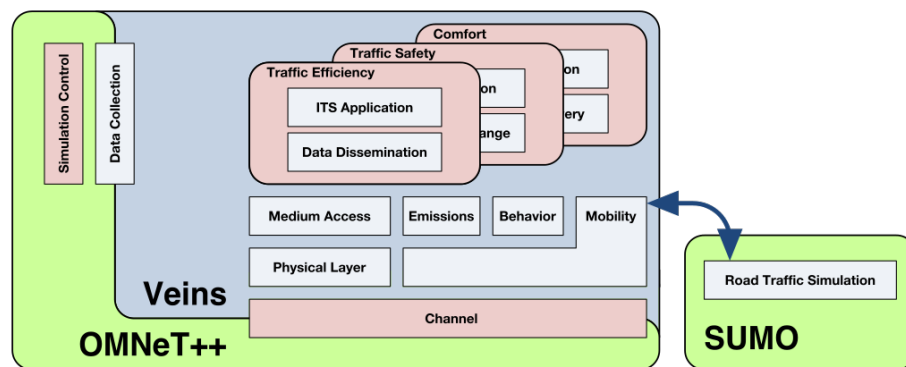
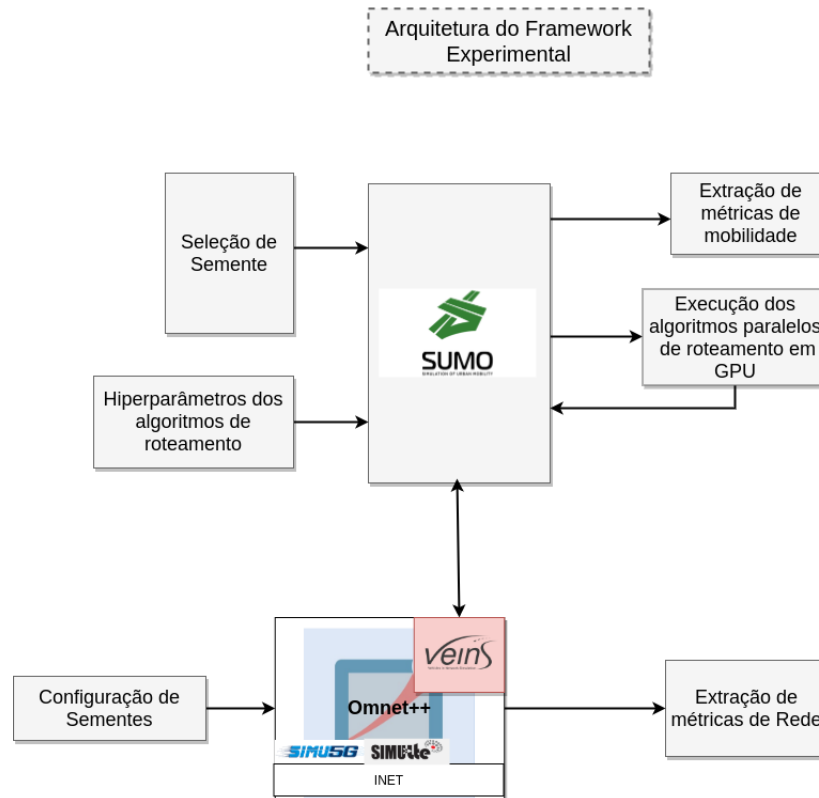


Figura 9 – Arquitetura Experimental



2.6 Algoritmos Bioinspirados

Algoritmos bioinspirados são aqueles que fazem referência a algum comportamento biológico e valem-se desse comportamento para realizar processos de otimização baseados em um ou muitos objetivos. São representativos nessa coleção os *Genetic Algorithms* (GA) – Algoritmos Genéticos; *Pigeon-Inspired Algorithm* (PIA) – Algoritmo Inspirado nos Pombos; *Ant Colony Optimization* (ACO) – Otimização da Colônia de Formigas.

Em (ZHONG et al., 2019), os autores utilizaram o PIA, um algoritmo baseado na otimização por *swarm*, para problema do Caixeiro Viajante com restrições de zona para evitar a convergência prematura. Por sua vez (ALGAMAL et al., 2020), alcançou resultados expressivos ao aplicar o PIA para classificações em quimiometria, um problema *NP-Hard*. Outra aplicação para o PIA é a seleção de características em um *dataset* de imagens, conforme estudado por (BUVANA; MUTHUMAYIL; JAYASANKAR, 2021).

Os algoritmos genéticos, por sua vez, modelam a geração de populações povoadas por indivíduos, que nesse contexto são soluções a um problema. Em uma geração, soluções podem ser combinadas (gerando novas soluções válidas), mas também podem sofrer mutações. A depender do critério de seleção, apenas as melhores soluções da população anterior passaram para a próxima geração.

Por fim, o *Ant Colony Optimization*, proposto por Dorigo (DORIGO, 1992), tem sido

vastamente utilizado, principalmente, em problemas de roteamento: (XU; PU; DUAN, 2018), (KONATOWSKI; PAWŁOWSKI, 2019), (ABBAS; FAN, 2018). Similarmente às formigas, que utilizam o feromônio para identificar um caminho, no algoritmo ele funciona como um elemento para sinalizar a rota de maior *fitness*, após uma quantidade suficiente de formigas ter sido inserida no sistema. (LONES, 2011) e terem chegado aos seus destinos. A adição do feromônio é contrabalanceada pela dissipação periódica, a fim de que o feromônio não se acumule indefinidamente.

2.7 Algoritmos Heurísticos

Uma heurística "é uma estimativa do quão próximo um estado está do objetivo" (DESIGN, 2017). No entanto, tal estimativa precisa ser admissível para o domínio do problema e isso implica na restrição exposta na Equação 2.1.

Seja n qualquer nó em um grafo e $h^*(n)$ o custo verdadeiro para alcançar o nó objetivo (DESIGN, 2017):

$$0 \leq h(n) \leq h^*(n) \quad (2.1)$$

Isso expressa que a estimativa da heurística ao objetivo nunca pode ser maior do que o verdadeiro valor ao objetivo. Cabe ressaltar que a heurísticas tem por finalidade minimizar o tempo de convergência à solução em algoritmos de busca (MADKOUR et al., 2017) ao fornecer indício sobre a localização do ponto ótimo.

Conforme pontuado por Soltani, Soleimani e Barekatin (2017), os algoritmos heurísticos estão diretamente relacionados ao contexto de otimização. Essa limitação decorre tanto do significado das variáveis otimizadas quanto da premissa de admissibilidade (Equação 2.1). No survey Soltani, Soleimani e Barekatin (2017), os autores trazem algoritmos heurísticos associados ao problema de escalonamento de tarefas (*task scheduling*); enquanto isso, Oladimeji, Turkey e Dudley (2017) propõe um algoritmo heurístico para *clustering* hierárquico em redes de sensores sem fio, visando eficiência energética desses dispositivos sem afetar na convergência da rede.

Um dos algoritmos mais utilizados para o problema de planejamento de rotas (*path planning*) é o A* (FU et al., 2018), (SONG; LIU; BUCKNALL, 2019), (NAZARAHARI; KHANMIRZA; DOOSTIE, 2019). Ele comumente utiliza a distância euclidiana (Equação 2.2) como heurística, mas também podem ser utilizadas outras heurísticas, como a distância de Manhattan (Equação 2.4) e distância de Minkowski (Equação 2.3), por exemplo. Para aplicações que objetivam classificação e o estabelecimento de uma fronteira de decisão, a distância de Mahalanobis (Equação 2.5) também pode ser utilizada.

Nas equações 2.2, 2.3 e 2.4: $h(n)$ é o valor heurístico para o nó n ; $x_i(n)$ é o valor de x na dimensão i e nó n ; enquanto que, $x_i(n_f)$ representa o valor de x na dimensão i para o nó objetivo.

$$h(n) = \sqrt{\sum_{n=0}^N (x_i(n) - x_i(n_f))^2} \quad (2.2)$$

$$h(n) = \left(\sum_{n=0}^N (x_i(n) - x_i(n_f))^{1/k} \right)^{1/k} \quad (2.3)$$

$$h(n) = \sum_{n=0}^N |x_i(n) - x_i(n_f)| \quad (2.4)$$

Na Equação 2.5, x e y são vetores referentes às coordenadas da origem e destino, respectivamente. Enquanto que C é a matriz de covariâncias de todas as distâncias entre os nós. Essa abordagem difere da distância euclidiana por inserir a matriz de covariância ao cálculo.

$$h(n) = (x - y)^T \cdot C \cdot (x - y) \quad (2.5)$$

2.8 Algoritmos Meta-heurísticos

Algoritmos meta-heurísticos trazem, assim como os heurísticos, alguma informação inerente ao domínio do problema que o permita minimizar o tempo de convergência. Porém, diferentemente destes, o algoritmos meta-heurísticos se utilizam, necessariamente, de aleatoriedade em certo grau, a fim de fugir de mínimos locais (GANDOMI et al., 2013). Tal classe de algoritmos é subconjunto dos algoritmos estocásticos de busca (LONES, 2011).

São representativos nessa classificação algoritmos já citados na seção "Algoritmos bioinspirados", mas também algoritmos como: algoritmo das Abelhas (*bee algorithm*) (YANG, 2005); algoritmo do vagalume (*firefly algorithm*) (YANG, 2009); algoritmo do morcego (*bat algorithm*) (YANG, 2011); algoritmo do rebanho de krill (*krill herd algorithm*) (GANDOMI; ALAVI, 2012); O *Ant Colony Optimization* quando associado a elementos randômicos para a seleção ou construção das soluções se enquadram como algoritmos meta-heurísticos. Um elemento em comum entre eles é a busca por soluções boas o suficiente frente ao tempo de execução requerido e o tamanho do espaço de busca. Por isso, esses algoritmos geralmente são utilizados em problemas difíceis cujo tempo de execução para encontrar a solução ótima é inviável.

Cabe ainda acrescentar dois termos que são bastante comuns em se tratando de algoritmos meta-heurísticos: *exploitation* e *exploration*, também conhecidos como intensificação e diversificação. O *exploration* significa que as soluções exploram de modo global o espaço de busca, visando fugir de mínimos ou máximos por meio da geração de soluções mais diversificadas. Enquanto isso, no *exploitation*, é priorizada a busca nas proximidades de uma boa solução atual e age intensificando soluções de alto *fitness*. Um dos desafios dos algoritmos meta-heurísticos é

justamente encontrar uma combinação cujo *tradeoff* entre *exploration* e *exploitation* produza soluções próximas ao ótimo.

Cabe realizar uma diferenciação entre os algoritmos Meta-heurísticos, que são inerentemente probabilísticos, e algoritmos determinísticos, como os algoritmos *Dijkstra* ou *Bellman-Ford*, para a tarefa de *path planning* veicular. Este último, caso não haja mudança nos custos das arestas do grafo e no par origem-destino, trará sempre a mesma rota. Não há uma ideia de vazão ou a tentativa de desviar de mínimos locais. Enquanto isso, algoritmos meta-heurísticos, como o ACO, podem naturalmente trazer mais informações, como um histórico do tráfego, e tenta fugir de de mínimos locais do sistema ao utilizar aleatoriedade.

2.9 Teste de Hipóteses

Com a abordagem experimental torna-se necessário analisar as amostras coletadas das simulações sob uma ótica global e não pontual, a fim de identificar o efeito populacional de cada tratamento aplicado às simulações. Conceitualmente, "em estatística, uma hipótese é uma afirmação sobre o valor de um parâmetro de determinada população, isto é, qualquer medida numérica calculada a partir de todos os indivíduos de uma população" [Hirakata, Mancuso e Castro \(2019\)](#). Enquanto que, teste de hipóteses pode-se definir como "um método de averiguação sobre a veracidade de uma afirmação, associado a um risco máximo de erro" ([HIRAKATA; MANCUSO; CASTRO, 2019](#)).

Sendo assim, os testes de hipóteses atendem às necessidades experimentais de avaliação dos efeitos decorrentes dos tratamentos aplicados às simulações, sob certo grau de confiança. Os diversos métodos encontrados na literatura para realizar testes de hipóteses podem ser classificados em testes paramétricos ou não-paramétricos, como será explicado na seção 2.8.1.

2.9.1 Testes Paramétricos e Não-Paramétricos

Os testes paramétricos constituem-se um grupo de testes estatísticos que pressupõem a existência de normalidade e homocedasticidade nas distribuições comparadas. Dizer que uma distribuição é normal significa dizer que os seus valores se distribuem de maneira similar a uma curva normal. Por outro lado, afirmar que duas ou mais distribuições são homocedásticas significa que a variância entre os grupos é similar ([DELACRE et al., 2019](#)).

Nesse contexto, para atender ao pressuposto de normalidade é requerida uma quantidade mínima de amostras. Em geral, 30 amostras é um valor bem aceito para o teste t de *Student*, que é paramétrico ([KIM, 2015](#)). Para avaliar a normalidade de uma distribuição pode ser utilizado, por exemplo, o teste *Shapiro-Wilk* ou ainda o Teste de *Kolmogorov-Smirnov* (KS). Enquanto isso, para avaliar quanto a homocedasticidade pode-se utilizar o teste de *Levene*, *Bartlett* ou ainda o teste de *Cochran*.

Por outro lado, quando pelo menos um dos pressupostos não é atendido, faz-se necessário lançar mão de testes não-paramétricos, pois são livres de tais restrições. Uma das diferenças mais relevantes quando comparados ambos os tipos de testes é que, para testes paramétricos, as hipóteses podem ser construídas em termo da média populacional; enquanto que, para testes não-paramétricos, as hipóteses são construídas em função das medianas ou das distribuições.

A decisão sobre a independência ou dependência das amostras é um elemento importante frente à escolha dos testes estatísticos a serem aplicados sobre a população, pois tanto para teste paramétricos quanto para testes não-paramétricos há versões para amostras dependentes ou independentes e a má escolha do teste pode provocar erros nas conclusões. De acordo com [Gerald \(2018\)](#), "Duas amostras são independente se os valores de amostra selecionados de um população não está relacionada ou de alguma forma emparelhada ou combinada com os valores de amostra selecionados da outra população". Diante disso, Como critérios para definir a dependência ou a independência das amostras pode-se lançar mão de gráficos de dispersão ou ainda observando a natureza intrínseca das amostras.

Na tabela abaixo são sumarizados alguns testes considerando pressupostos aplicáveis.

De forma resumida, podem ser apontados os testes a seguir considerando com relação à dependência das amostras e à característica de serem ou não paramétricos ([GERALD, 2018](#)), ([REIS, 2021](#)):

- Paramétrico

Com amostras dependentes: teste T-student amostras dependentes;

Com amostras independentes: teste T-student para amostras independentes;

Para 2 ou mais grupos de amostras: teste F;

- Não-paramétrico

Com amostras dependentes: teste de Wilcoxon;

Com amostras independentes: teste de Mann-Whitney;

Para 2 ou mais grupos de amostras: teste de Kruskal-Wallis.

2.9.2 Curva Normal e o *p-value*

A curva normal é uma distribuição vastamente utilizada cientificamente, uma vez que representa relativamente bem inúmeros fenômenos populacionais. Nesse trabalho, para analisar o resultados dos testes estatísticos, far-se-á referência ao *p-value* que tem uma estreita relação com a curva normal, como pode ser visualizado na Figura 10.

O *p-value* denota o grau de significância estatística associada a um teste aplicado ([HIRAKATA; MANCUSO; CASTRO, 2019](#)). Por exemplo, para um nível de confiança de 95%, em um teste unilateral, caso o *p-value* seja maior do que 0,05 não rejeitamos a hipótese nula;

enquanto que, se o *p-value* for menor ou igual a 0,05, a hipótese nula não é aceita. O significado da hipótese nula depende do teste aplicado. Na Figura 10, é possível visualizar um teste unilateral em que o *p-value* atende ao intervalo de confiança de 95%. Conforme a Figura 10, na curva normal, o *p-value* é a probabilidade de ter um resultado tao extremo quanto o observado considerando que a hipótese nula é verdadeira.

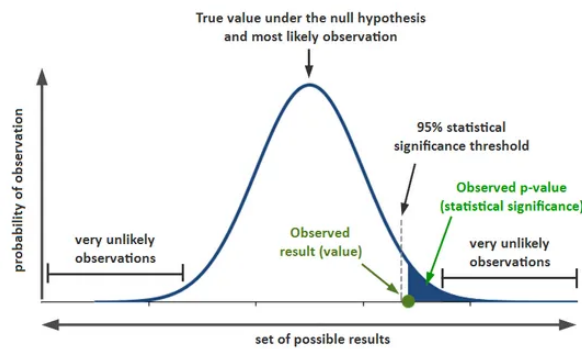


Figura 10 – A curva normal e sua relação com o *p-value*. Autor: (MCLEOD, 2019).

3

Busca Bibliográfica

3.1 Mapeamento Sistemático sobre 5G e ITS

Com o objetivo de identificar as principais tendências acadêmicas, ferramentas e métodos utilizadas para a simulação e análise de redes 5G veiculares, procedeu-se então com um mapeamento sistemático da literatura que será exposto parcialmente neste capítulo. Parcialmente, pois alguns elementos, dispensáveis à consecução desta dissertação, foram suprimidos.

A Figura 11 mostra o fluxograma do processo de elaboração de mapeamento sistemático proposto por (FALBO, 2018).

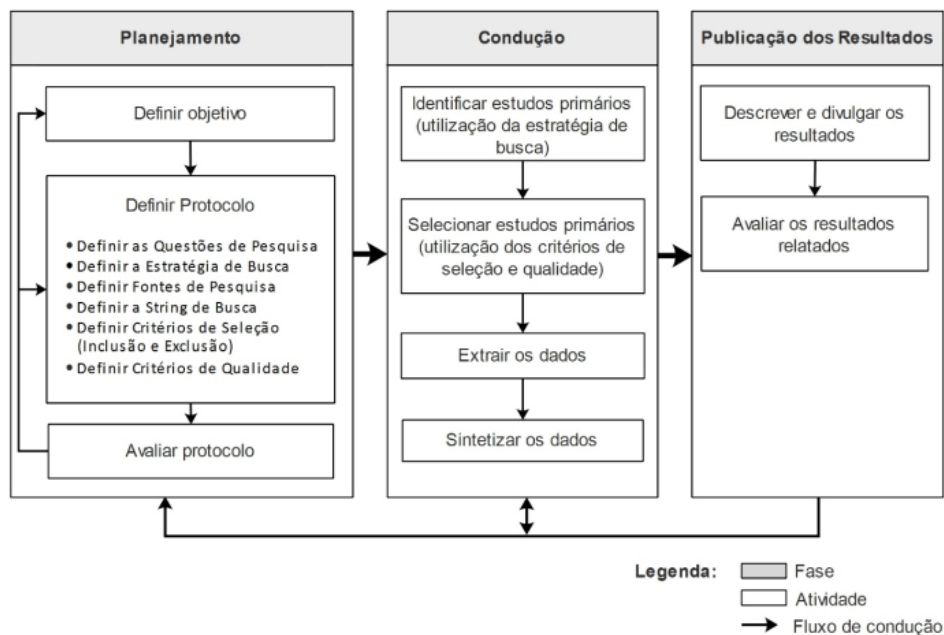


Figura 11 – Fluxograma de execução do Mapeamento Sistemático preconizado por (FALBO, 2018).

3.1.1 Planejamento

Nessa seção serão elencadas as informações que servem como norte à execução do mapeamento sistemático. Fundamentalmente, trata-se da definição do objetivo e do protocolo de pesquisa, que serão expostos a seguir. A tarefa de definição de critérios de qualidade, e, consequentemente, a sua avaliação, não foram abordados nesse mapeamento sistemático. Essa escolha decorre da evidência apresentada por (PETERSEN; VAKKALANKA; KUZNIARZ, 2015) de que a avaliação de qualidade é pouco comum em Mapeamentos Sistemáticos: cerca de 27% dos trabalhos analisados por (PETERSEN; VAKKALANKA; KUZNIARZ, 2015) faziam a avaliação de qualidade dos trabalhos.

3.1.2 Objetivo

O objetivo desse mapeamento sistemático é identificar e analisar métodos de avaliação e ferramentas de simulação de redes 5G aplicadas à comunicação veicular em cidades inteligentes.

3.1.3 Definição das bases de busca

Foram consideradas as seguintes bases para a coleta de trabalhos a serem avaliados pelo mapeamento sistemático:

- ACM Digital Library
- IEEE Digital Library
- Science Direct
- Scopus
- Springer Link

3.1.4 Estratégia de pesquisa

A fim de proceder com a pesquisa dos trabalhos analisados durante o mapeamento sistemático, foram utilizadas buscas automáticas realizadas nas bases da subseção anterior.

3.1.5 Questões de pesquisa

São questões que o mapeamento sistemático visou responder:

- Quais os métodos de pesquisa?

Foram consideradas como respostas: estudo de caso, experimento controlado, prova de conceito, análise teórica.

