



IMPACTO DA INTEGRAÇÃO DE VEÍCULO COMPARTILHADO  
AUTÔNOMO NO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO POR METRÔ  
EM BRASÍLIA

AMANDA BASILIO ROMANO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**IMPACTO DA INTEGRAÇÃO DE VEÍCULO  
COMPARTILHADO AUTÔNOMO NO SISTEMA DE  
TRANSPORTE PÚBLICO POR METRÔ EM BRASÍLIA**

**AMANDA BASILIO ROMANO**

**ORIENTADOR: PASTOR WILLY GONZALES TACO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES**

**PUBLICAÇÃO: T.DM-005/2021  
BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2021**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**IMPACTO DA INTEGRAÇÃO DE VEÍCULO  
COMPARTILHADO AUTÔNOMO NO SISTEMA DE  
TRANSPORTE PÚBLICO POR METRÔ EM BRASÍLIA**

**AMANDA BASILIO ROMANO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TRANSPORTES.**

**APROVADA POR:**

---

**PASTOR WILLY GONZALES TACO, DR. (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**MICHELLE ANDRADE, DRa. UnB  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MÁRCIA DE ANDRADE PEREIRA BERNARDINIS, DRa. (UFPR)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 29 do novembro de 2021.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

ROMANO, AMANDA BASILIO	
Impacto da integração de veículo compartilhado autônomo no sistema de transporte público por metrô em Brasília [Distrito Federal] 2021.	
xii, 127p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2021).	
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Veículos Autônomos	2. Veículos compartilhados
3. Veículos elétricos	4. Simulação de tráfego
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ROMANO, A. B. (2021). Impacto da integração de veículo compartilhado autônomo no sistema de transporte público por metrô em Brasília, Publicação T.DM-005/2021, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 125p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Amanda Basilio Romano.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Impacto da integração de veículo compartilhado autônomo no sistema de transporte público por metrô em Brasília

GRAU: Mestre ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Amanda Basilio Romano  
amandaromano27@gmail.com

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, por me dar força para superar as dificuldades, me permitindo chegar neste momento e concluir mais uma etapa na minha vida.

Agradeço a minha família, especialmente meus pais, Renato e Lúcia, e meus irmãos Fernanda, Rafael e Tiago por todo apoio que me deram e sempre estarem ao meu lado.

Ao Professor Pastor Willy Gonzales Taco, meu orientador e mentor desde a graduação, pela paciência e dedicação em me orientar neste trabalho, mas principalmente por todos conhecimentos e ensinamentos que me foi dado durante estes anos. Também a todos os professores do PPGT por seus ensinamentos, e também a secretaria do PPGT, em especial a Camila que sempre estava disposta a me ajudar em todas etapas do Mestrado.

E também agradeço a todos amigos que conseguir direta ou indiretamente por causa do Mestrado, em especial Daniela, Jefferson, Rauenya, Mariana, Ayo e Pedro pelas parcerias, trabalhos e congressos.

À Capes e à UnB, por terem financiado parte desse sonho.