- Quais os veículos de publicação?
Foram consideradas como respostas: periódicos, conferências, workshops, simpósios.
- Qual o tipo de pesquisa?
Foram consideradas como respostas: pesquisa de avaliação, pesquisa de validação, proposta de solução, relato de experiência.
- Qual o tipo de intervenção é estudado?
Foram considerados como respostas: processo, método, modelo, ferramenta ou métrica.
- Quais as ferramentas utilizadas na validação da solução avaliada?
Esta questão foi aberta.
- Qual o foco do trabalho na área de redes veiculares?
Esta questão foi aberta.
- Quais as métricas utilizadas para avaliar a solução?
Esta questão foi aberta.

3.1.6 Definição da *String* de Busca

Com a finalidade de atender aos objetivos e responder às questões desse mapeamento, define-se a seguinte *string* de busca:

"5g"AND ("vanets"OR "vanet"OR "vehicular network"OR "vehicular networks") AND ("its"OR "intelligent transport systems"OR "intelligent transport system")

3.1.7 Critérios de inclusão e exclusão

São critérios de inclusão do mapeamento sistemático:

- os trabalhos estão disponíveis na Web;
- os trabalhos estão escritos em Inglês ou em Português;
- os trabalhos foram publicados em Periódicos, Conferências, Simpósios ou Workshops.

São critérios de exclusão desse mapeamento sistemático:

- não é um artigo;
- não foi possível o acesso ao trabalho completo;
- trabalhos cujo foco são aplicações multimídia;
- trabalhos cujo foco é eficiência energética;

- trabalho secundário, exceto os que tratam diretamente sobre ferramentas de simulação e padrões de redes veiculares;
- trabalhos sobre SDN;
- trabalhos cujo foco é segurança.

Uma vez que as ferramentas de simulação, bem como padrões sobre redes veiculares são elementos chaves dessa pesquisa, tais estudos foram mantidos mesmo sendo secundários. Outra decisão desse trabalho diz respeito às tecnologias consideradas. As especificações do padrão IEEE 802.11p são bastante relevantes ainda hoje, mesmo após quase 20 anos do início da sua normatização, por isso foi considerado. A tecnologia 4G ou LTE também foi considerada no contexto desse estudo, pois é o padrão de comunicação celular imediatamente anterior ao 5G e compartilha características em comum com ele. Considerou-se que trabalhos sobre SDN, segurança, multimídia ou eficiência energética ampliariam demasiadamente o escopo dos estudos analisados.

3.1.8 Condução

Nessa seção são apresentados os quantitativos oriundos da seleção dos trabalhos conforme o protocolo exposto na seção anterior. Além disso, são abordados os procedimentos utilizados para identificar, selecionar e extrair informações dos trabalhos.

A fase de aceite e descarte dos trabalhos ocorreu com auxílio da ferramenta on-line Parsifal e deu-se em 3 etapas. Na primeira, referente aos trabalhos duplicados, 51 foram removidos; em seguida, foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão, que resultou em 34 trabalhos. Por fim, foi procedida uma repescagem sobre os trabalhos rejeitados, o que fez somar mais quatro trabalhos aos aceitos. Na Tabela 2 encontram-se os nomes dos artigos aceitos após as três etapas supracitadas.

Tabela 2 – Relação de artigos aceitos.

Referência	Título
(CHANG; LIANG; HUANG, 2015)	Adaptive message forwarding for avoiding broadcast storm and guaranteeing delay in active safe driving VANET
(EL-ATTY; GHARSSELDIEN, 2017)	Performance analysis of an advanced heterogeneous mobile network architecture with multiple small cell layers
(LIN; HSIANG; YEH, 2017)	A New Mobility Management Scheme for Intelligent Transportation Systems
(DIMITRAKOPOULOS, 2017)	Sustainable mobility leveraging on 5G mobile communication infrastructures in the context of smart city operations
(CIOROAICA et al., 2019)	Simulation methods and tools for collaborative embedded systems: with focus on the automotive smart ecosystems
(GARROCHO; SILVA; OLIVEIRA, 2020)	D2D pervasive communication system with out-of-band control autonomous to 5G networks
(YUAN et al., 2020)	Distributed Estimation Framework for Beyond 5G Intelligent Vehicular Networks
(AHMED et al., 2019)	Services and simulation frameworks for vehicular cloud computing: a contemporary survey
(CAMPOLO et al., 2019)	Full Duplex-Aided Sensing and Scheduling in Cellular-V2X Mode 4
(HU et al., 2017b)	Live Synthesis of Vehicle-Sourced Data Over 4G LTE
(BITAGHSIR; KHONSARI, 2019)	Modeling and improving the throughput of vehicular networks using cache enabled RSUs
(DONG et al., 2017)	Enhancing Vehicular Communication Using 5G-Enabled Smart Collaborative Networking
(SKOUFAS; SPYROU; MITRAKOS, 2019)	Low Cost V2X Traffic Lights and Vehicles Communication Solution for Dynamic Routing
(WENDLAND; SCHAEFER; THOMÄ, 2019)	An Application-Oriented Evaluation of LTE-V's Mode 4 for V2V Communication
(WANG; MAO; GONG, 2017)	An Overview of 3GPP Cellular Vehicle-to-Everything Standards
(SCHOLLIERS et al., 2016)	Co-operative Traffic Solutions for Hybrid Communication Environments
(ARAMRATTANA et al., 2019)	Testing cooperative intelligent transport systems in distributed simulators
(RAZA et al., 2018)	Social Vehicle-to-Everything (V2X) Communication Model for Intelligent Transportation Systems Based on 5G Scenario
(RAVIGLIONE; MALINVERNO; CASETTI, 2019)	Characterization and Performance Evaluation of IEEE 802.11p NICs
(MOLINA-MASEGOSA; GOZALVEZ, 2017)	System Level Evaluation of LTE-V2V Mode 4 Communications and Its Distributed Scheduling
(LAMB; AGRAWAL, 2019)	Analysis of mobile edge computing for vehicular networks
(MOLINA-MASEGOSA; GOZALVEZ; SEPULCRE, 2018)	Configuration of the C-V2X Mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communication
(AHMAD et al., 2018)	VANET-LTE based heterogeneous vehicular clustering for driving assistance and route planning applications
(ALI et al., 2019)	Simulation based Vehicle to Vehicle and base station communication
(SANTINI et al., 2018)	Platooning Maneuvers in Vehicular Networks: A Distributed and Consensus-Based Approach
(DENG; CAI; LIANG, 2020)	A Multi-Hop VANETs-Assisted Offloading Strategy in Vehicular Mobile Edge Computing
(KURUVATTI; MUTABAZI; SCHOTTEN, 2018)	Exploiting Mobility Context Awareness in Cellular Networks for Assisting Vehicular Use Cases
(HEO et al., 2019)	Performance-Cost Tradeoff of Using Mobile Roadside Units for V2X Communication
(PETROV; DADO; AMBROSCH, 2017)	Computer Modelling of Cooperative Intelligent Transportation Systems
(GHOLIBEIGI et al., 2017)	Reliable vehicular broadcast using 5G device-to-device communication
(LUO et al., 2018)	Cooperative vehicular content distribution in edge computing assisted 5G-VANET
(DJILALI et al., 2018)	Performances Evaluation Study of VANET Communication Technologies for Smart and Autonomous Vehicles
(SANCHEZ-IBORRA et al., 2019)	Empowering the internet of vehicles with multi-RAT 5G network slicing
(HAYES; OMAR, 2019)	End to End VANET/IoT Communications A 5G Smart Cities Case Study Approach
(AFAQ et al., 2020)	Towards 5G network slicing for vehicular ad-hoc networks: An end-to-end approach
(RADDO et al., 2020)	An end-to-end 5G automotive ecosystem for autonomous driving vehicles
(KUMAR et al., 2017)	Performance analysis of hybrid WiMAX/DSRC scenarios for vehicular communication environment
(HU et al., 2017a)	Link level performance comparison between LTE V2X and DSRC

Tabela 3 – Relação de trabalhos aceitos e questões de pesquisa respondidas.

Referência	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9
(CHANG; LIANG; HUANG, 2015)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(EL-ATTY; GHARSSELDIEN, 2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(LIN; HSIAO; YEH, 2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(DIMITRAKOPOULOS, 2017)	X	X	X	X	X		X	X	
(CIOROAICA et al., 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(GARROCHO; SILVA; OLIVEIRA, 2020)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(YUAN et al., 2020)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(AHMED et al., 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	
(CAMPOLO et al., 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(HU et al., 2017b)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(BITAGHSIR; KHONSARI, 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(DONG et al., 2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(SKOUFAS; SPYROU; MITRAKOS, 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	
(WENDLAND; SCHAEFER; THOMÁ, 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(WANG; MAO; GONG, 2017)	X	X	X	X	X		X	X	
(SCHOLLIERS et al., 2016)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(ARAMRATTANA et al., 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(RAZA et al., 2018)	X	X	X	X	X		X	X	
(RAVIGLIONE; MALINVERNO; CASETTI, 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(MOLINA-MASEGOSA; GOZALVEZ, 2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(LAMB; AGRAWAL, 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(MOLINA-MASEGOSA; GOZALVEZ; SEPULCRE, 2018)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(AHMAD et al., 2018)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(ALI et al., 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	
(SANTINI et al., 2018)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(DENG; CAI; LIANG, 2020)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(KURUVATTI; MUTABAZI; SCHOTTEN, 2018)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(HEO et al., 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(PETROV; DADO; AMBROSCH, 2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(GHOLIBEIGI et al., 2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(LUO et al., 2018)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(DJILALI et al., 2018)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(SANCHEZ-IBORRA et al., 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(HAYES; OMAR, 2019)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(AFAQ et al., 2020)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(RADDO et al., 2020)	X	X	X	X	X	X	X	X	
(KUMAR et al., 2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
(HU et al., 2017a)	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Conforme pode ser constatado através da Tabela 3, cerca de 97% das questões previstas na fase de planejamento do mapeamento sistemático foram respondidas a partir da leitura dos trabalhos aceitos.

3.1.9 Resultados

Nesta seção estão presentes os dados extraídos e sintetizados a partir das respostas às questões de pesquisa. Adicionalmente, são apresentados dados como ano de publicação dos trabalhos aceitos, distribuição dos trabalhos por base de busca e proporções entre os trabalhos selecionados e aceitos.

Os trabalhos selecionados são aqueles trazidos pelas bases de busca, enquanto que os aceitos são os selecionados, porém não rejeitados. A partir da observação cuidadosa das Figuras 12 e 13, é possível perceber que apesar dos trabalhos oriundos da base Springer Link corresponderem a cerca de 45% do total, a proporção de trabalhos aceitos foi bastante próxima àquela observada para a base Scopus. Em contrapartida, aproximadamente apenas 15% dos trabalhos selecionados foram oriundos da base Scopus. O elevado quantitativo de trabalhos trazidos pela Springer Link deu-se, sobretudo, pela indexação de trabalhos que não necessariamente eram artigos, o que tornou o processo de seleção dos trabalhos mais custoso.

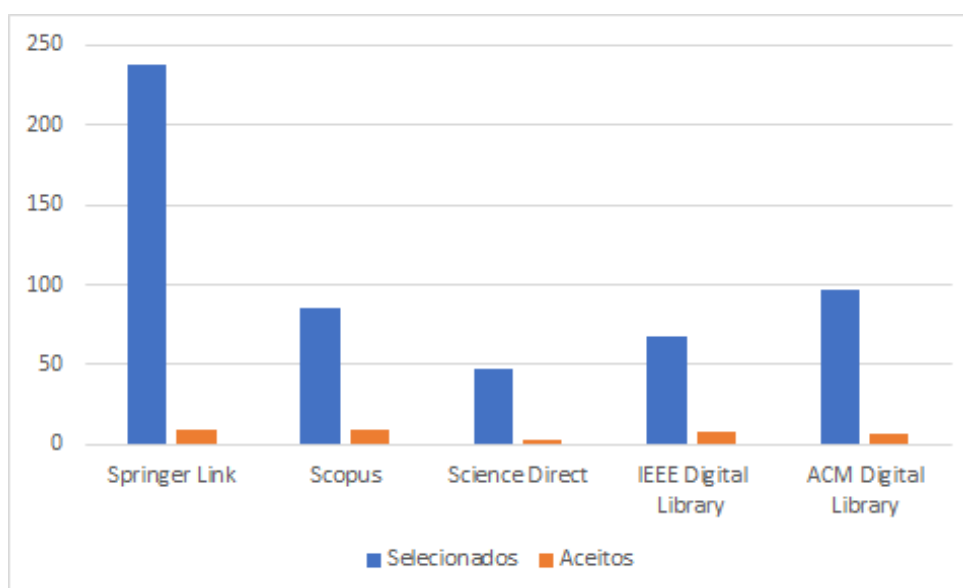


Figura 12 – Proporção de trabalhos selecionados e aceitos no mapeamento sistemático de acordo com a base de busca.

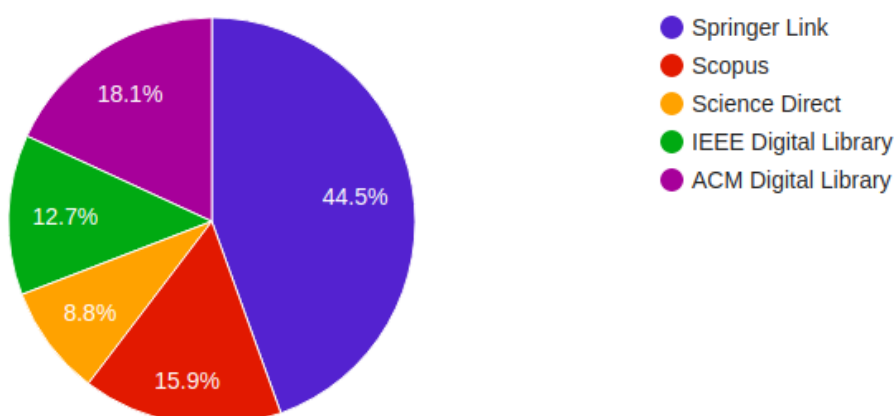


Figura 13 – Distribuição dos trabalhos de acordo com a base de busca.

O gráfico da Figura 14 evidencia que a temática abordada nesse mapeamento sistemático é atual, uma vez que a maior quantidade de trabalhos foi publicada no ano anterior, 2019. Apesar

da queda observada para o ano de 2020, é importante ponderar que os dados foram extraídos das bases no mês de Maio de 2020 e após esse momento, não foi realizada nova busca para identificar outros trabalhos publicados nos meses restantes do ano.



Figura 14 – Trabalhos aceitos no mapeamento sistemático de acordo o ano de publicação.

A Tabela 4 relaciona 35 ferramentas de simulação ou métodos de validação e verificação de soluções, encontradas a partir da leitura dos trabalhos aceitos. Entre as ferramentas ou métodos que apareceram com maiores frequências estão: SUMO, OMNeT++, Veins, Prototipação e Analítico. Por constituírem-se em um *framework* de simulação que integra rede de comunicação e a dinâmica de mobilidade urbana, o SUMO, Veins e OMNeT++ tiveram valores de ocorrências próximos. O Veins é responsável pela integração entre o SUMO e o OMNeT++ em tempo de execução. O uso dessas três ferramentas tem sido recorrente nos trabalhos em virtude do elevado grau de detalhismo, precisão e acurácia dos modelos simulados. Além disso, foi constatado que, para a simulação de redes veiculares, de modo geral, o método analítico-matemático também é bastante utilizado, com 10 ocorrências nos 38 trabalhos aceitos. A ferramenta utilizada para execução desses modelos tem sido o MATLAB.

Por sua vez, de acordo com a Tabela 4, o método de prototipação foi utilizado em 10 trabalhos como forma de verificação/validação das soluções propostas. Uma vez que a implementação e implantação de redes veiculares é dispendiosa (DJILALI et al., 2018), a prototipação, em geral, veio associada a provas de conceito, que são implementações incompletas com o objetivo de analisar de comportamentos e testar hipóteses.

Tabela 4 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com as ferramentas utilizadas para avaliação/-validação.

Ferramenta	Quantitativo
Analítico	10
Artery	1
CarMaker	1
EstiNet	1
FERAL	1
GrooveNet	1
ITETRIS	1
LTEV2VSim	1
MATLAB	7
Mininet	1
MobiReal	1
MoNoTrac	1
NCTUns	1
NS2	1
NS3	3
OMNeT++	11
OPNET Simulator	1
PARAMICS	1
Plexe	2
Prototipação	10
Qosmet	1
SimIV	1
SimuLTE	1
STRAW	1
SUMO	14
Synopsys virtualizer	1
TraNS	1
VanetMobiSim	2
Veins	10
VENTOS	1
Victa Lab	1
Virtual system platform	1
VISSIM	1
Vista virtual prototyping	1
VSimRTI	2

Na fase de planejamento foram considerados três contextos de estudo possíveis: governo, indústria ou academia. Todavia, dentre os trabalhos aceitos, não houve ocorrência para o contexto governamental. Uma possível explicação para essa evidência é que os padrões de redes veiculares são desenvolvidos por organizações e institutos não-governamentais, a exemplo da 3GPP (*The 3rd Generation Partnership Project*) e IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Para serem classificados como governamentais, buscou-se por trabalhos com foco na estrutura da

administração pública.

O gráfico da Figura 15 mostra que o foco dos trabalhos sobre redes veiculares tem sido a proposição de Arquiteturas de Comunicação, a avaliação de desempenho de redes veiculares, e alocação de recurso. As arquiteturas de comunicação veicular incluem estratégias de *Edge* e *Fog Computing*. Nos trabalhos cujo foco foi avaliação de redes veiculares, em geral, foi realizada a comparação de diferentes tecnologias frente às métricas. Nos trabalhos que enfatizaram a alocação de recursos, a temática recorrente foi a provisão de mecanismos de escalonamento e reserva de recursos para aprimorar a estabilidade das conexões. É relevante observar que, em alguns trabalhos, devido a dificuldade de enquadramento em apenas um foco, esses foram classificados como tendo mais de um foco.

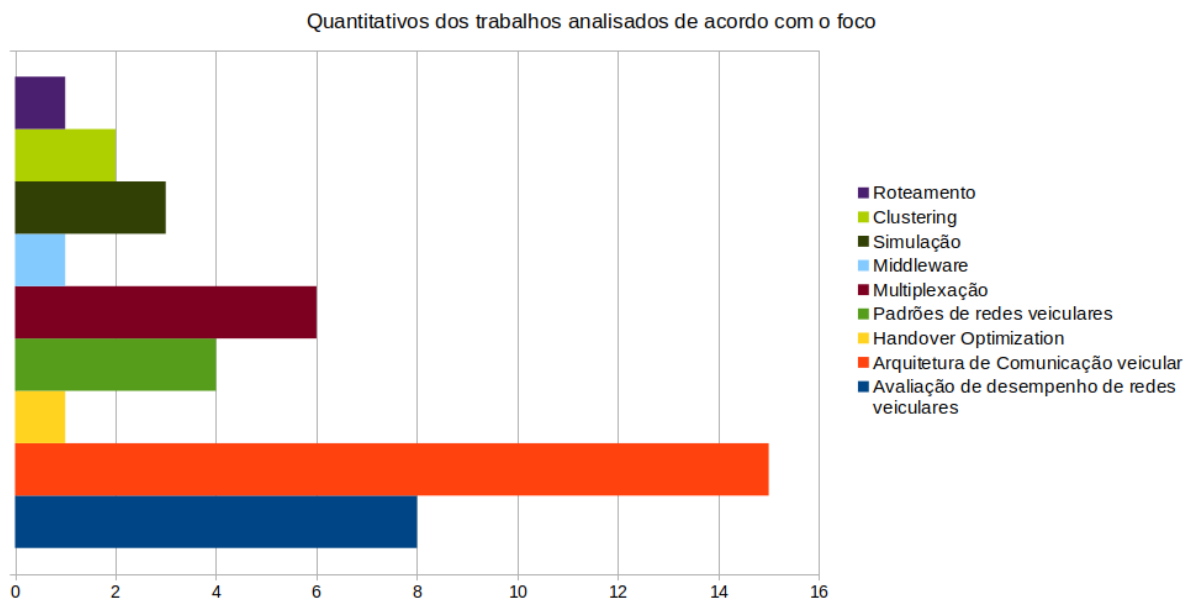


Figura 15 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com o foco de estudo.

O gráfico da Figura 16 informa que a maior parte dos trabalhos analisados teve um método como forma de intervenção. Logo em seguida, com 15 ocorrências, aparecem os modelos como forma de intervenção estudada. A partir da leitura dos artigos aceitos, o método foi compreendido como a maneira com a qual uma tarefa ou processo é executado, a exemplo da alocação de recurso ou do roteamento. Enquanto isso, o modelo foi compreendido como uma intervenção de nível de abstração mais elevado, com menos detalhes práticos e de implementação. Todavia, os modelos e métodos são complementares e podem ter aparecido simultaneamente em alguns trabalhos.