## RESUMO

Com o desenvolvimento da tecnologia de Veículos Autônomos (VAs) deve-se estudar como será a sua implantação no futuro, em que pode-se gerar diversos resultados, podendo desde aumentar o número de veículos nas vias urbanas, gerando mais congestionamentos, até uma contribuição para a formação de cidades sustentáveis, recuperando espaço urbano, com menos veículos nas vias. Para que esta segunda opção ocorra, se faz necessário que os VAs façam parte do sistema da mobilidade urbana reforçando a rede de transporte público. Assim, esta dissertação tem como objetivo avaliar os impactos econômicos e ambientais da implantação de transporte público com veículo compartilhado na primeira e última milha de um sistema metroviário, fornecendo um serviço de transporte de porta-a-porta. O método desenvolvido utiliza-se de simulação por cenários considerando duas situações. A situação inicial sem integração (cenário base) com viagens em veículos convencionais e a situação compartilhada (cenários compartilhados) substituindo viagens em veículos convencionais por viagens em veículos compartilhados integrados na primeira e última milha em estações do metrô da área de estudo. Os novos cenários (cenários compartilhados) estão compostos por frotas de veículos compartilhados (VC), veículos compartilhados elétricos (VCE), veículos compartilhados autônomos (VCA) e veículos compartilhados autônomos elétricos (VCAE). O método possibilita a análise e comparação das emissões e os custos de viagens dos usuários no cenário base e cenários compartilhados. Para a delimitação da área de estudo foi escolhido para origem e destino das viagens às zonas que se encontram nas áreas de influência de 5, 10 e 15 minutos de estação de transporte público por metrô em diferentes regiões do Distrito Federal, Brasil. O *software* SUMO (*Simulation of Urban MObility*) foi utilizado no processo de simulação. Os dados da rede viária foram extraídos do *OpenStreetMap* e os dados da matriz Origem/destino da Pesquisa de Mobilidade Urbana do Distrito Federal (PMU/DF). Para análise do cálculo das emissões, foram considerados os gases dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos (HC), e material particulado (MP). Nota-se significativa redução das emissões nos cenários com uso de veículos compartilhados nas viagens com origem nas zonas de 10 e 15 minutos, ao comparar com o cenário base, principalmente com o uso de veículos elétricos. Já em relação aos custos de viagens, são considerados os tempos de espera, tempo de viagem, tempo de caminhada e custos monetários envolvendo a viagem. Para os cálculos dos custos de viagem foi considerado duas hipóteses, a primeira com a integração entre metrô e veículo compartilhado custando o valor da passagem de metrô sem acréscimos, e a segunda tendo uma projeção de aumento de 50%. Observou-se que os custos de viagem dos cenários com veículos compartilhados são menores que os custos do cenário base. Porém os custos de viagem são menores nas simulações com a origem sendo as zonas de 5 minutos do que nas simulações com as zonas de 15 minutos, ou seja, com o aumento de usuários no sistema integrado, os custos de viagem aumentam, devido ao aumento do tempo de espera pelo veículo compartilhado. Em relação ao aumento de viagens por metrô, observou-se que o maior incremento no número de viagens ocorre com a implantação de uma frota de 250 VCA na estação de origem que levam as pessoas da origem até a estação, e uma frota de 500 VCA nas estações de destino, com um aumento de 2,47% das viagens por metrô.

**Palavras-chave:** Veículos Autônomos; Veículos compartilhados; Veículos elétricos; simulação de tráfego.

## ABSTRACT

With the development of Automated Vehicles (AVs) technology, it is necessary to study how it will be implemented in the future, in which different results can be generated, ranging from increasing the number of vehicles on urban roads, generating more congestion, to a contribution for the formation of sustainable cities, recovering urban space, with fewer vehicles on the roads. For this second option to occur, it is necessary that AVs are part of the urban mobility system, reinforcing the public transport network. Thus, this dissertation aims to assess the economic and environmental impacts of the implementation of public transport with shared vehicle (SV) in the first and last mile of a subway system, providing a door-to-door transport service. The method developed uses scenario simulation considering two situations. The initial situation without integration (base scenario) with trips in conventional vehicles and the shared situation (shared scenarios) replacing trips in conventional vehicles by trips in shared vehicles integrated in the first and last mile of train stations in the study area. The new scenarios (shared scenarios) are composed of fleets of shared vehicles (SVs), shared electric vehicles (SEVs), shared autonomous vehicles (SAVs) and shared autonomous electric vehicle (SAEVs). The method makes it possible to analyze and compare emissions and user travel costs in the base scenario and shared scenarios. For the delimitation of the study area, it was chosen for the origin and destination of trips to the zones that are in the influence areas of 5, 10 and 15 minutes of public transport train stations in different regions of the Federal District (*Distrito Federal-DF*), Brazil. SUMO (Simulation of Urban Mobility) software was used in the simulation process. The road network data were extracted from OpenStreetMap and the data from the Origin/destination matrix of the Urban Mobility Survey of the Federal District (PMU/DF). To analyze the calculation of emissions, the gases carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), hydrocarbons (HC), and particulate matter (PM) were considered. There is a significant reduction in emissions in the scenarios with the use of shared vehicles on trips originating in the 10- and 15-minute zones, when compared to the base scenario, especially with the use of electric vehicles. Regarding travel costs, waiting times, travel time, walking time and monetary costs involving the trip are considered. For the calculation of travel costs, two hypotheses were considered, the first with the integration between train and shared vehicle costing the value of the subway ticket without additions, and the second with a 50% increase. It was observed that the travel costs of scenarios with shared vehicles are lower than the costs of the base scenario. However, travel costs are lower in simulations with the origin being the 5-minute zones than in simulations with 15-minute zones, that is, with the increase of users in the integrated system, travel costs increase due to the increase the waiting time for the shared vehicle. In relation to the increase in train trips, it was observed that the biggest increase in the number of trips occurs with the implementation of a fleet of 250 VAC at the origin station, which takes people from origin to the station, and a fleet of 500 VCA at destination stations, with an increase of 2.47% in train trips.