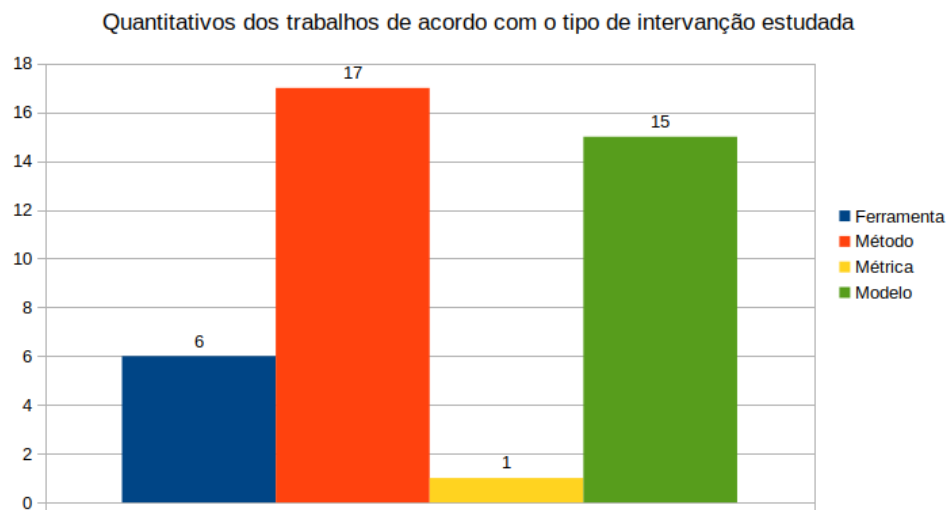


Figura 16 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com a intervenção estudada.

A Tabela 5 apresenta as métricas que os trabalhos aceitos utilizaram para avaliar as soluções. Houve destaque para a latência, perda de pacotes e taxa de transferência, respectivamente as três primeiras colocadas. Apesar de serem métricas vastamente utilizadas, ter noção desse quantitativo é relevante pois enfatiza sua importância também no contexto das redes veiculares e norteia o pesquisador quanto à maneira convencional de avaliação dos resultados. O uso de métricas compartilhadas por outros trabalhos também favorece a validação de resultados.

Tabela 5 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com as métricas utilizadas.

Métrica	Ocorrências
Latência	18
Perda de pacotes	11
Taxa de transferência	10
Utilização de recurso	5
Relação Sinal Ruído	5
Convergência	5
Probabilidade de conexão	4
Itens transmitidos	3
Consumo energético	3
Número de pacotes encaminhados	2
Taxa de erro por bit	2
Taxa de disseminação	2
Nós por canal	2
Estabilidade de canal	2
Colisão de pacotes	2
Timeliness	1
Itens processados	1
Número de interrupções	1
Taxa de erro por bloco	1

A Figura 17 mostra as ocorrências das tecnologias de redes de comunicação nos trabalhos aceitos. A partir do gráfico é possível perceber que ainda há bastantes publicações embasadas no padrão IEEE 802.11p, que teve seus trabalhos de normatização finalizados desde 2010 (IEEE, 2020). Esse quantitativo elevado da tecnologia IEEE 802.11p também corrobora com os valores observados no gráfico da Figura 15, à medida que essa tecnologia - baseada em FDM (*Frequency Division Multiplexing*) (WANG; MAO; GONG, 2017) - é bastante susceptível a problemas de alocação de recursos e multiplexação. Por conseguinte, os trabalhos que tratam desse tema tiveram quantitativos significativos (Figura 15).

Também aparecem em destaque no gráfico da Figura 17 as tecnologias 5G e 4G/LTE. É importante salientar que os trabalhos referentes ao 5G apenas conjecturam com base em requisitos da tecnologia, o que é compreensível na proporção que ela ainda está em fase de implantação preliminar na maioria dos países. Por outro lado, muitos trabalhos, com simulações e implementações incompletas, fizeram uso da tecnologia 4G visando a aplicabilidade dos resultados também para o 5G.

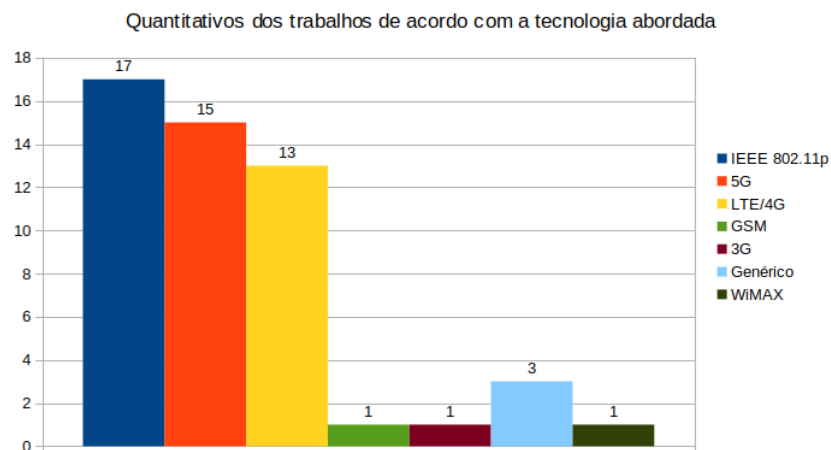


Figura 17 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com as tecnologias utilizadas.

O gráfico da Figura 18 mostra que, apesar de mais resposta terem sido previstas para o tipo de pesquisa, apenas duas respostas foram observadas. Isso deve-se ao fato dos trabalhos, em geral, proporem soluções e as avaliarem. Contudo, foram observados também trabalhos que apenas propuseram soluções sem avaliar qualitativamente ou quantitativamente.

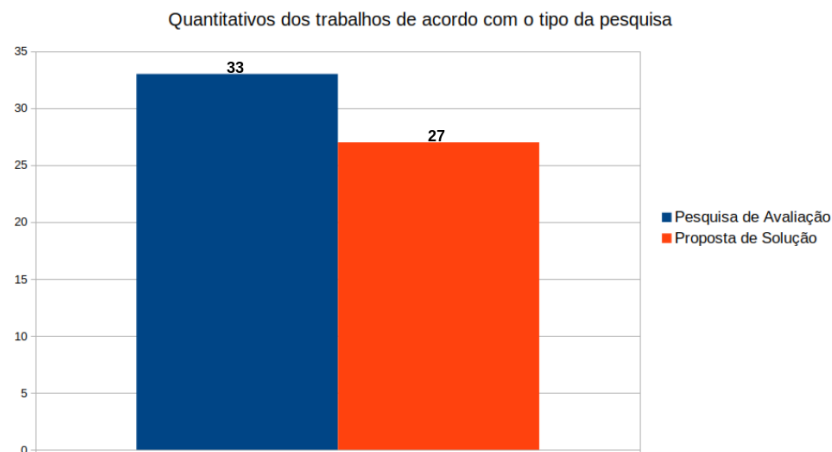


Figura 18 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com o tipo de pesquisa.

O gráfico da Figura 19 mostra que cerca de 60% dos trabalhos foram publicados em periódicos. Em seguida, com aproximadamente 16%, a conferências foram o segundo veículo de publicação mais recorrente.

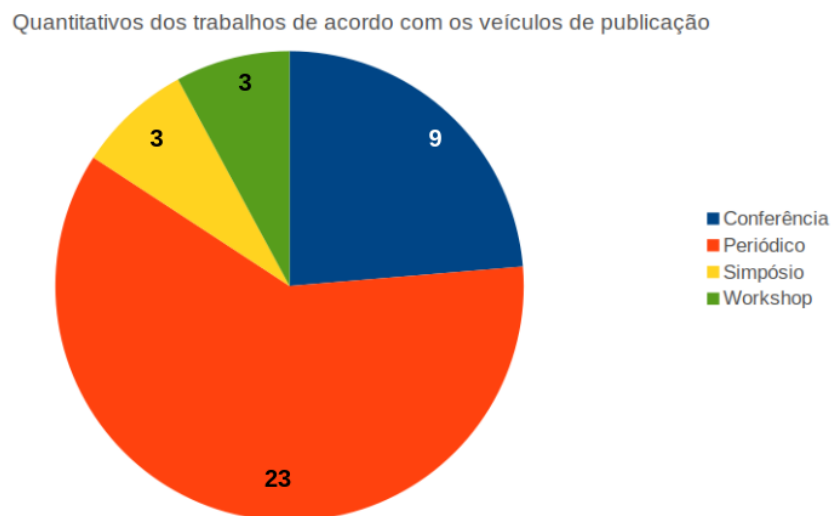


Figura 19 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com os veículos de publicação.

O gráfico da Figura 20 exhibe que cerca de 63% dos trabalhos aceitos utilizaram experimentos controlados como método de pesquisa. Esse valor está associado aos resultados expostos na Tabela 4, à medida que a utilização de simulação foi massivamente adotada, o que configura a execução de experimentos controlados *in virtuo*. A prova de conceito aparece como o segundo método de pesquisa mais utilizado nos trabalhos e está fortemente associada à construção de protótipos para avaliar soluções.

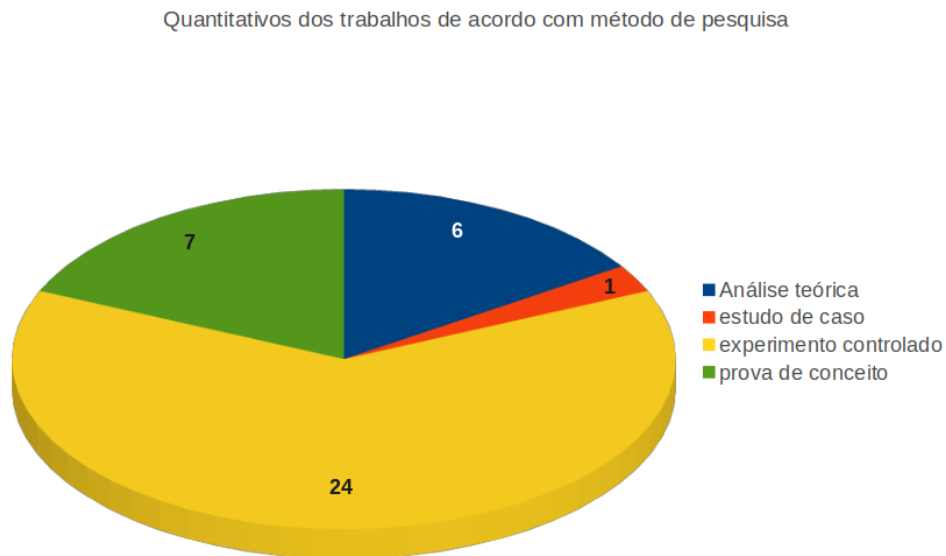


Figura 20 – Quantitativos dos trabalhos de acordo com o método de pesquisa utilizado.

Diante das informações apresentadas, é possível elencar como desafio de pesquisa em redes 5G veiculares a proposição de modelos e métodos avaliados por meio de simulações condizentes aos requisitos dessa tecnologia, pois isso não foi observado nos trabalhos aceitos para este mapeamento sistemático. Nesse contexto, este trabalho: utilizou o simulador SUMO (Tabela 4) para realizar um experimento controlado (Figura 20) ; propôs uma arquitetura de solução (Figura 15) que inclui a tecnologia de comunicação do 5G (Figura 17); propôs e avaliou de forma comparativa e quantitativa um algoritmo para roteamento veicular (Figura 18).

3.2 Trabalhos Relacionados

Em (HO et al., 2019) é proposto um sistema (PTPR) proativo de redução de tempo de viagem baseado numa abordagem de re-roteamento usando feromônios. Há um modelo de predição do trânsito baseado na mesma abordagem, no qual cada veículo deposita sua contribuição não apenas em uma via, mas em várias. A partir do modelo há a previsão de onde cada carro estará no futuro, o que gerou um aumento no número de veículos que chegam ao seu destino. O algoritmo de k-shortest path, alimentado com informações locais dos veículos é utilizado para re-roteamento e com a combinação desses dois fatores houve redução de dióxido de carbono (CO₂), material particulado e hidrocarbonetos (HC), que estão no foco do estudo descrito. O PTPR possui quatro fases principais, a saber: preparação de dados, predições do trânsito, busca pela rota ótima e sugestão de roteamento. O feromônio é baseado nas medidas de tempo de viagem, densidade da via e fluxo de densidade de informações que os veículos contribuem para o sistema. Além disso, há uma rede neural LSTM (*Long Short-Term Memory*) que é treinada para prever as condições futuras do trânsito.

Ainda com relação ao (HO et al., 2019), por usar um modelo de aprendizado de máquina para prever as condições do trânsito, se faz necessário a reserva de tempo para aprendizado, somente após esse período é quando os resultados começam a ser positivos para o PTPR. O roteamento dos veículos é realizado em etapas, partindo da seleção de veículos baseado em dois critérios: rota original do veículo congestionada e o veículo deve estar em uma determinado segmento da rota a partir do congestionamento, então para computar as múltiplas rotas para os diversos veículos, o algoritmo de roteamento busca apenas no alcance do feromônio. A simulação é feita utilizando o SUMO e o processamento dos dados a respeito do roteamento das rotas dos veículo com o MatLab. Há uma comparação entre o PTPR e outros dois métodos. Nas métricas utilizadas como tempo médio de viagem, número de veículos que chegaram ao seu destino, consumo de combustível e redução de poluentes o PTPR mostrou-se superior perdendo apenas na distância média percorrida pelos veículos do ponto de partida até o ponto de chegada. O tempo de computação do PTPR é significativamente menor em comparação ao PVR (*Pheromone-based vehicle rerouting*) devido ao seu processamento regional e não global como no PVR.

Em (SOON; LIM; PARTHIBAN, 2019), é proposto um sistema de transporte verde utilizando uma abordagem com feromônios, PGTS (*Pheromone-based Green Transportation System*), que é dividido em três partes: Um modelo de regressão epsilon-Support Vector que prevê congestionamentos em uma determinada via; um controlador de semáforos chamado CTLIC (*Coordinated Traffic Light Control*) que atua nos semáforos das vias congestionadas a fim de dispersar os veículos que se encontram em um trânsito denso; e, por fim, um esquema de roteamento dos veículos chamado CGVR (*Cooperative Green Vehicle Routing*) que tem como função distribuir os carros de tal maneira que as vias adjacentes também não fiquem congestionadas. O PGTS utiliza agentes de intersecção para coletar dados da densidade atual e futura de veículos e usá-los no PCP (*Pheromone-based Congestion Prediction*), que é um sistema

para previsão de congestionamentos com base nos dados coletados (usados como feromônios). Com a previsão em mãos é realizada uma coordenação entre os semáforos, a partir do controlador CTLC, a fim de criar uma rota que dilua o trânsito pesado e minimize os poluentes. Após a dispersão dos veículos, o CGVR age como um direcionador que dita para onde cada veículo irá baseado em uma rota gerada probabilisticamente por um algoritmo que busca o menor caminho com um menor número de intersecções, a fim de evitar outros congestionamentos e o alto consumo de combustível.

O trabalho (SOON et al., 2019) propõe um sistema denominado E-PGVR que tem por objetivo reduzir as emissões de gases poluentes e os congestionamentos. Essa solução aloca rotas a veículos que irão atravessar uma série de semáforos de forma ótima do ponto de vista da redução de combustível. Devido ao fato de ser um sistema descentralizado, consegue ser bastante escalável. A partir de uma modificação do algoritmo k-shortest path têm-se o gerador de rotas. Além disso, conta com a captura de informações a respeito da quantidade de semáforos e velocidade média das rotas, que impactam diretamente no consumo de combustível. Essas informações são usadas portanto no cálculo do custo da rota. A arquitetura desse sistema conta com 4 tipos de agentes: City Agent, Road Supervisor Agent, Intelligent Vehicle Agent e Traffic Light Agent, que comunicam entre si trocando informações de coleta de dados a cerca dos feromônios adotados. O E-PGVR utiliza um módulo de previsão do trânsito para um futuro próximo, que detecta congestionamentos em vias. Uma vez que um congestionamento é previsto, os veículos envolvidos são selecionados para roteamento utilizando um algoritmo modificado gerador de rotas, que leva em consideração o número de semáforos que haverá no trajeto, além disso há uma priorização entre os veículos, considerando o quanto de combustível cada um consome, pois assim aumenta a eficiência na redução de gases poluentes.

No trabalho (SHAH; BATTH; EGERTON, 2020) é realizada uma comparação entre quatro algoritmos de roteamento a fim de calcular a performance de cada um e fazer uma comparação para descobrir qual algoritmo apresenta melhores resultados com base nos parâmetros route length, waiting time, travel time e average speed. O trabalho conclui que a abordagem CH (Contraction Hierarchies) é a melhor mesmo não vencendo completamente em waiting time o algoritmo A-star Dynamic.

O (KOH et al., 2018) traz a demonstração de um algoritmo que aplica aprendizado por reforço no SUMO, no qual um veículo escolhe a melhor rota até seu destino final. Não é definida nenhuma métrica para avaliação, tampouco o uso de sementes e avaliação do tempo de execução.

Em (PAZ et al., 2022) foi avaliado o algoritmo A* paralelo contra outros algoritmos em cima de algumas métricas de trânsito como execution time, route duration, timeloss, route length and jams. Já no presente trabalho é avaliada a performance do algoritmo PPUMO em relação ao próprio A* paralelo e aos demais algoritmos utilizados em (PAZ et al., 2022), acrescentando métricas como wrong lanes e collisions, obtendo melhores resultados em determinadas métricas. Diferentemente do trabalho (FERREIRA, 2019), no atual foram adicionadas as métricas de

mobilidade urbana relativas a congestionamentos, colisões e wrong lanes e timeloss além de trazer um algoritmo baseado em feromônio, que gera um efeito de memória de curto prazo e pode potencializar a qualidade das rotas em cenários de rerroteamentos sucessivos. Outro ponto de diferente deste trabalho em relação àquele é a utilização de testes estatísticos no âmbito das análises quantitativas.

O trabalho proposto em [Ho et al. \(2019\)](#) não apresenta parametrização da simulação no sentido de variar as condições experimentais a fim de validar a consistência da aplicação nos mais variados cenários possíveis. Ele também necessita de uma reserva de tempo para seu modelo de aprendizagem, o que não é necessário na abordagem que apresentamos aqui. Também não há a descrição da robustez da máquina na qual os experimentos foram realizados e isso ameaça a validade dos mesmos. Além disso, seu sistema de feromônio está limitado a uma pequena região de poucas vias e não ao todo, diferentemente do presente trabalho que avalia o feromônio globalmente e habilita o processamento em larga escala devido ao processamento paralelo.

Os trabalhos mencionados aqui possuem algumas limitações quando comparados à abordagem proposta em nosso trabalho. Em [Soon, Lim e Parthiban \(2019\)](#) é realizado um baixo número de simulações o que mostra a não utilização de sementes além de utilizar um número fixo de veículos, o que é uma ameaça a validade estatística, além disso a abordagem engloba semáforos e roteamento o que certamente é mais complexo, pois precisa controlar mais elementos do sistema.

O trabalho [Soon et al. \(2019\)](#) apresenta algo recorrente da literatura que é o baixo número de experimentos, a não variação da quantidade de veículos e dos parâmetros da simulação, o que pode colocar em cheque a consistência da aplicação para os ambientes mais extremos possíveis. Além disso, o k-shortest utilizado em [Soon et al. \(2019\)](#) avalia uma quantidade limitada de possibilidades, enquanto o presente estudo avalia o sistema como um todo em cada replanejamento.

No trabalho [Shahi, Batth e Egerton \(2020\)](#) foram adotadas poucas métricas de trânsito que não fornecem uma certeza quanto a sua eficiência em um ambiente real, onde encontramos diversos desafios. O trabalho [Koh et al. \(2018\)](#) preocupa-se mais em mostrar a aplicabilidade do aprendizado por reforço no SUMO do que trazer uma análise performática, o que pode ser percebido a partir da quantidade reduzida de simulações e métricas de trânsito, poucos veículos em cada simulação e nenhum cálculo de performance quanto ao tempo de execução dos algoritmos utilizados, o que pode limitar sua aplicabilidade em cenários de larga escala. Além disso a descrição do hardware utilizado nos experimentos não foi especificada. Na Tabela ?? é possível ver um sumário dos trabalhos comparados.

Trabalho	Técnicas Aplicadas	Acordo mapa	Número de vias	Quantidade de veículos	Métricas analisadas
Pai et al. (2022)	PTU-MO, A* Serial, A* Parallel, Dijkstra Serial	8 km2	852	até 9 mil	Tempo Percorrido, congestionamentos, tempo de viagem, comprimento de rota, tempo de espera, tempo de parada, tempo de trânsito, tempo de processamento de rota, taxa de anulação da simulação, número de eventos, da simulação, tempo de simulação, atraso total médio, comprimento de rota, tempo de viagem.
Ferreira (2019)	A* Serial, A* Parallel, Dijkstra Serial	8 km2	852	até 9 mil	Tempo médio de viagem, distância média percorrida, consumo de combustível, tempo de espera, tempo de parada, tempo de trânsito, tempo de processamento de rota, taxa de anulação da simulação, número de eventos, da simulação, tempo de simulação, atraso total médio, comprimento de rota, tempo de viagem.
Ho et al. (2019)	K-shortest path com LSTM	até 10 km2	até 606	até 5500	Consumo de combustível, emissão de CO2, tempo de viagem, quantidade de vias congestionadas, tempo de viagem, veículos com rota finalizada.
Soon, Lim e Pathakur (2019)	K-shortest path, PGTS (Phenomenon-based Green Transportation System), Modelo de regressão de vetores de suporte	não informado	não informado	até 4000	Tempo médio de viagem, distância média percorrida, consumo de combustível, tempo de espera, tempo de parada, tempo de trânsito, tempo de processamento de rota, taxa de anulação da simulação, número de eventos, da simulação, tempo de simulação, atraso total médio, comprimento de rota, tempo de viagem.
Soon et al. (2019)	K-shortest path, E-PQVR (Eco-friendly Phenomenon-based Green Vehicle Routing)	não informado	não informado	até 3000	Consumo de combustível, emissão de CO2, tempo de viagem, quantidade de vias congestionadas, tempo de viagem, veículos com rota finalizada.
Shah, Bhatt e Eganter (2020)	Dijkstra Dinâmico, A* Dinâmico, Floyd Warshall, Hierarquia de Contrução	10 km2	não informado	não informado	Tempo médio de viagem, distância média percorrida, consumo de combustível, tempo de espera, tempo de parada, tempo de trânsito, tempo de processamento de rota, taxa de anulação da simulação, número de eventos, da simulação, tempo de simulação, atraso total médio, comprimento de rota, tempo de viagem.
Koh et al. (2018)	Aprimoramento por exatidão, Processos de Decisão Markovian	não informado	não informado	não informado	Tempo médio de viagem, distância média percorrida, consumo de combustível, tempo de espera, tempo de parada, tempo de trânsito, tempo de processamento de rota, taxa de anulação da simulação, número de eventos, da simulação, tempo de simulação, atraso total médio, comprimento de rota, tempo de viagem.

4

Modelagem de Solução

4.1 Parallel and Pheromone-based Urban Mobility Optimization

Neste capítulo será apresentado o processo de modelagem de solução para: a. A construção de um algoritmo de roteamento que permita um planejamento eficiente e dinâmico de rotas veiculares em um ITS; b. A proposição de uma arquitetura que considere a utilização do algoritmo integrado à infraestrutura de processamento e comunicação subjacentes. O algoritmo proposto foi denominado PPUMO (Parallel and Pheromone-based Urban Mobility Optimization). Apresentamos ele como contraponto à necessidade de utilização de uma fase de treinamento utilizando LSTM, ou ainda a aplicação do roteamento sobre uma quantidade limitada de veículos, por restrições de complexidade de tempo ou espaço computacional. O PPUMO foi concebido com o objetivo de: prover uma alternativa com analítica, ajustável a diferentes cenários de execução e baseada em feromônio; não requerer uma fase de treinamento à priori para levantamento de probabilidades; suportar a adequação comportamento a diferentes métricas objetivo; manter um baixo o tempo de execução mesmo em cenários de larga escala; considerar uma elevada quantidade de veículos e vias do sistema em cada replanejamento, a fim de priorizar a qualidade global do sistema de tráfego.

Algorithm 1 PPUMO Stages 1,3,4 Pseudocode

```

procedure PHEROMONEINITIALIZATION(widthList, lengthList, roadsList)
  for road  $\in$  roadsList do
     $FR \leftarrow \frac{widthList[road]}{lengthList[road]}$  ▷ Eq. 4.1
     $PHO[road] \leftarrow \frac{1}{FR}$  ▷ Eq. 4.2
  return PHOList, FRList

procedure PHEROMONEDISPERSION(PHOList, UDL, LDL, roadList)
  min  $\leftarrow$  min(PHOList)
  max  $\leftarrow$  max(PHOList)
  for road  $\in$  roadList do
    thisRoad  $\leftarrow$  PHOList[road]
     $PHOList[road] \leftarrow thisRoad * (\frac{LDL-UDL}{max-min} (thisRoad - min) + UDL)$  ▷ Eq. 4.4
  return PHOList

procedure PHEROMONESUM(vehicleRoutesList, PHOList, FRList)
  for route  $\in$  vehicleRoutesList do
    for road  $\in$  route do
       $PHOList[road] \leftarrow PHOList[road] + \frac{1}{FRList[road]}$  ▷ Eq. 4.1

```

Algorithm 2 PPUMO Stage 2 Pseudocode

```

1: procedure PPUMO(Cord, G, Gprob, ProbT, Cars, Roads)
2:   ▶ This procedure is executed for all vehicles at the same time. Each block is related to
   one vehicle
3:   visitedRoadsL  $\leftarrow$  List of visited roads                                ▶ Initially empty
4:   vehicleCost  $\leftarrow$  Matrix [cars,Roads]
5:   finalRoute  $\leftarrow$  Matrix [cars,Roads]
6:   beginRoadL  $\leftarrow$  list of begin road for each vehicle
7:   endRoadL  $\leftarrow$  list of end Road for each vehicle
8:   idx  $\leftarrow$  GPU threads
9:   gdx  $\leftarrow$  GPU grids
10:  thisRoad  $\leftarrow$  beginRoadL[gdx]
11:  while thisRoad  $\neq$  endRoad do
12:    for 0 : length(roadsL)-1 do
13:      thisRoad  $\leftarrow$  Roads[idx]
14:      if G[thisRoad] is adjacency and G[thisRoad]  $\notin$  visitedRoadsL then ▶ G is
Eq. 4.3
15:        H(thisRoad)  $\leftarrow$  EclDist(Cord[thisRoad], Cord[endRoad])
16:        if vehicleCost = 0 then
17:          vehicleCost[gdx * idx]  $\leftarrow$  CG[gdx * idx] + G[thisRoad] +
H(thisRoad)
18:        else if Gprob[idx] + probSum > ProbT then                                ▶ Gprob is Eq. 4.5
19:          CG[gdx * idx]  $\leftarrow$  G[thisRoad] + CG[gdx * idx]
20:          if probT = 0 then
21:            vehicleCost[gdx * idx]  $\leftarrow$  CG[gdx * idx] + H(thisRoad)
22:          else
23:            rand  $\leftarrow$  random[0, 1]
24:            if valueRandom  $\leq$  probT then
25:              vehicleCost[gdx * idx]  $\leftarrow$  CG[gdx * idx] + (1 - rand) *
H(thisRoad)
26:          else
27:            vehicleCost[gdx * idx]  $\leftarrow$  CG[gdx * idx] + H(thisRoad)
28:          finalRoute  $\leftarrow$  finalRoute + roadsList[idx]
29:          visitedRoadsL  $\leftarrow$  visitedRoadsL + thisRoad
30:  return finalRoute
31: procedure ECLDIST((x1, y1), (x2, y2))
32:  distance  $\leftarrow$  sqrt((x2 - x1)2 + (y2 - y1)2)
33:  return distance

```

O algoritmo projetado contou com as seguintes fases (LONES, 2011):

1. Inicialização dos feromônios
2. Replanejamento das rotas
3. Acúmulo do feromônio a partir da estimativa de tráfego
4. Dispersão dos Feromônios associados às vias

A fase 1 foi dada pela Equação 4.1 e leva em consideração as dimensões de cada via, além de assumir que vias mais largas e curtas potencialmente apresentam melhor fluidez. Seja FR o fator de vazão; W representa a largura da faixa, componente da via; L o comprimento da via; e N o número total de faixas da via.

$$FR = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{W_i}{L_i} \quad (4.1)$$

Uma vez que o acréscimo de custo da via faz com que ela seja evitada, utilizou-se o valor inverso da Equação 4.1, a fim de que os veículos fossem inicialmente direcionados para vias de maior fator de vazão. Sendo assim, o feromônio (PHO) é dado pela Equação 4.2.

$$PHO = \frac{1}{FR} \quad (4.2)$$

A Fase 2 ocorreu a cada 240 steps de simulação, com o valor do step pré-fixado em 1 segundo. Sendo assim, cada replanejamento ocorreu a cada 4 minutos, em tempo de simulação. O replanejamento das rotas foi realizado em GPU considerando 1 carro por thread, conforme o Pseudo-código 2. O custo das vias levado em consideração para o cálculo das rotas foi dado pela Equação 4.3, que representa o custo de ir da via i para a via j . Onde: β e ζ são parâmetros de ajuste exponencial no cálculo dos custos; K e P são constantes para ajustes de dimensionalidade nas variáveis utilizadas; e, $T(j)_{time}$ é o tempo de viagem para cada via j .

$$C(i, j) = K(PHO(j))^\beta + P(T_{time}(j))^\zeta \quad (4.3)$$

De posse das rotas que foram atribuídas a cada veículo, na Fase 3 foi realizado o cálculo dado pela seguinte dedução:

Seja $(r, p) \mid r \in \mathbb{N}$ e representa uma via do sistema, $p \in \mathbb{R}^+$ é a quantidade de feromônio associado à via r . Seja $(v, W) \mid v \in \mathbb{Z}^+$ representa um veículo e W é um conjunto de vias r que compõe a rota de um veículo v .

De modo que, para cada via do sistema de tráfego existe um par (r, p) e para cada veículo no sistema existe um par (v, W) .

Então, $\forall r \in W$, associado ao veículo v de (v, W) , adicione $1/FR$ ao valor de $p \in (r, p)$.

Para a 4, adotou-se um ajuste linear de dispersão, considerando que vias com maior FR (Equação 4.1) potencialmente serão menos propensas a serem pontos de retenção. O ajuste linear é dado pela Equação 4.4. Sendo assim, para cada via, que possui uma quantidade de feromônio associada, é gerado um valor z tal que $LDL \leq z \leq UDL$, sendo que $0 \leq LDL \leq 1$ e $0 \leq UDL \leq 1$. Desse modo, torna-se possível ajustes granulares sobre a proporção de feromônio evaporado nas vias.

O valor de LDL (Lower Dispersion Level) pode ser compreendido também como o menor fator de dispersão a aplicado ao feromônio numa determinada execução do PPUMO. Em contrapartida, o valor de UDL (Upper Dispersion Level) corresponde ao maior fator de dispersão

a aplicado ao ao feromônio numa determinada execução do PPUMO. Portanto, necessariamente, $LDL < UDL$.

$$LA = \frac{LDL - UDL}{\max(PHO) - \min(PHO)}(x - \min(PHO)) + UDL \quad (4.4)$$

Para facilitar cálculos probabilísticos na GPU, os custos associados às adjacências foram calculados de acordo com a Equação 4.5. Sendo que, i representa o nó atual avaliado; j representa um nó adjacente a i ; e, k representa a quantidade de nós adjacentes ao nó i .

$$C_{prob}(i, j) = \frac{C_j}{\sum_{k=0}^{L-1} C_k} \quad (4.5)$$

Os custos foram construídos conforme a Equação 4.5 a fim de possibilitar a escolha das adjacências com base em limites de probabilidade na construção das rotas. Tal decisão habilita o PPUMO como uma abordagem metaheurística, pois permite a utilização de aleatoriedade na tomada de decisão (LONES, 2011). A política de decisão com probabilidade funciona como enunciado abaixo:

Seja i e $j \in \mathbb{N}$ a representação numérica para as vias do sistema de tráfego. Seja $0 \leq P_{th} \leq 1$ um valor de limiar de probabilidade para aceitação vias de maior custo. Seja V_r tal que $0 \leq V_r \leq P_{th}$, e representa a probabilidade de aceitar vias adjacentes j . Além disso, pode-se elencar a n -upla $Z = (j_1, j_2, \dots, j_n)$. Como $\forall i \exists Z$ pode-se constituir o par (i, Z) , onde Z contém a vias que são adjacências de i . Os valores de $j_n \in (j_1, j_2, \dots, j_n)$ foram dispostos de modo que, utilizando a Equação 4.5, $C_{prob}(i, j_n) \geq C_{prob}(i, j_{n+1}) \geq C_{prob}(i, j_{n+2})$.

Desse modo, segue que, para a escolha a próxima adjacência, utilizou-se da seguinte condição:

$$Prob = \sum_{k=1}^N C_{prob}(i, j_k), \text{ até que } Prob \geq V_r \quad (4.6)$$

Para $j \in Z \in (i, Z)$ e N igual à quantidade de adjacências da via i . Como $0 \leq P_{th} \leq 1$, $0 \leq V_r \leq P_{th}$, e, conforme a Equação 4.5, $0 \leq C_{i,j}^{prob} \leq 1$, então sempre existirá uma via selecionada.

Para apoiar a compreensão da definição do parágrafo acima, considere os 3 exemplos a seguir, que se refere a decisão de próximo salto durante a execução do PPUMO:

- Caso 1: $P_{th} = 1$, $V_r = 0.2$
- Caso 2: $P_{th} = 1$, $V_r = 0.6$
- Caso 3: $P_{th} = 1$, $V_r = 0.95$

Nos exemplos das Tabela 6 o valor de P_{th} foi mantido igual a 1, sendo assim, o valor de V_r pode assumir qualquer valor de 0 a 1, pois P_{th} é o limite superior do intervalo. Como

é possível constatar também, os valores de $C_{prob}(i, j)$ são utilizados para definir a ordem de visita das adjacências de um nó i . No caso 1 da Tabela 6, como $V_r = 0.2$, a adjacência $j = 2$ será escolhida uma vez que a condição $C_{prob}(i, j) \geq V_r$ é atendida.

Tabela 6 – Casos de teste

j	0	1	2	3
j_k	2	0	1	3
Caso 1 ($C_{prob}(i, j_k)$)	0.4	0.3	0.175	0.125
Caso 2 ($C_{prob}(i, j_k)$)	0.4	0.3	0.175	0.125
Caso 3 ($C_{prob}(i, j_k)$)	0.4	0.3	0.175	0.125

Por outro lado, no caso 2 da Tabela 6, a condição $C_{prob}(i, j) \geq V_r$ não será prontamente atendida. Como consequência, na próxima iteração, como $Prob = C_{prob}(i, 2) + C_{prob}(i, 0)$, $Prob = 0.4 + 0.3 = 0.7$. Logo, a condição $Prob \geq V_r$ será atendida e a adjacência escolhida será $j = 0$.

Por sua vez, no caso 3 da Tabela 6, com $V_r = 0.95$, a execução seguirá o seguinte fluxo:

- Com $k=0$, $C_{prob}(i, 2) = 0.4$ e $Prob = 0.4$ a condição não é atendida, pois $0.4 \leq 0.95$;
- Com $k=1$, $C_{prob}(i, 0) = 0.3$, e $Prob = C_{prob}(i, 2) + C_{prob}(i, 0) = 0.4 + 0.3$, a condição ainda não é atendida, pois $0.7 \leq 0.95$;
- Com $k=2$, $C_{prob}(i, 2) = 0.175$ e $Prob = C_{prob}(i, 2) + C_{prob}(i, 0) + C_{prob}(i, 1) = 0.4 + 0.3 + 0.175 = 0.825$, a condição $Prob \geq V_r$ não é atendida pois $0.825 \leq 0.95$;
- Com $k=3$, $C_{prob}(i, 3) = 0.125$ e $Prob = C_{prob}(i, 2) + C_{prob}(i, 0) + C_{prob}(i, 1) + C_{prob}(i, 3) = 0.4 + 0.3 + 0.175 + 0.125 = 1$ a condição $Prob \geq V_r$ é atendida e a próxima adjacência escolhida será $j = 3$.

Com a abordagem acima busca-se principalmente ampliar o grau de *exploration* (LONES, 2011) do PPUMO em relação a outras abordagens clássicas na tarefa de replanejamento de rotas. Como o custo heurístico também atua sobre a tomada de decisão na seleção de vias, então adotou-se a seguinte função definida por partes para propagar o impacto do limiar de probabilidade:

Seja $0 \leq r \leq 1$. Combinando o valor de custo obtido através da Equação

$$H_{ppumo} = \begin{cases} H(i, j) + C(i, j), & \text{se } P_{th} = 0 \\ (1 - r)H(i, j) + C(i, j), & \text{se } r \leq P_{th} \\ H(i, j) + C(i, j), & \text{se } r > P_{th} \end{cases} \quad (4.7)$$

Sendo que,

$$H(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.8)$$

Onde o par (x_i, y_i) corresponde às coordenadas x e y no ponto central da via i e (x_j, y_j) corresponde às coordenadas x e y no ponto central para a via j .

Em termos práticos, a adoção da Equação 4.7 visa aplicar o efeito da probabilidade também sobre a função heurística, uma vez que caso o valor de $r \leq P_{th}$ o custo heurístico será atenuado em $(1-r)$. Consequentemente, vias que pareceriam mais custosas, figurarão menos custosas pela ação probabilística.

4.2 Arquitetura de Solução

Esta seção destina-se à apresentação de uma possível implementação do PPUMO em um cenário real. Serão elencados elementos tecnológicos e decisões de projeto de software para a implementação do PPUMO no contexto de um ITS. Além disso, serão apontadas em momento oportuno as características do 5G que habilitam a exequibilidade desse projeto. A arquitetura proposta (Figura 21) está segmentada em 3 camadas: A camada 1 responsável pela definição dos limites do mapa que cada GPU será responsável pelo reprocessamento de rotas e a sincronização do custos associados a cada via do sistema de tráfego. O uso de múltiplas GPUs faz-se necessário em virtude dos limites de Processamento e Armazenamento de cada dispositivo, que, apesar de não cobertos pelo escopo deste trabalho, podem ser mensurados visando a eficiência e adequação do balanceamento de carga; a camada 2 será responsável pelo reprocessamento das rotas e execução do PPUMO. Cada GPU será responsável por um conjunto de vias do mapa; na camada 3, haverá a comunicação entre os veículos e a camada que contém as GPU através da infraestrutura de 5G. Além disso, sensores enviarão informações acerca do tempo de viagem de cada via, a fim de compor o cálculo do PPUMO.

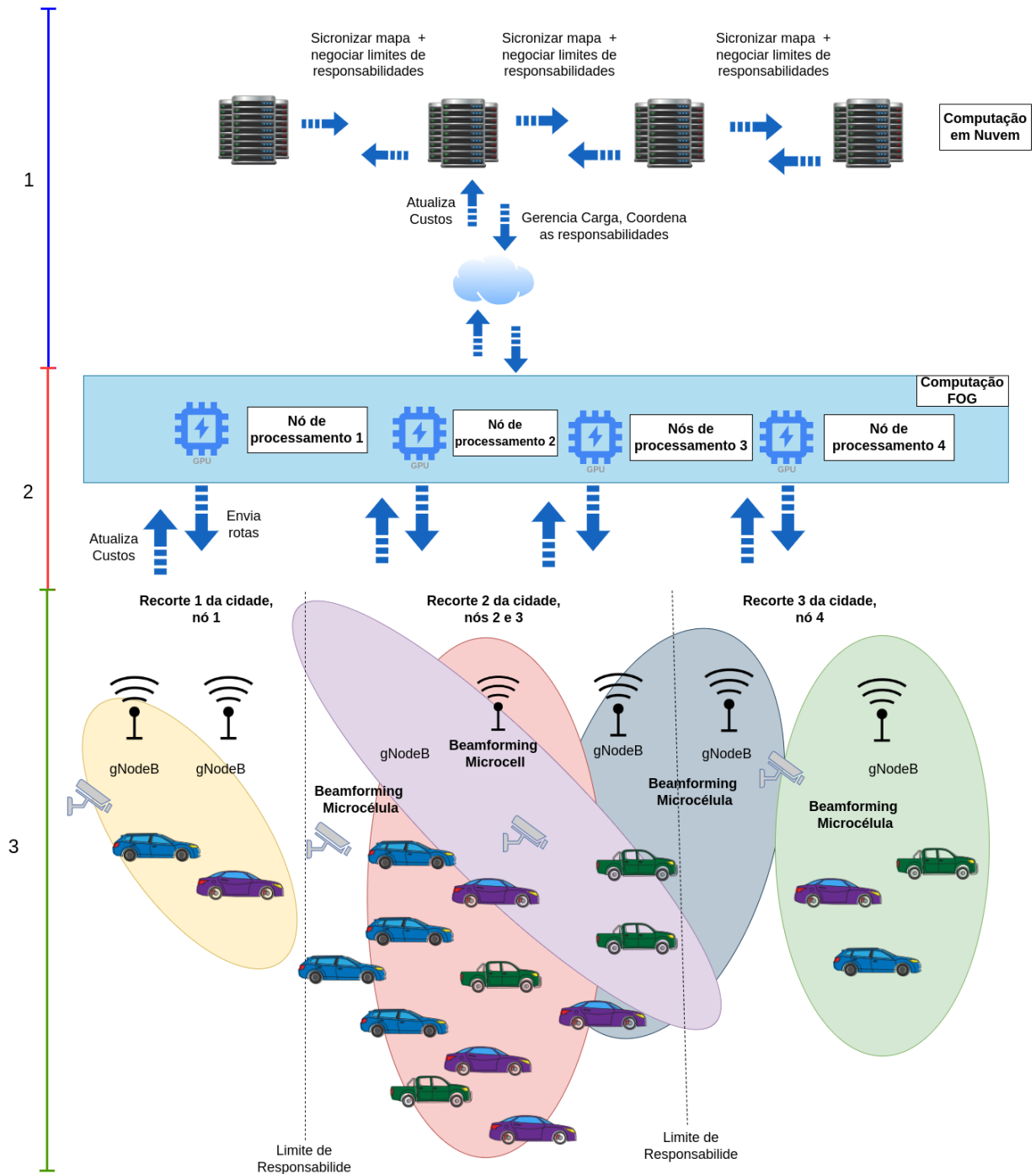


Figura 21 – Arquitetura de Solução utilizando 5G

4.3 Requisitos e Cobertura

Podem ser elencados alguns requisitos sistêmicos para a utilização do PPUMO em cenário real de uma cidade. Abaixo serão apontados alguns deles e, logo em seguida, discutidos alguns meios de como atender os requisitos.

1. Considerando que a entrega de rotas é uma aplicação de tempo real e necessita de baixa latência e elevado throughput, a infraestrutura subjacente deverá atender a estes requisitos

- para a coleta de dados dos sensores e envio das rotas para os condutores ou veículos;
2. Uma vez que a dimensão da cidade e a granularidade da quantidade de vias pode variar bastante de uma cidade para outra, faz-se necessário um mecanismo capaz de sincronizar e decidir acerca dos limites e responsabilidade entre os diversos nós de GPU;
 3. Faz-se necessário conferir tolerância a falhas na comunicação entre os nós de computação que estão em nuvem (parte 1 da Figura 21), uma vez que trata-se de comunicação sujeita a elevadas variações de carga ao longo do dia;
 4. Deve ser possível escalar sob demanda a capacidade de processamento dos nós responsáveis pela sincronização dos mapas e limites, mas também das GPUs, utilizadas para o reprocessamento das rotas;
 5. A aplicação em execução nas camadas 2 e 3 devem ser tolerantes a falhas que impossibilitem a entrega das rotas atualizadas para os veículos;
 6. Faz-se necessário capturar o tempo de viagem em tempo real das vias, para compor o cálculo do PPUMO.

Para cumprir o item 1, o 5G pode ser utilizado uma vez que entrega ultrabaixa latência e elevada taxa de transferência, sobretudo na configuração Standalone, onde há apenas gNodeBs na comunicação entre os veículos ou sensores e as estações base. O item 2 pode ser atendido por meio de estratégia algorítmica que, analisando a carga que as vias estão sujeitas e o percentual de utilização das GPUs, decida os limites de atuação de cada GPU. Para definir tais limites, os valores de latitude e longitude podem ser utilizados. Para cumprir a necessidade do item 2, podem ser utilizados estratégias de filas de mensagens, ou mensageria. Tal mecanismo confere tolerância a falhas, pois as mensagens de sincronização só sairão da fila caso sejam devidamente confirmadas pelo destino. Além disso, com uso da mensageria requisições de diferentes tipos poderão ser processadas de forma assíncrona.

Para cumprir os itens 4 e 5, pode-se lançar mão de tecnologias que escalam a aplicação sob demanda baseada em indicadores como uso de CPU, memória e falhas nas requisições. Faz-se necessário pontuar que as decisões acerca dos limites e carga das vias precisarão estar persistidas em banco de dados e/ou banco em memória, pois, caso a aplicação reinicie, o estado pode ser recuperado através da informação persistida. Por fim, para atender o item 6, podem ser utilizadas APIs públicas tais como ..., ou através da utilização de câmeras capazes de identificar automaticamente a quantidade de veículos numa via. Com o uso do 5G, essa informação poderá ser prontamente enviadas para o gateway da camada 2.

É importante perceber que tanto os nós de processamento da camada 1 quanto os nós GPU da camada 2 podem estar na nuvem, o que facilita o scale in e scale out da infraestrutura para adequação à carga. Contudo, como os nós de reprocessamento enviarão as rotas reprocessadas

para os veículos e informações de posição e velocidade deles, assim como informações de carga das vias; é garantir baixa latência nessas comunicações. Isso pode ser alcançado através de conexões ponto a ponto de baixa latência entre os nós de GPU e as estações base, ou ainda através do provisionamento dos recursos em regiões mais próximas possíveis das cidades sujeitas à estratégia de replanejamento de rotas.

Ainda que pensada sob a perspectiva de uma rede V2I, e não V2V, o 5G poderá habilitar uma série de benefícios para a arquitetura apresentada, se comparado com o uso do padrão IEEE 802.11p. Entre elas pode-se citar: a. A existência de beamforming no 5G poderá ajudar na priorização de sinal para regiões de elevada densidade de clientes; b. O Massive Multiple Inputs Multiple Outputs potencializará a cobertura de sinal para os dispositivos, o que proporcionará conexões com elevado grau de confiabilidade e throughput, além da baixa latência. Este último ponto costuma ser tratado como URLLC, *Ultra Reliable Low Latency Communication*. Conforme apontado em (GARCIA et al., 2021) casos de uso voltados para "Traffic efficiency and environmental friendliness" têm sido desenvolvido pela 5G Automotive Association e incluem informação sobre congestionamento e recomendações de rotas, o que reforça a importância dada ao gerenciamento de tráfego urbano na normatização do 5G.

A partir das referências supracitadas é possível identificar que as limitações apontadas pelo Mapeamento Sistemático, no que tange à integração de aplicações à infraestrutura do 5G, ainda permanecem. Isso porque trabalhos que avaliem de forma conjunta a execução das aplicações juntamente com a infraestrutura do 5G subjacente num cenário mais próximo do real ainda carecem de aprimoramento.

5

Metodologia

Esse capítulo é dedicado a apresentar as ferramentas e métodos adotados durante este trabalho de mestrado. Eles são essenciais para a proposição de soluções, experimentação e análise de resultados. Seguindo resultados contidos na figura 20 do mapeamento sistemático, adotar-se-á neste trabalho o método de experimentos controlado *in virtuo*, isto é, por meio de simulação.

Com o objetivo de avaliar, com relação a métricas de mobilidade urbana e tempo de processamento, a capacidade de melhoria de condições num sistema de tráfego urbano e o tempo de execução de diferentes algoritmos de roteamento no contexto da realização de replanejamento periódicos em todos os veículos ativos em um sistema de tráfego. Por veículo ativo entende-se um veículo que foi inserido no sistema, porém ainda não chegou ao destino.

As métricas de mobilidade urbana, que foram providas pelo SUMO (BEHRISCH et al., 2011), foram: trip duration, tempo médio de viagem; timeloss, "tempo médio perdido devido à condução mais lenta do que o desejado"(DLR, 2021); jams, "quantidade de veículos que não pôde continuar porque não havia espaço na próxima faixa"(DLR, 2021); quantidade de colisões; comprimento médio de rota; yields, "quantidade de vezes que um veículo não conseguiu atravessar um cruzamento onde não tinha prioridade"(DLR, 2021); wrong lanes, "um veículo não pôde se mover porque não pôde continuar sua rota na pista atual e não conseguiu mudar para a pista correta"(DLR, 2021); e, tempo de computação, tempo médio de execução do replanejamento de rotas para os veículos no sistema.

Dessa forma, o experimento controlado comparará as métricas supracitadas para cada um dos tratamentos utilizados, a saber: A Parallel; A* Serial; Dijkstra; sem rerroteamento, quando a rota do veículo é definida inicialmente e segue inalterada até que o veículo chegue ao destino; e o PPUMO, algoritmo escalável proposto por neste trabalho. Os replanejamentos ocorreram a cada 240 steps de simulação, sendo que cada step representando 1 segundo em tempo real. As simulações foram parametrizadas conforme a Tabela 7.

Em todas as simulações foram executadas com 26 repetições a fim de mitigar vieses nos

resultados obtidos. Uma vez que mapa utilizado nas simulações e o tempo de simulação foram os mesmos e a Taxa de Entrada dos Veículos foi variada, a carga a qual o sistema de tráfego foi submetido também variou, pois a quantidade total de veículos inseridos no sistema é dado pelo produto entre o tempo de simulação e a Taxa de Entrada de Veículos. Essa decisão permitiu analisar o comportamento dos algoritmos sob diferentes condições de carga. Além do período de inserção de veículos durar 3600s, conforme a Tabela 7, as simulações foram finalizadas apenas quando todos os veículos chegaram aos destinos. Essa abordagem contribuiu para que os resultados produzidos pelos SUMO fossem mais acurados, uma vez que mais amostras compuseram os valores médios das métricas presentes nos arquivos de saída do SUMO, que foram coletados e analisados por este trabalho. Na Figura 22 é possível visualizar o mapa do centro da cidade de Aracaju que foi utilizado nas simulações.

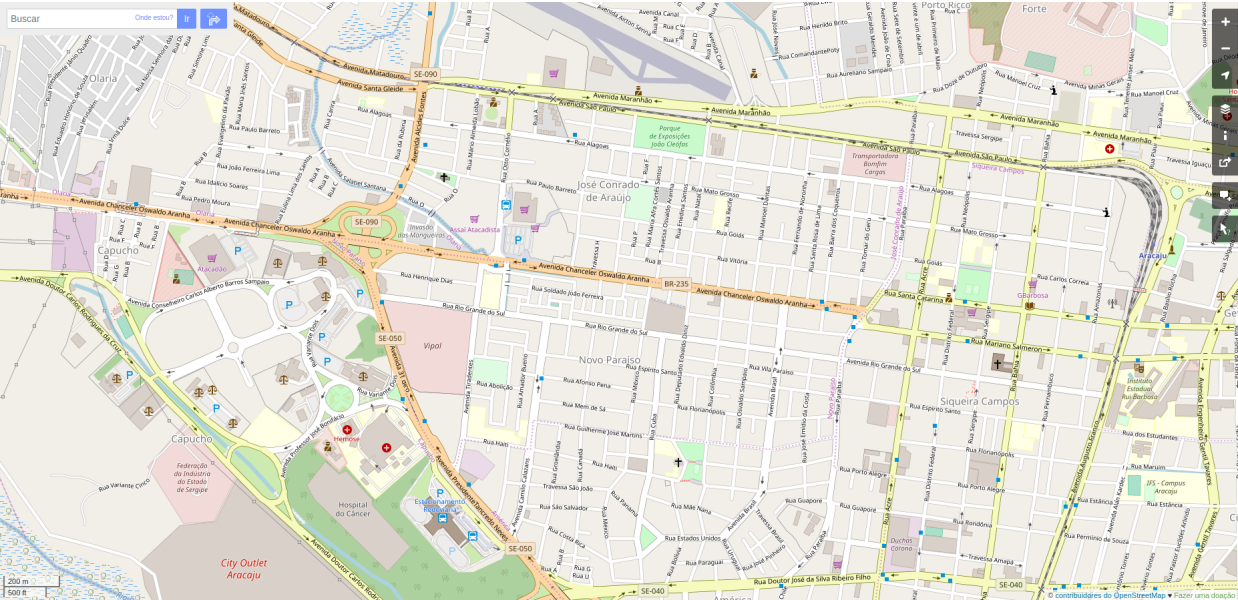


Figura 22 – O mapa do centro da cidade de Aracaju utilizado nas simulações. Fonte: o autor.

Tabela 7 – Cenário de simulação

Parâmetro	Valor
Área do mapa (km^2)	8.2
Número de vias	852
Número de semáforos	19
Número de sementes	26
Quantidade de repetições por semente	1
Duração da simulação (s)	3600
Taxa de entrada de veículos (carros/segundo)	0.50, 0.62, 0.83, 1.25, 2.5

5.1 Seleção de Parâmetros do PPUMO

Conforme é possível identificar nas Equações 4.4 e 4.3 o valores de β , ζ , LDL e UDL são parâmetros do PPUMO. Sendo assim, antes da simulações comparando-o com os demais algoritmos foi necessária uma busca considerando um conjunto finito de possibilidades. Tal busca foi definida da seguinte forma:

$$L = \{0.2, 0.4\}, U = \{0.6, 0.8\}, Z = \{1.2, 0.8, 0.6\}, B = \{0.2, 0.6, 0.8\}$$

Com $S = B \times Z \times L \times U$, de modo que:

$$S = \{(\beta, \zeta, LDL, UDL) \mid \beta \in B, \zeta \in Z, LDL \in L, UDL \in U\}$$

Para a busca dos parâmetros do PPUMO, o cenário utilizado no SUMO seguiu a parametrização da Tabela 8. Ao final desse processo, foram analisadas as medianas das métricas trip duration, timeloss, quantidade de congestionamentos, colisões, comprimento de rota, yields, wrong lanes e computation time e selecionada a parametrização que mostrou-se mais promissora considerando a maioria das métricas. A parametrização escolhida foi: $(\beta, \zeta, LDL, UDL) = (0.6, 0.6, 0.2, 0.8)$.

É importante observar nesta seleção de parâmetros o valor de probabilidade associada ao custo não foi incluído. Uma vez que, nos testes preliminares, não foram obtidos resultados conclusivos a respeito do seu impacto positivo ao negativo sobre as métricas do sistema, o valor do limiar de probabilidade foi mantido em 0. Com isso, as decisões na construção da rota sempre priorizaram as vias cujo custo positivo foi minimizado. Espera-se avaliar o impacto da probabilidade em trabalhos futuros.

Tabela 8 – Cenário de Seleção de Parâmetros do PPUMO

Parâmetro	Valor
Área do mapa (km^2)	8.2
Número de vias	852
Número de semáforos	19
Número de sementes	20
Quantidade de repetições por semente	1
Duração da simulação (s)	3600
Taxa de entrada de veículos (carros/segundo)	2.5

5.2 Preparação do Experimento, Coleta e Integração dos Dados

O Planejamento do Experimento contou com a geração da rede de tráfego, usando o módulo NETCONVERT, a partir de uma mapa gerado no formato Open Street Map. (PAZ, 2022) Em seguida, foi definida a distribuição e quantidade de veículos, assim como os pares de origem e destino utilizando o módulo ACTIVITYGEN. Por fim, a partir dos pares origem-destino, foram definidas rotas à priori para os veículos utilizando o módulo DUAROUTER.

A simulação conjunta do código paralelo com o SUMO foi realizada utilizando a PyCUDA acrescida de alterações no código-fonte do SUMO, para o levantamento da topologia do sistema de tráfego em tempo de simulação. Além disso, a coleta de métricas em tempo de simulação foi realizada por intermédio da API Traci do SUMO para Python. O fluxo experimental contou ainda com a fase de estruturação dos arquivos de saída gerados pelo SUMO ao final das simulações. Para cada simulação foi gerado um arquivo de saída com os valores que serviram como insumo para as análises deste trabalho.

O experimento utilizou uma máquina HPE com 10 GB de RAM e processador Intel Xeon e3-1220 v6, GPU Nvidia Super 1660 com 6 GB de RAM e 1048 CUDA Cores. O sistema operacional utilizado na máquina onde as simulações foram executadas foi o Ubuntu 20.04. As simulações foram conduzidas utilizando o SUMO (Simulation of Urban Mobility) na versão 0.32.0.

Finalmente, para a plotagem dos gráficos e realização dos testes estatísticos, utilizou-se da biblioteca Matplotlib ([HUNTER, 2007](#)) e Scypy ([VIRTANEN et al., 2020](#)), respectivamente. É importante salientar que, para as simulações que analisaram os algoritmos seriais, a etapa de envio de dados para a GPU não foi necessária, uma vez que foram utilizados os algoritmos já implementados no SUMO. A integração entre os estágios pode ser visualizada na Figura 23. É importante salientar que os estágios de 6 a 11 ocorreram de forma repetida até a finalização da simulação.

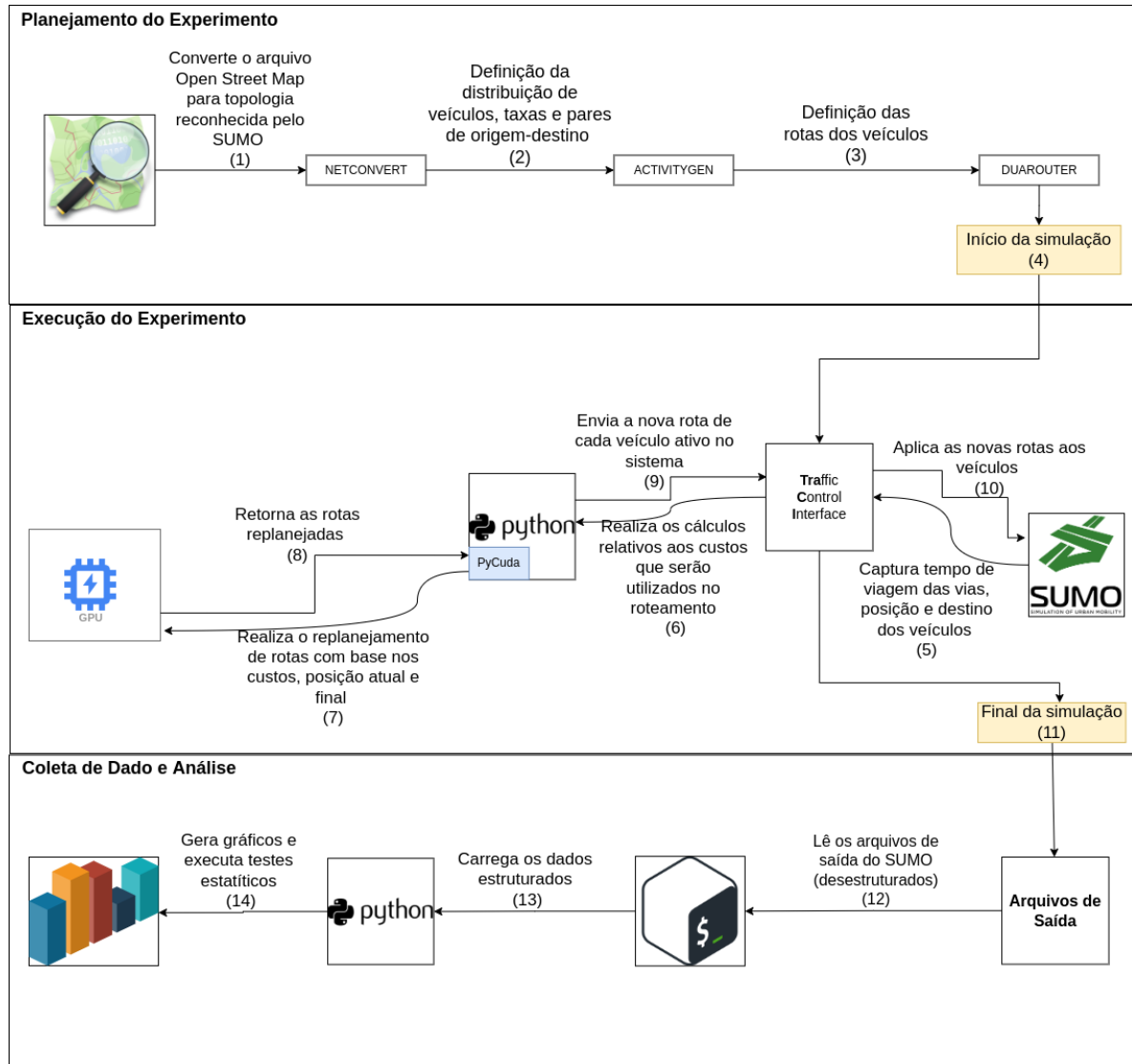


Figura 23 – Estágios do Experimento

5.3 Análise sobre os Dados

No escopo deste trabalho, foram utilizados testes estatísticos em conjunto com a plotagem de gráficos dos resultados. Para todas as métricas foram plotados gráficos contendo o valor médio observado nas métricas e, em alguns casos, para melhor a visualização dos resultados, também foram plotados boxplots.

Nesse contexto, foi aplicado o teste de Wilcoxon ([HOLLANDER; PLEDGER; LIN, 1974](#)), cuja hipótese nula é que as distribuições comparadas são semelhantes, e analisado o *p-value* considerando 95% de confiança estatística em teste unilateral. O teste de hipóteses foi aplicado sobre as distribuições que apresentaram os dois menores valores, em média, nos experimentos. Tais distribuições avaliadas com teste estatístico variaram conforme a métrica e tratamentos analisados, uma vez que foram experimentados diversas métricas e tratamentos (i.e. PPUMO, Dijkstra Serial, A* Serial, A* Paralelo e sem roteamento) neste trabalho.

A aplicação do teste pareado e não paramétrico deu-se em virtude do conjunto amostral limitado, de 26 amostras para as métricas de mobilidade; e, a correlação intrínseca uma vez que as sementes utilizadas pelo experimento, o cenário de simulação e o hardware subjacente foram os mesmos para todos os tratamentos. Uma vez que trata-se de um teste não-paramétrico, nas comparações em que lançaram do teste de hipótese, o valor das medianas foram comparados, em detrimento da média.

6

Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados do PPUMO em comparação aos algoritmos A* Paralelo, A* Serial e Dijkstra, além do caso base, sem replanejamento de rota. As métricas foram distribuídas em subseções distintas onde serão exploradas com a aplicação dos métodos de análise descritos anteriormente.

6.1 Comprimento da Rota

Conforme é possível visualizar na Figura 24, o PPUMO apresentou comprimentos de rota sensivelmente menores quando comparado aos tratamentos com replanejamento, sobretudo sob a taxa de 2.5 carros/segundo. Para taxas menores ou iguais a 0.83 o PPUMO foi capaz de gerar as menores rotas, em média. A máxima diferença percentual em relação à média chegou a 32.4% na taxa 2.5 carros/segundo e 27% sob a taxa 1.25 carros/segundo. Cabe salientar que os replanejamentos sucessivos foram realizados a cada 240 steps de simulação, sendo que cada step simula 1 segundo em tempo de relógio.

As diferenças entre os resultados com relação ao comprimento de rota entre o A* Paralelo e o A* Serial, que podem ser vistas na Figura 24, podem ser explicadas pela forma de envio serial ou paralelo das rotas aos veículos. Como o A* paralelo retorna mais rapidamente as rotas replanejadas, pois o replanejamento ocorre em lote, elas são adotadas com maior brevidade pelos veículos e, conseqüentemente, passam a influenciar mais rapidamente no sistema de tráfego. Em contrapartida, o algoritmo serial replaneja veículo a veículo, como é característico em implementações seriais.

Ainda pode ser constatado através da Figura 24 que o Dijkstra, apesar de ser um algoritmo ótimo, não apresentou resultados menores do que o PPUMO em nenhuma das taxas de entrada. Esse fenômeno pode ser justificado através do mesmo argumento utilizado na comparação entre o A* Serial e o A* Paralelo, contudo é necessário considerar também o impacto do intervalo

de replanejamento (240 steps de simulação) e a duração das simulações sobre a otimalidade do Dijkstra. Considerando que as simulações com maior taxa de entrada demoraram mais a finalizar, pois mais carros precisaram chegar aos seus destinos, pode-se observar que conforme o tempo de convergência da simulação reduziu, os valores médios do Dijkstra aproximaram-se dos demais tratamentos.

Para todas as taxas, o PPUMO e a abordagem sem replanejamento de rotas diferenciaram-se estatisticamente com 95% de confiança, uma vez que o teste de Wilcoxon apresentou p-value $< 8.29.10^{-6}$. Sob as taxas 2.5 e 1.25 (i.e., condições de tráfego mais pesadas) a abordagem sem replanejamento apresentou menor mediana do comprimento de rota e o PPUMO ocupou a segunda posição. Contudo, para valores de taxa menores ou iguais a 0.83 (i.e., condições de tráfego mais leves) o PPUMO exibiu menor mediana e diferenciou-se com o mesmo nível de confiança estatística em relação à segunda melhor abordagem. É importante perceber também a robustez do algoritmo com relação a essa métrica, uma vez que, tanto para baixas quanto para cargas elevadas do sistema de tráfego, ele consegue registrar resultados próximos ou menores do que aqueles do roteamento à priori.

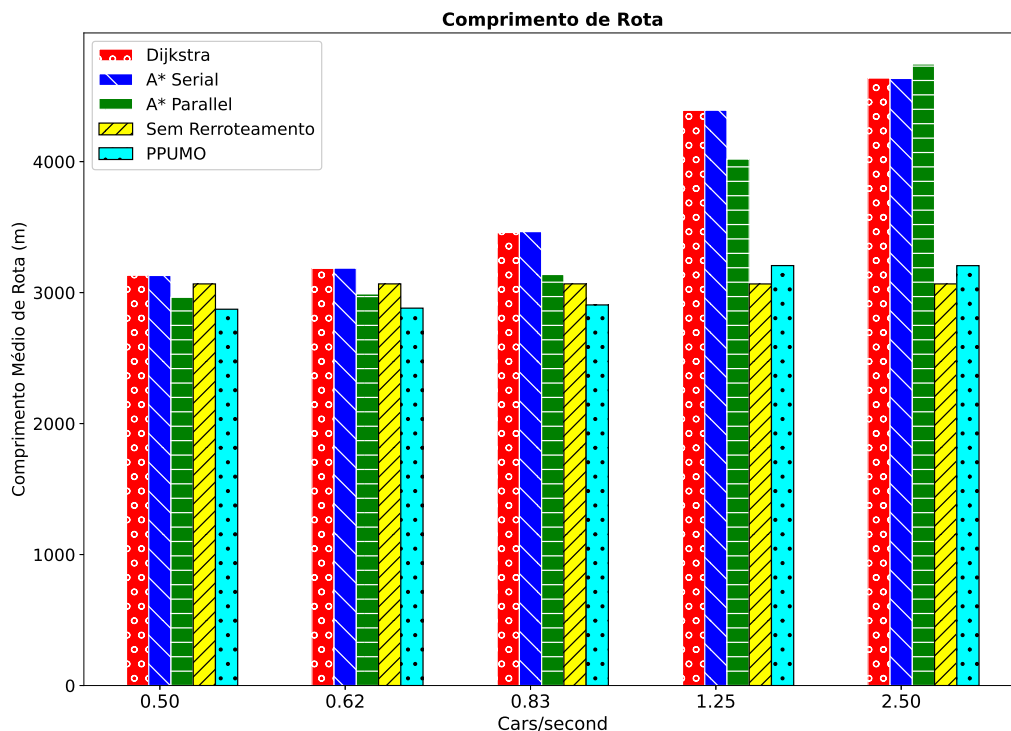


Figura 24 – Comprimento de Rota

6.2 Congestionamentos

Conforme a definição para a métrica Jam no capítulo anterior, pode-se compreender que se trata da impossibilidade de um carro continuar o trajeto devido a ocorrência de um congestionamento. Pode ser observado na Figura 25, o PPUMO foi capaz de reduzir o ocorrência de Jams de cerca de 12 mil para menos de quatro mil, quando comparado à abordagem sem replanejamento de rotas, sob a taxa de 2.5 carros/segundo no sistema de tráfego. Para a carga de 1.25 carros/segundo a diferença também foi sugestiva: 96.3%. As abordagens seriais também obtiveram resultados menores se comparados à ausência de replanejamento, contudo bastante distantes dos tratamentos com computação paralela.

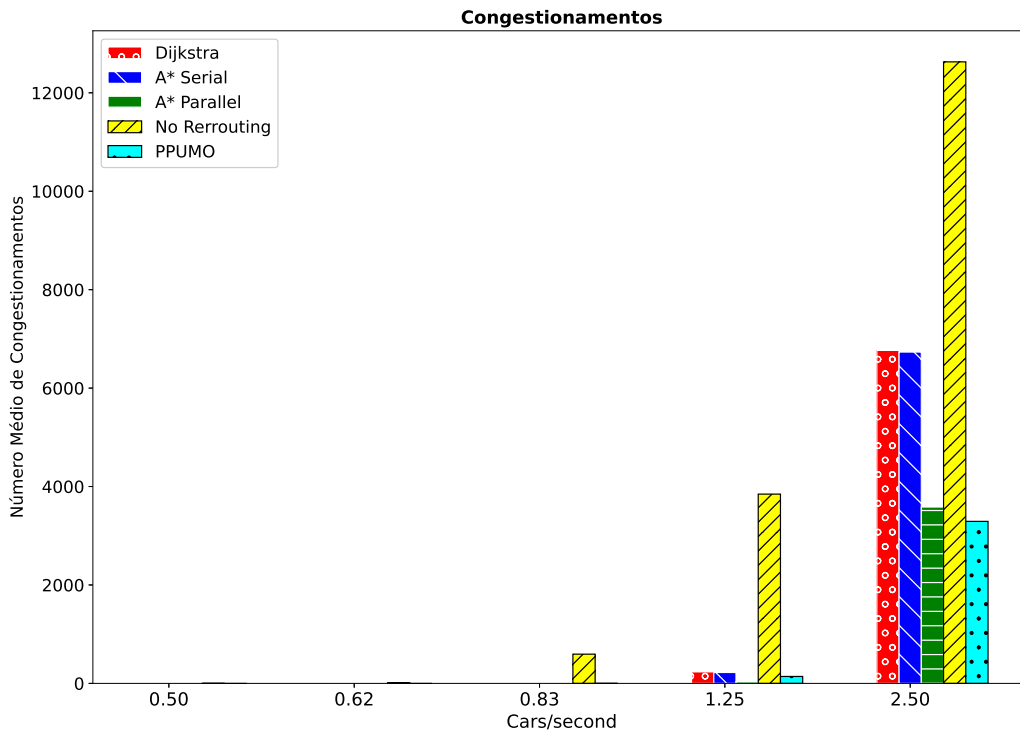


Figura 25 – Congestionamentos

Analisando especificamente os algoritmos A* Paralelo e PPUMO, foi possível evidenciar diferença estatística sob as taxas 2.5 e 1.25 carros/segundo, pois, quando aplicado o teste de Wilcoxon, o p -value foi de 0.002 e $9.3 \cdot 10^{-6}$, respectivamente. Consequentemente, a hipótese nula não foi aceita em ambos os cenários, com 95% de confiança. Portanto, o PPUMO apresentou melhor desempenho do que o A* paralelo com respeito à métrica Jam quando a taxa foi de 2.5 carros/segundo, o inverso ocorreu para a taxa 1.25 carros/segundo, considerando a mediana como critério de diferenciação (ver Figura 26). Para as demais taxas, que tratam de condições de tráfego mais leves e portanto naturalmente quase sem congestionamentos, não observou-se diferença estatística significativa apesar de ambos, PPUMO e A* Paralelo, figurarem com os

melhores resultados, como visto na Figura 26.

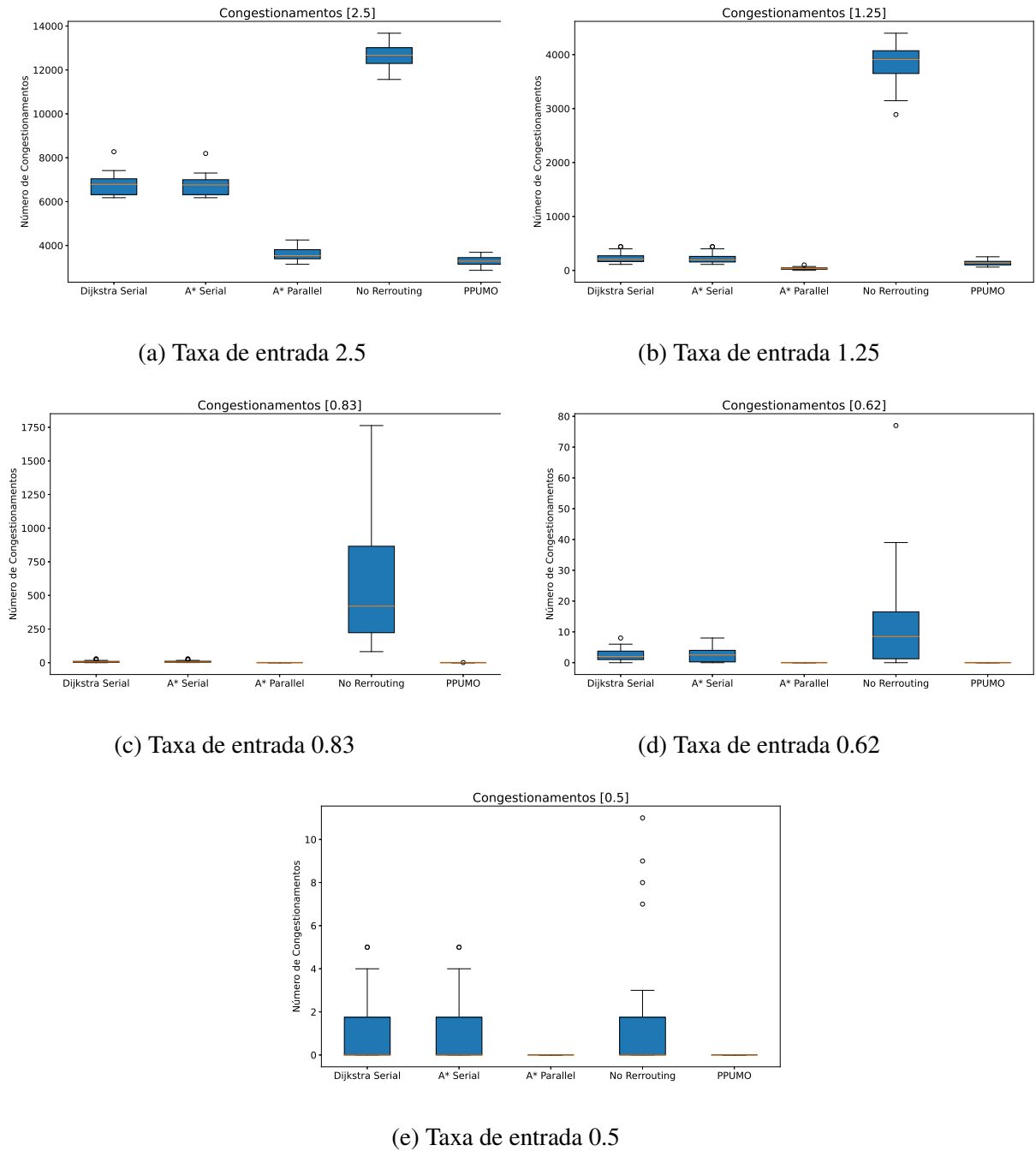


Figura 26 – Boxplots para o número de congestionamentos para cada taxa de entrada.

6.3 Duração de Viagem

Para a métrica Trip Duration, observa-se através da Figura 27 que o PPUMO apresentou valor médio em torno de 6000 segundos para a maior carga do sistema. Enquanto isso, sob a mesma condição de carga, os demais tratamentos exibiram valores médios próximos ou superiores a 8000 segundos. A diferença percentual média chegou a 28% quando comparado o PPUMO à

abordagem sem replanejamento sob a taxa 2.5 carros/segundo. Para as taxas de entrada 1.25 e 0.83 carros por segundo as diferenças entre o PPUMO e a abordagem sem replanejamento foram de 77.6% e 84.9%, respectivamente.

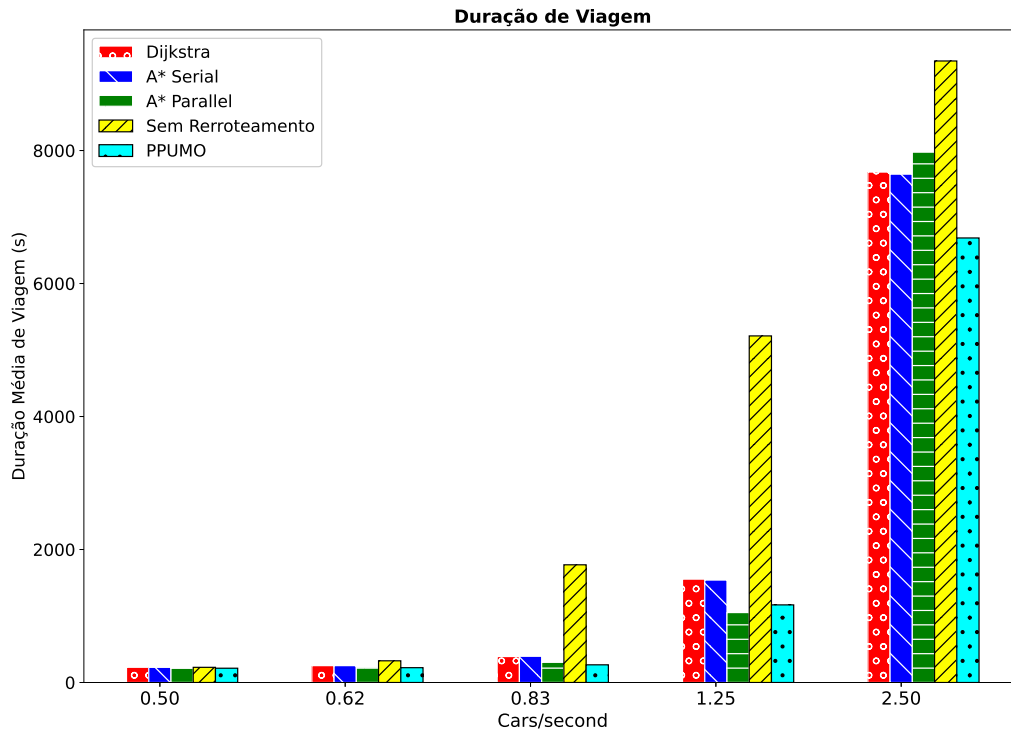


Figura 27 – Tempo de Viagem

O teste de Wilcoxon aplicado entre PPUMO e o A* Paralelo evidenciaram que com $p\text{-value} \leq 0.01$ a hipótese nula foi rejeitada em todas as taxas de entrada. Além disso, apenas na taxa 1.25 carros/segundo o A* Paralelo apresentou menor mediana, nas demais condições o PPUMO demonstrou ser a melhor escolha. (Figura 28).

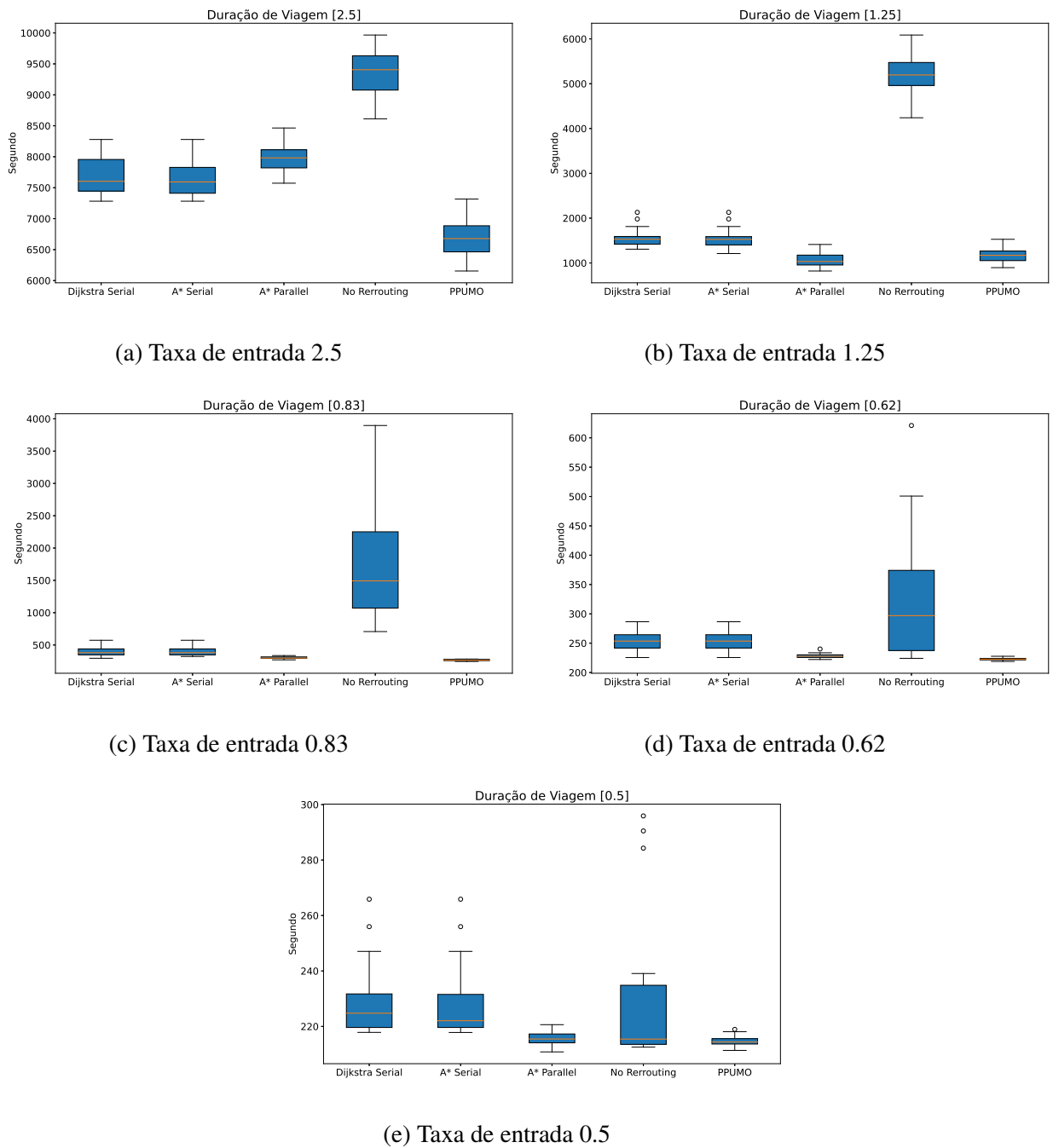


Figura 28 – Boxplots de Duração de Viagem para cada taxa de entrada

6.4 Tempo Perdido

A partir da Figura 29, é possível identificar uma redução considerável em relação ao Tempo Perdido, comparando o resultado do PPUMO aos demais tratamentos na taxa de 2.5 carros/segundo. A redução percentual chegou a 28.5% quando comparado o PPUMO à abordagem de roteamento à priori. Para as taxas 1.25 e 0.83 carros/segundo, a diferença percentual entre o PPUMO e a abordagem sem replanejamentos chegou a 79.6% e a 93.7%, respectivamente.

Para as duas cargas sucessivamente menores (0.65 e 0.50), embora a diferença entre

a abordagem sem rerroteamento e as soluções com replanejamento continue significativa, os algoritmos apresentaram resultados próximos. O PPUMO e o A* Paralelo quando submetidos ao teste de Wilcoxon apresentaram $p\text{-value} \leq 0.0022$. Sendo assim, a hipótese nula foi rejeitada com 95% de confiança. O A* Paralelo apresentou menor mediana para a taxa 1.25, enquanto que, para as demais taxas a menor mediana pertenceu ao PPUMO.

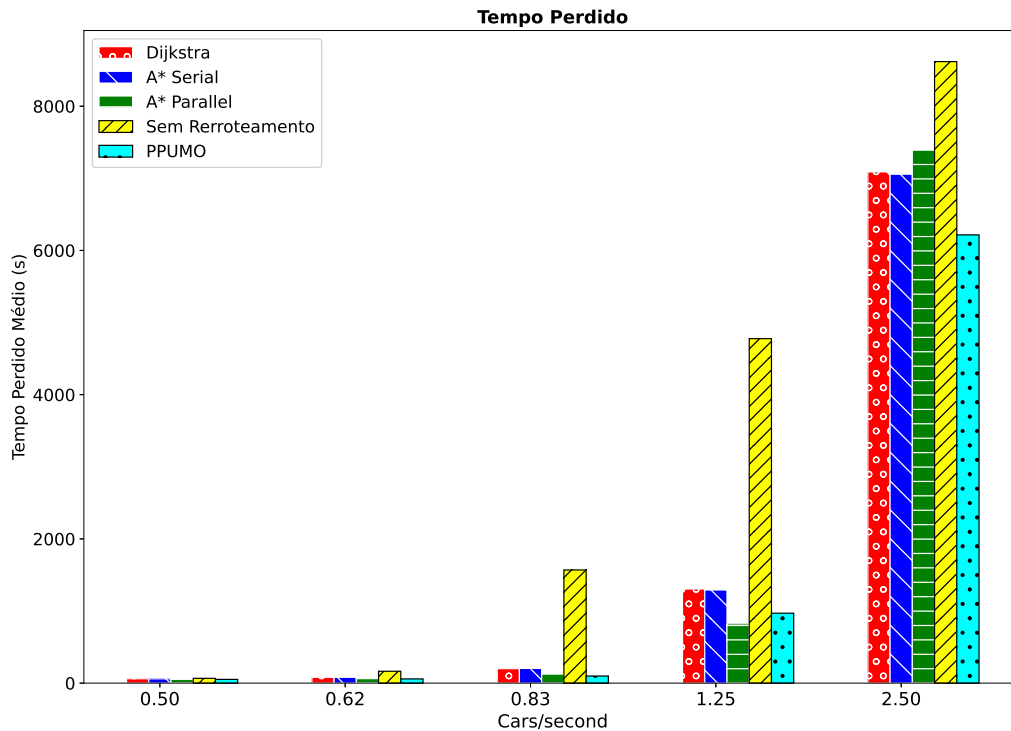


Figura 29 – Tempo Perdido

6.5 Tempo de Computação

Por sua vez, em relação à métrica tempo de computação, foi possível constatar diferenças significativas entre os tratamentos paralelos e seriais, como esperado devido à organização e utilização de hardware serem distintas entre CPU e GPU. A abordagem sem replanejamento não foi apresentada no gráfico da Figura 30, pois não demandou replanejamentos em tempo de simulação. É importante salientar a escala logarítmica foi adotada para o gráfico da Figura 30. Nota-se por meio dela que os resultados dos algoritmos seriais tiveram um tempo de execução cerca de 10000 vezes maior se comparados aos resultados algoritmos paralelos.

Comparativamente, o PPUMO e o A* paralelo apresentaram resultados na mesma ordem de grandeza. Porém, aplicado o teste de Wilcoxon aos dados identificou-se diferença estatística para todas as taxas de entrada de veículos, pois a hipótese nula foi fortemente rejeitada ($p\text{-value} \leq 1.28 \cdot 10^{-42}$). Graficamente, (Figura 30) é possível perceber que o PPUMO apresentou valores

médios maiores do que o A* paralelo. Adicionalmente, analisando esses valores foi possível identificar que a diferença percentual entre os tempos de computação do PPUMO e do A* Paralelo não ultrapassou 29%. Na Tabela 9 é possível visualizar os valores medianos do A* Paralelo e PPUMO para cada das taxas de entrada avaliadas.

Cabe ressaltar a redução no tempo de execução comparando valores obtidos com o uso do PPUMO e o algoritmo PTPR, proposto em (HO et al., 2019), com relação à métrica tempo de computação. Vê-se que para o PTPR o menor tempo médio de roteamento para 1 veículo foi de 0.0345 segundo. Por outro lado, o PPUMO registrou um tempo médio em torno de 10^{-4} segundo para reprocessar rotas de todos os veículos presentes na simulação no momento dos reprocessamentos. Ainda que o tempo médio do PPUMO por veículo fosse 10^{-4} , quando aplicada a uma carga de 10 mil carros, por exemplo, o tempo para gerar as rotas seria de 1 segundo. Por outro lado, quando aplicado o PTPR a esta mesma carga o tempo de processamento baseado na média individual seria de 5.75 minutos. Ainda que a comparação acima seja limitada devido a possíveis diferenças de hardware, quantidade de repetições e cenário de simulação, é possível ter uma ideia da diferença das duas implementações.

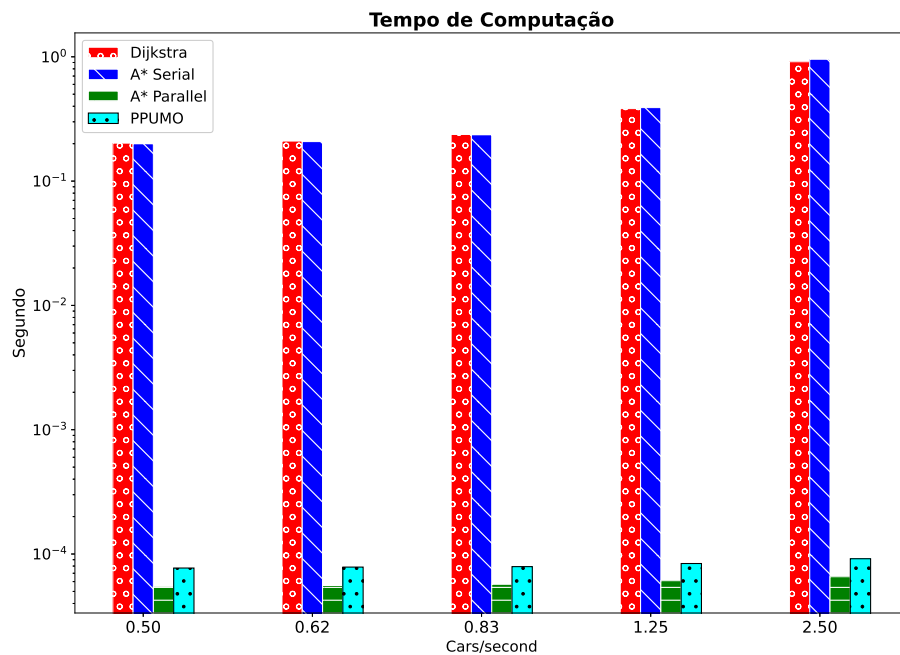


Figura 30 – Tempo de Computação

Tabela 9 – Valores de mediana do PPUMO e A* Paralelo para cada taxa de entrada.

Algoritmo/Período	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
PPUMO	$9.49 \cdot 10^{-5}$	$7.92 \cdot 10^{-5}$	$7.61 \cdot 10^{-5}$	$7.41 \cdot 10^{-5}$	$7.39 \cdot 10^{-5}$
A* Paralelo	$6.65 \cdot 10^{-5}$	$5.84 \cdot 10^{-5}$	$5.29 \cdot 10^{-5}$	$5.08 \cdot 10^{-5}$	$4.96 \cdot 10^{-5}$

6.6 Colisões

Com relação à métrica colisões, pode-se constatar através da Figura 31 que a abordagem sem replanejamento de rotas apresentou quantidade nula de colisões em todas as simulações. Isso deve-se principalmente devido ao fato dos veículos não sofrerem alterações no trajeto previamente estipulado, um cenário replicável apenas em ambiente controlado. Os algoritmos seriais apresentaram menor valor médio de colisões nas simulações em relação aos paralelos. Adicionalmente, o PPUMO chegou a apresentar valor médio correspondente à metade do que foi coletado para o A* Paralelo no período 2.5. Para este resultado é importante levar em consideração o percentual de ocorrência dessas colisões, pois sob a taxa de 2.5 carros/segundo, por exemplo, foram identificadas 6 ocorrências de colisões para o PPUMO, em média. Adotando uma relação simplificada da quantidade de acidentes e o tamanho da população de Aracaju (estimada em cerca de 673 mil habitantes em 2021 (IBGE, 2022)), tem-se um percentual de $\frac{6}{675000} \approx 8.10^{-4}\%$.

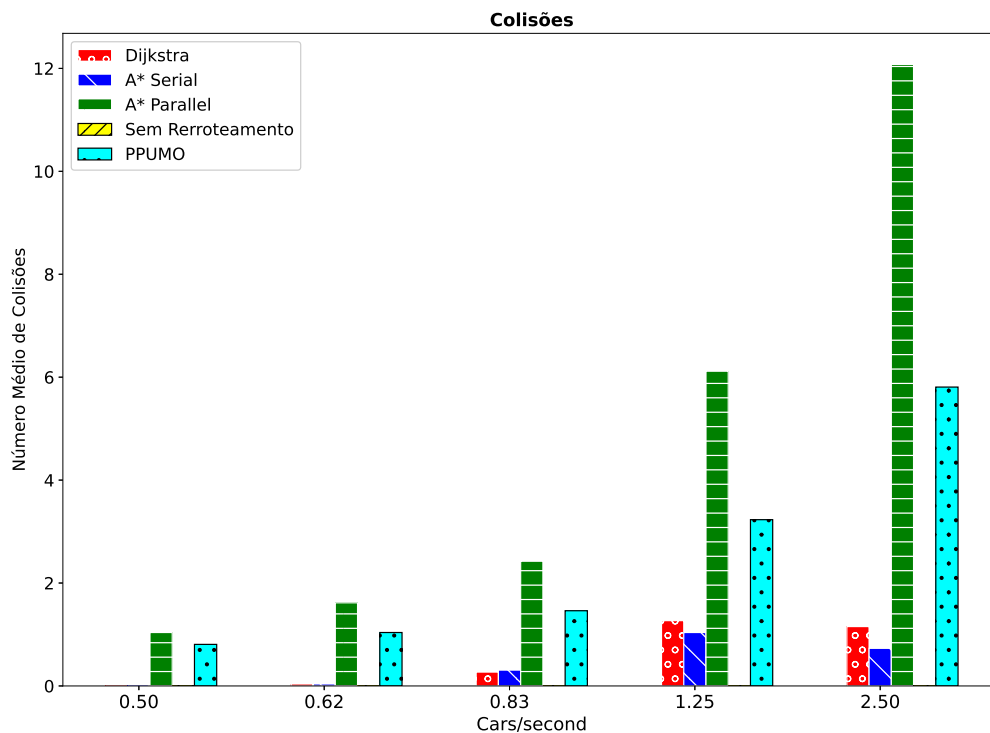


Figura 31 – Colisões

Quando aplicado o teste de Wilcoxon o $p\text{-value} \leq 0.004$, sendo assim a hipótese nula foi rejeitada com 95% de confiança. Sendo assim, o PPUMO e o A* Paralelo diferenciaram-se nas taxas de 2.5, 1.25 e 0.83 carros/segundo e as menores medianas estiveram com o PPUMO. Dijkstra e o A* Serial mostraram-se estatisticamente iguais uma vez que $p\text{-value} \geq 0.1$, por conseguinte a hipótese nula não foi rejeitada com 95% de confiança.

6.7 Vias Incorretas

Com relação à quantidade de Wrong Lanes, pode-se observar no gráfico da Figura 32 que para a abordagem sem replanejamento de rotas foi contabilizada uma quantidade menor de ocorrências de Wrong Lanes. Isso certamente deve-se ao fato dos veículos da simulação seguirem criteriosamente as rotas predefinidas ou que priorizem uma quantidade menor de mudanças entre faixas. Por outro lado, devido aos roteamentos sucessivos, os tratamentos que contaram com o replanejamento de rotas sofreram um aumento do valor médio de ocorrências de wrong lanes sob a taxa 2.5 carros por segundo. Nesse contexto, dentre os tratamentos com replanejamento, o PPUMO foi o que apresentou menor valor médio de Wrong Lanes. A diferença percentual média do PPUMO sob a taxa de 2.5 carros/segundo em relação às outras abordagens com replanejamento chegou a 34.6%, quando comparado ao A* Paralelo.

Para as taxas 1.25 e 0.83 carros/segundo, o roteamento à priori exibiu piores resultados em relação a média. A diferença percentual média nesse caso foi de 76.6% e 99.5%, respectivamente, quando comparado ao PPUMO.

Estatisticamente, a abordagem sem replanejamentos e o PPUMO, sob taxa 2.5 carros/segundo, quando submetidas ao teste de Wilcoxon exibiu p-value igual a 8.2910^{-6} , consequentemente, a hipótese nula foi rejeitada com 95% de confiança. Para a taxa de 1.25 o PPUMO e o A* Paralelo obtiveram a menor mediana de Wrong Lanes e mostraram-se estatisticamente semelhantes uma vez que o teste de Wilcoxon exibiu um p-value de 0.077, portanto a hipótese nula não foi rejeitada. Para as demais taxas também, quando comparados o PPUMO e o A* Paralelo, não houve diferenciação estatisticamente significativa sob 95% de confiança, isto é, eles empataram com os melhores resultados.

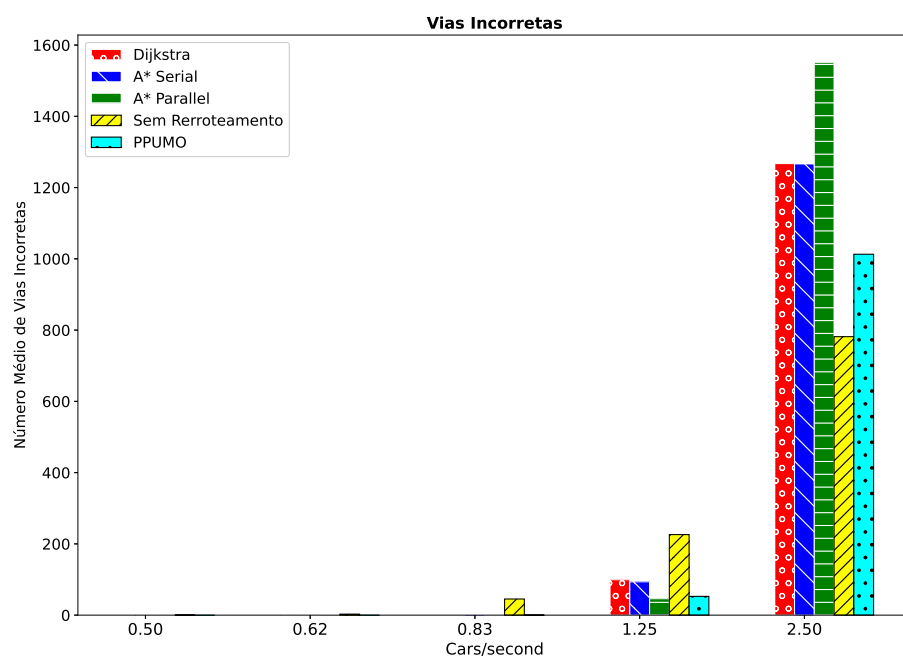


Figura 32 – Vias Incorretas.

7

Considerações

A mobilidade urbana influencia de maneira significativa o fluxo de pessoas, mercadorias, serviços nas cidades. De modo que cidades com elevado índice de mobilidade reduzem perdas econômicas e aumentam a qualidade de vida dos habitantes. Sendo assim, métodos que utilizem de forma mais eficiente os recursos viários das cidades fazem-se necessários, a fim de reduzir congestionamentos, tempo de viagem, comprimentos de rotas e grandezas de mobilidade associadas. Nesse contexto, a utilização de algoritmos de replanejamento de rota podem ser utilizados, porém esbarram no elevado custo computacional associado quanto maior for a quantidade de vias e veículos considerando no cálculo das rotas. Diante desses elementos, este trabalho propôs um algoritmo de computação paralela e baseado em feromônio, o PPUMO, cujos resultados experimentais foram expostos e comparados neste trabalho.

Com base nos resultados elencados neste trabalho foi possível identificar que o Parallel Pheromone-based Urban Mobility Optimization (PPUMO) foi capaz de produzir os melhores resultados dentre os tratamentos analisados com relação às métricas Timeloss (redução de 27.8% com relação ao pior caso, em média); Trip Duration (redução de 28.4% com relação ao pior caso, em média); Jams (redução de 73.9% com relação ao pior caso, em média) para condições de elevada carga no sistema, 2.5 carros/segundo.

Além disso, Foi possível constatar ainda que o PPUMO chegou a apresentar um tempo replanejamento de rotas 10000 vezes menor se comparado aos algoritmos seriais. Com respeito a Wrong Lanes foi capaz de produzir uma redução de até de 34.6%, em média, com relação aos demais tratamentos com replanejamento. Especialmente com relação ao tempo de viagem dos veículos, o PPUMO apresentou-se como a melhor escolha uma vez que diferenciou-se estatisticamente e apresentou menor mediana em 4 das 5 condições de carga avaliadas, dentre todos os algoritmos experimentados. Finalmente, foi possível elucidar também que o PPUMO produziu rotas menores quando comparado às demais abordagens com replanejamento periódico, ou próximo das menores quando comparado aos cenários com roteamento à priori.

No desenvolvimento deste trabalho alguns fatores atuaram para que os esforços de pesquisa fossem redirecionados. Pode-se citar, por exemplo, a ausência de um modelo para simulação de 5G *open-source* e que comportasse a simulação de redes veiculares até meados de abril de 2021, quando foi publicado o modelo e código-fonte do Simu5G (NARDINI et al., 2020). Antes desse momento, foi tentada a adaptação do Simu4G para atender às necessidades desse trabalho. Contudo, o custo das alterações necessárias e o tempo estimado para conclusão da atividade mostraram-se inviáveis. Conforme apontado em outro ponto deste trabalho, a adoção do 5G no Brasil ainda encontrava-se em fase inicial no quarto trimestre de 2021, consequentemente o acesso à tecnologia 5G para a realização de experimentos ou provas de conceito no âmbito de SIT não foi possível. Nesse contexto, o replanejamento de rotas utilizando abordagem meta-heurística e a computação paralela passaram a ser endereçados de forma prioritária. Como resultado associado a essa pesquisa pode-se evidenciar a publicação do artigo (PAZ et al., 2022).

Pode-se elencar algumas perspectivas futuras para este trabalho, a saber: a aplicação de técnicas mais sofisticadas de otimização para a busca de parametrizações ao PPUMO, que adequem os resultados dos replanejamentos às condições de carga do sistema e métricas desejadas em proporções predefinidas; aprofundamento na validação da arquitetura de roteamento veicular proposta (Figura 21), principalmente com relação à quantidade de vias e veículos que podem ser reprocessados por cada GPU; a avaliação o comportamento de outras funções na fase de dispersão de feromônio (Equação 4.4) aplicadas ao PPUMO; a adição de métricas associadas à emissões de gases poluentes tendo em vista a pegada ecológica associada aos sistemas de tráfego nas cidades; integração do sistema de tráfego urbano à simulador de rede 5G veicular, coleta e análise de métricas de rede; a construção de uma prova de conceito da solução arquitetural proposta neste trabalho.

Referências

3GPP. *3GPP Release 12 Overview*. 2021. <<https://www.3gpp.org/specifications/releases/68-release-12>>. Accessed: 2021-06-30. Citado na página 21.

3GPP. *3GPP Release 14 Overview*. 2021. <<https://www.3gpp.org/release-14>>. Accessed: 2021-06-30. Citado na página 20.

ABBAS, F.; FAN, P. Clustering-based reliable low-latency routing scheme using aco method for vehicular networks. *Vehicular Communications*, Elsevier, v. 12, p. 66–74, 2018. Citado na página 29.

AFAQ, M. et al. Towards 5g network slicing for vehicular ad-hoc networks: An end-to-end approach. *Computer Communications*, Elsevier, v. 149, p. 252–258, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

AHMAD, I. et al. Vanet-lte based heterogeneous vehicular clustering for driving assistance and route planning applications. *Computer Networks*, Elsevier, v. 145, p. 128–140, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

AHMED, B. et al. Services and simulation frameworks for vehicular cloud computing: a contemporary survey. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Springer, v. 2019, n. 1, p. 1–21, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

ALATTAS, K. A. A hybrid routing protocol based on bio-inspired methods in a mobile ad hoc network. *IJCSNS*, v. 21, n. 1, p. 207, 2021. Citado na página 25.

ALAZZAWI, S. et al. Simulating the impact of shared, autonomous vehicles on urban mobility-a case study of milan. *EPiC Series in Engineering*, EasyChair, v. 2, p. 94–110, 2018. Citado na página 25.

ALGAMAL, Z. Y. et al. High-dimensional qsar/qspr classification modeling based on improving pigeon optimization algorithm. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Elsevier, v. 206, p. 104170, 2020. Citado na página 28.

ALI, R. et al. Simulation based vehicle to vehicle and base station communication. In: IEEE. *2019 International Conference on Information Science and Communication Technology (ICISCT)*. [S.l.], 2019. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

AMADEO, M. et al. Fog computing in iot smart environments via named data networking: A study on service orchestration mechanisms. *Future internet*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 11, p. 222, 2019. Citado na página 13.

ARAMRATTANA, M. et al. Testing cooperative intelligent transport systems in distributed simulators. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Elsevier, v. 65, p. 206–216, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

BEHRISCH, M. et al. Sumo-simulation of urban mobility: an overview. In: THINKMIND. *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. [S.l.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 62.

- BITAGHSIR, S. A.; KHONSARI, A. Modeling and improving the throughput of vehicular networks using cache enabled rsus. *Telecommunication Systems*, Springer, v. 70, n. 3, p. 391–404, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- BUVANA, M.; MUTHUMAYIL, K.; JAYASANKAR, T. Content-based image retrieval based on hybrid feature extraction and feature selection technique pigeon inspired based optimization. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, p. 424–443, 2021. Citado na página 28.
- CAMPOLO, C. et al. Full duplex-aided sensing and scheduling in cellular-v2x mode 4. In: *Proceedings of the 1st ACM MobiHoc Workshop on Technologies, mOdelS, and Protocols for Cooperative Connected Cars*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 19–24. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- CHANG, B.-J.; LIANG, Y.-H.; HUANG, Y.-D. Adaptive message forwarding for avoiding broadcast storm and guaranteeing delay in active safe driving vanet. *Wireless Networks*, Springer, v. 21, n. 3, p. 739–756, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- CINTRA, M. Os custos dos congestionamentos na cidade de são paulo. 2014. Citado na página 14.
- CIOROAICA, E. et al. Simulation methods and tools for collaborative embedded systems: with focus on the automotive smart ecosystems. *SICS Software-Intensive Cyber-Physical Systems*, Springer, v. 34, n. 4, p. 213–223, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- DAMERI, R. P. Searching for smart city definition: a comprehensive proposal. *International Journal of computers & technology*, v. 11, n. 5, p. 2544–2551, 2013. Citado na página 13.
- DAVIS, N. et al. Congestion costs incurred on indian roads: A case study for new delhi. *arXiv preprint arXiv:1708.08984*, 2017. Citado na página 13.
- DELACRE, M. et al. Taking parametric assumptions seriously: Arguments for the use of welch’s f-test instead of the classical f-test in one-way anova. *International Review of Social Psychology*, Ubiquity Press, v. 32, n. 1, 2019. Citado na página 31.
- DENG, Z.; CAI, Z.; LIANG, M. A multi-hop vanets-assisted offloading strategy in vehicular mobile edge computing. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 53062–53071, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- DESIGN, H. What is a heuristic? *Artificial Intelligence*, 2017. Citado na página 29.
- DIMITRAKOPOULOS, G. Sustainable mobility leveraging on 5g mobile communication infrastructures in the context of smart city operations. *Evolving Systems*, Springer, v. 8, n. 2, p. 157–166, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- DJILALI, Y. D. et al. Performances evaluation study of vanet communication technologies for smart and autonomous vehicles. In: *IEEE. 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. [S.l.], 2018. p. 79–84. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 41.
- DLR. *SUMO, Simulation of Urban Mobility*. 2019. <<http://sumo.dlr.de>>. Accessed: 2019-01-11. Citado na página 25.
- DLR. *Aggregated Traffic Measures*. 2021. <<https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Output/index.html>>. Accessed: 08-22-2022. Citado na página 62.

DONG, P. et al. Enhancing vehicular communication using 5g-enabled smart collaborative networking. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 24, n. 6, p. 72–79, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

DORIGO, M. Optimization, learning and natural algorithms [ph. d. thesis]. *Politecnico di Milano, Italy*, 1992. Citado na página 28.

EICHLER, S. Performance evaluation of the ieee 802.11 p wave communication standard. In: IEEE. *2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference*. [S.l.], 2007. p. 2199–2203. Citado na página 14.

EL-ATTY, S. M. A.; GHARSSELDIEN, Z. M. Performance analysis of an advanced heterogeneous mobile network architecture with multiple small cell layers. *Wireless Networks*, Springer, v. 23, n. 4, p. 1169–1190, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

FALBO, R. de A. Mapeamento sistemático. *Retrieved October*, v. 7, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 34.

FERREIRA, I. S. E. Uma arquitetura para planejamento de rotas veiculares em cidades inteligentes. Pós-Graduação em Ciência da Computação, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 51.

FU, B. et al. An improved a* algorithm for the industrial robot path planning with high success rate and short length. *Robotics and Autonomous Systems*, Elsevier, v. 106, p. 26–37, 2018. Citado na página 29.

GANDOMI, A. H.; ALAVI, A. H. Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm. *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, Elsevier, v. 17, n. 12, p. 4831–4845, 2012. Citado na página 30.

GANDOMI, A. H. et al. Metaheuristic algorithms in modeling and optimization. *Metaheuristic applications in structures and infrastructures*, Elsevier Oxford, p. 1–24, 2013. Citado na página 30.

GARCIA, M. H. C. et al. A tutorial on 5g nr v2x communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 23, n. 3, p. 1972–2026, 2021. Citado na página 61.

GARROCHO, C. T.; SILVA, M. J. da; OLIVEIRA, R. A. D2d pervasive communication system with out-of-band control autonomous to 5g networks. *Wireless Networks*, Springer, v. 26, n. 1, p. 373–386, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

GERALD, B. A brief review of independent, dependent and one sample t-test. *International Journal of Applied Mathematics and Theoretical Physics*, Science Publishing Group, v. 4, n. 2, p. 50–54, 2018. Citado na página 32.

GHOLIBEIGI, M. et al. Reliable vehicular broadcast using 5g device-to-device communication. In: IEEE. *2017 10th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*. [S.l.], 2017. p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

GHOSH, A. 5g new radio (nr): physical layer overview and performance. In: *Proc. IEEE Commun. Theory Workshop*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–38. Citado na página 20.

- GIFFINGER, R.; GUDRUN, H. Smart cities ranking: an effective instrument for the positioning of the cities? *ACE: architecture, city and environment*, Centre de Política del Sòl i Valoracions-Universitat Politècnica de Catalunya, v. 4, n. 12, p. 7–26, 2010. Citado na página 13.
- HAYES, M.; OMAR, T. End to end vanet/iot communications a 5g smart cities case study approach. In: IEEE. *2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*. [S.l.], 2019. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- HEO, J. et al. Performance-cost tradeoff of using mobile roadside units for v2x communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 68, n. 9, p. 9049–9059, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- HIRAKATA, V. N.; MANCUSO, A. C. B.; CASTRO, S. M. d. J. Teste de hipóteses: perguntas que você sempre quis fazer, mas nunca teve coragem. *Teste de hipóteses: perguntas que você sempre quis fazer, mas nunca teve coragem. Vol. 39, n. 2, 2019, p. 181-185*, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- HO, M. C. et al. An improved pheromone-based vehicle rerouting system to reduce traffic congestion. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 84, p. 105702, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 48, 50, 51 e 75.
- HOLLANDER, M.; PLEDGER, G.; LIN, P.-E. Robustness of the wilcoxon test to a certain dependency between samples. *The Annals of Statistics*, Institute of Mathematical Statistics, v. 2, n. 1, p. 177–181, 1974. Citado na página 66.
- HU, J. et al. Link level performance comparison between lte v2x and dsrc. *Journal of Communications and Information Networks*, Springer, v. 2, n. 2, p. 101–112, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- HU, W. et al. Live synthesis of vehicle-sourced data over 4g lte. In: *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 161–170. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, IEEE COMPUTER SOC, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007. Citado na página 65.
- IBGE, I. B. d. G. e. E. *Quadro de informações sobre a cidade de Aracaju-SE*. (Access date: 11.03.2022), 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/se/aracaju.html>>. Citado na página 76.
- IEEE. *802.11p Task Group*. 2020. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgp_update.htm?info=EXLINK>. Accessed: 2020-06-30. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 45.
- INRIX. *INRIX Global Traffic Scorecard*. 2022. <<https://inrix.com/scorecard-city/?city=S%C3%A3o%20Paulo&index=78>>. Accessed: 2022-08-20. Citado na página 14.
- ISMAGILOVA, E. et al. Smart cities: Advances in research—an information systems perspective. *International Journal of Information Management*, Elsevier, v. 47, p. 88–100, 2019. Citado na página 13.
- KIM, T. K. T test as a parametric statistic. *Korean journal of anesthesiology*, Korean Society of Anesthesiologists, v. 68, n. 6, p. 540, 2015. Citado na página 31.

- KOH, S. S. et al. Reinforcement learning for vehicle route optimization in sumo. In: IEEE. *2018 IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*. [S.l.], 2018. p. 1468–1473. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 51.
- KONATOWSKI, S.; PAWŁOWSKI, P. Application of the aco algorithm for uav path planning. *Przegląd Elektrotechniczny*, v. 95, n. 7, p. 115–118, 2019. Citado na página 29.
- KUMAR, V. D. et al. Performance analysis of hybrid wimax/dsrc scenarios for vehicular communication environment. *Microsystem Technologies*, Springer, v. 23, n. 9, p. 4231–4236, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- KURUVATTI, N. P.; MUTABAZI, H. M.; SCHOTTEN, H. D. Exploiting mobility context awareness in cellular networks for assisting vehicular use cases. In: IEEE. *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. [S.l.], 2018. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- LAMB, Z. W.; AGRAWAL, D. P. Analysis of mobile edge computing for vehicular networks. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 6, p. 1303, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- LIN, Y.-W.; HSIAO, Y.-K.; YEH, Z.-S. A new mobility management scheme for intelligent transportation systems. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 96, n. 2, p. 3081–3112, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- LIU, L. et al. Vehicular edge computing and networking: A survey. *Mobile Networks and Applications*, Springer, p. 1–24, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 7, 19 e 20.
- LONES, M. *Sean luke: essentials of metaheuristics*. [S.l.]: Springer, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 29, 30, 54, 56 e 57.
- LOPEZ, P. A. et al. Microscopic traffic simulation using sumo. In: *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, 2018. Disponível em: <<https://elib.dlr.de/124092/>>. Citado na página 25.
- LUO, G. et al. Cooperative vehicular content distribution in edge computing assisted 5g-vanet. *China Communications*, IEEE, v. 15, n. 7, p. 1–17, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- MACFARLANE, J. When apps rule the road: The proliferation of navigation apps is causing traffic chaos. it's time to restore order. *IEEE Spectrum*, IEEE, v. 56, n. 10, p. 22–27, 2019. Citado na página 15.
- MADKOUR, A. et al. A survey of shortest-path algorithms. *arXiv preprint arXiv:1705.02044*, 2017. Citado na página 29.
- MCLEOD, S. What a p-value tells you about statistical significance. *Simply psychology*, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 33.
- MOLINA-MASEGOSA, R.; GOZALVEZ, J. System level evaluation of lte-v2v mode 4 communications and its distributed scheduling. In: IEEE. *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.], 2017. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

- MOLINA-MASEGOSA, R.; GOZALVEZ, J.; SEPULCRE, M. Configuration of the c-v2x mode 4 sidelink pc5 interface for vehicular communication. In: IEEE. *2018 14th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN)*. [S.l.], 2018. p. 43–48. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- NARDINI, G. et al. Simu5g: a system-level simulator for 5g networks. In: INSTICC. *SIMULTECH 2020*. [S.l.], 2020. p. 68–80. Citado 4 vezes nas páginas 7, 21, 26 e 80.
- NAZARAHARI, M.; KHANMIRZA, E.; DOOSTIE, S. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 115, p. 106–120, 2019. Citado na página 29.
- OLADIMEJI, M. O.; TURKEY, M.; DUDLEY, S. Hach: Heuristic algorithm for clustering hierarchy protocol in wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 55, p. 452–461, 2017. Citado na página 29.
- OMNET++. *Omnet What is Omnet++?* 2020. <<https://omnetpp.org/intro/>>. Accessed: 2021-06-06. Citado na página 26.
- OOKLA. *Ookla Growing and Slowing: The State of 5G Worldwide in 2021*. 2021. <<https://www.ookla.com/articles/state-of-worldwide-5g-2021>>. Accessed: 09-24-2022. Citado 5 vezes nas páginas 7, 21, 22, 23 e 24.
- ORTÚZAR, J. d. D. Sustainable urban mobility: What can be done to achieve it? *Journal of the Indian institute of science*, Springer, v. 99, n. 4, p. 683–693, 2019. Citado na página 14.
- OSABA, E.; YANG, X.-S.; SER, J. D. Is the vehicle routing problem dead? an overview through bioinspired perspective and a prospect of opportunities. *Nature-Inspired Computation in Navigation and Routing Problems*, Springer, p. 57–84, 2020. Citado na página 25.
- PAZ, F. A. *PPUMO Simulation Scenario*. 2022. <https://drive.google.com/drive/folders/1wxBVYWoOP0u_IEEjTxjaYrAl6TF8pY-I?usp=sharing>. Accessed: 08.20.2022. Citado na página 64.
- PAZ, F. A. et al. Improving urban mobility with vehicular routing: A parallel approach. In: SPRINGER. *International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. [S.l.], 2022. p. 341–352. Citado 3 vezes nas páginas 49, 51 e 80.
- PETERSEN, K.; VAKKALANKA, S.; KUZNIARZ, L. Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. *Information and Software Technology*, Elsevier, v. 64, p. 1–18, 2015. Citado na página 35.
- PETROV, T.; DADO, M.; AMBROSCH, K. E. Computer modelling of cooperative intelligent transportation systems. *Procedia engineering*, Elsevier, v. 192, p. 683–688, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- QURESHI, K. N.; ABDULLAH, A. H. A survey on intelligent transportation systems. *Middle-East Journal of Scientific Research*, v. 15, n. 5, p. 629–642, 2013. Citado na página 18.
- RADDO, T. R. et al. An end-to-end 5g automotive ecosystem for autonomous driving vehicles. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Broadband Access Communication Technologies XIV*. [S.l.], 2020. v. 11307, p. 1130705. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

RAJÉ, F.; TIGHT, M.; POPE, F. D. Traffic pollution: A search for solutions for a city like nairobi. *Cities*, Elsevier, v. 82, p. 100–107, 2018. Citado na página 13.

RAVIGLIONE, F.; MALINVERNO, M.; CASETTI, C. Characterization and performance evaluation of ieee 802.11 p nics. In: *Proceedings of the 1st ACM MobiHoc Workshop on Technologies, Models, and Protocols for Cooperative Connected Cars*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 13–18. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

RAZA, N. et al. Social vehicle-to-everything (v2x) communication model for intelligent transportation systems based on 5g scenario. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

REIS, E. A. *Métodos Estatísticos Avançados em Epidemiologia - UFMG*. 2021. Disponível em: <<http://www.est.ufmg.br/~edna/mae/MAE-Aula03.pdf>>. Acesso em: 25 mai. 2021. Citado na página 32.

SANCHEZ-IBORRA, R. et al. Empowering the internet of vehicles with multi-rat 5g network slicing. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 14, p. 3107, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

SANTINI, S. et al. Platooning maneuvers in vehicular networks: a distributed and consensus-based approach. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, IEEE, v. 4, n. 1, p. 59–72, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

SCHOLLIERS, J. et al. Co-operative traffic solutions for hybrid communication environments. *Transportation Research Procedia*, Elsevier, v. 14, p. 4542–4551, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

SCHRANK, D. et al. Urban mobility report 2019. Texas Transportation Institute, 2019. Citado na página 14.

SHAH, G. S.; BATH, R. S.; EGERTON, S. A comparative study on efficient path finding algorithms for route planning in smart vehicular networks. *International Journal of Computer Networks and Applications*, v. 7, n. 5, p. 157–166, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 51.

SKOUFAS, K.; SPYROU, E. D.; MITRAKOS, D. Low cost v2x traffic lights and vehicles communication solution for dynamic routing. In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Telecommunications and Remote Sensing*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 56–65. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

SOLTANI, N.; SOLEIMANI, B.; BAREKATAIN, B. Heuristic algorithms for task scheduling in cloud computing: A survey. *International Journal of Computer Network & Information Security*, v. 9, n. 8, 2017. Citado na página 29.

SONG, R.; LIU, Y.; BUCKNALL, R. Smoothed a* algorithm for practical unmanned surface vehicle path planning. *Applied Ocean Research*, Elsevier, v. 83, p. 9–20, 2019. Citado na página 29.

SOON, K. L.; LIM, J. M.-Y.; PARTHIBAN, R. Coordinated traffic light control in cooperative green vehicle routing for pheromone-based multi-agent systems. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 81, p. 105486, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 48, 50 e 51.

- SOON, K. L. et al. Proactive eco-friendly pheromone-based green vehicle routing for multi-agent systems. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 121, p. 324–337, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 51.
- SOUZA, A. M. D. et al. Traffic management systems: A classification, review, challenges, and future perspectives. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 13, n. 4, p. 1550147716683612, 2017. Citado na página 18.
- STORCK, C. R.; DUARTE-FIGUEIREDO, F. A 5g v2x ecosystem providing internet of vehicles. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 3, p. 550, 2019. Citado na página 14.
- SUMALEE, A.; HO, H. W. Smarter and more connected: Future intelligent transportation system. *Iatss Research*, Elsevier, v. 42, n. 2, p. 67–71, 2018. Citado na página 14.
- VARGA, A.; HORNIG, R. An overview of the omnet++ simulation environment. In: *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–10. Citado na página 26.
- VEINS. *veins Veins homepage*. 2020. <<https://veins.car2x.org/>>. Accessed: 2021-06-06. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 27.
- VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, v. 17, p. 261–272, 2020. Citado na página 65.
- WANG, X.; MAO, S.; GONG, M. X. An overview of 3gpp cellular vehicle-to-everything standards. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, ACM New York, NY, USA, v. 21, n. 3, p. 19–25, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 8, 14, 22, 38, 39 e 45.
- WENDLAND, P.; SCHAEFER, G.; THOMÄ, R. An application-oriented evaluation of lte-v's mode 4 for v2v communication. In: *Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 165–173. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- XIA, F. et al. Modeling and analysis of large-scale urban mobility for green transportation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 14, n. 4, p. 1469–1481, 2017. Citado na página 25.
- XU, H.; PU, P.; DUAN, F. Dynamic vehicle routing problems with enhanced ant colony optimization. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Hindawi, v. 2018, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 29.
- YANG, X.-S. Engineering optimizations via nature-inspired virtual bee algorithms. In: SPRINGER. *International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*. [S.l.], 2005. p. 317–323. Citado na página 30.
- YANG, X.-S. Firefly algorithms for multimodal optimization. In: SPRINGER. *International symposium on stochastic algorithms*. [S.l.], 2009. p. 169–178. Citado na página 30.
- YANG, X.-S. Bat algorithm for multi-objective optimisation. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, Inderscience Publishers, v. 3, n. 5, p. 267–274, 2011. Citado na página 30.

YUAN, W. et al. Distributed estimation framework for beyond 5g intelligent vehicular networks. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, IEEE, v. 1, p. 190–214, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

ZHONG, Y. et al. Discrete pigeon-inspired optimization algorithm with metropolis acceptance criterion for large-scale traveling salesman problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, Elsevier, v. 48, p. 134–144, 2019. Citado na página 28.