**Keywords:** Automated Vehicles; Shared vehicles; Electric vehicles; Traffic simulation.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. APRESENTAÇÃO	1
1.2. DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA	4
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1. Objetivo Geral	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. JUSTIFICATIVA	6
1.5. ETAPAS METODOLÓGICAS DA DISSERTAÇÃO	7
1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>9</b>
2.1. APRESENTAÇÃO	9
2.2. DEFINIÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS	9
2.3. REVISÃO DE ESTUDOS SOBRE OS VEÍCULOS AUTÔNOMOS	12
2.3.1. Desenvolvimento das linhas de pesquisa de veículos autônomos	13
2.3.2. Análise das linhas de pesquisas referente a veículos autônomos	15
2.3.3. Linhas de pesquisas desenvolvidas no Brasil referente a veículos autônomos	16
2.4. ANÁLISE DE FLUXO DE TRÁFEGO E OPERAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS (VAs)	17
2.5. OPERAÇÃO DE VEÍCULOS COMPARTILHADOS AUTÔNOMOS ELÉTRICOS E TRANSPORTE PÚBLICO RESPONSIVO À DEMANDA	18
2.6. OPERAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NA ÚLTIMA MILHA DE VIAGENS DE TREM	20
2.7. TÓPICOS CONCLUSIVOS	22
<b>3. MÉTODO</b>	<b>24</b>
3.1. APRESENTAÇÃO	24
3.2. CONSIDERAÇÕES DE APLICAÇÃO DO MÉTODO	24
3.3. ESTRUTURA DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO	25
3.4. ETAPAS DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO	25
3.4.1. Etapa 1 – Caracterização e delimitação da área de estudo	25
3.4.2. Etapa 2 – Montagem da base de simulação	27
3.4.3. Etapa 3 – Criação de cenários	28
3.4.4. Etapa 4 – Simulação dos cenários base	29
3.4.5. Etapa 5 – Simulação de cenário com veículos compartilhados	29
3.4.6. Etapa 6 – Cálculo das emissões e dos custos de viagem	29
<b>4. APLICAÇÃO DO MÉTODO</b>	<b>31</b>

4.1.	APRESENTAÇÃO	31
4.2.	ETAPA 1 – CARACTERIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
4.3.	ETAPA 2 – MONTAGEM DA BASE DE SIMULAÇÃO	44
4.4.	ETAPA 3 – CRIAÇÃO DE CENÁRIOS	50
4.5.	ETAPA 4 – SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS BASE	58
4.6.	ETAPA 5 – SIMULAÇÃO DE CENÁRIO COM VEÍCULOS COMPARTILHADOS	59
4.7.	ETAPA 6 – CÁLCULO DAS EMISSÕES E DOS CUSTOS DE VIAGEM	64
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>66</b>
5.1.	APRESENTAÇÃO	66
5.2.	DADOS DE VIAGEM DOS VEÍCULOS NOS CENÁRIOS	66
5.3.	CÁLCULO DAS EMISSÕES	71
5.4.	CÁLCULO DOS CUSTOS DE VIAGEM	74
5.4.1.	Tempo de espera - Ceilândia	75
5.4.2.	Tempo de espera – Plano Piloto	78
5.5.	CÁLCULO DO NÚMERO DE VIAGENS POR METRÔ	85
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>87</b>
6.1.	CONCLUSÕES	87
6.2	LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	89
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>91</b>
<b>APÊNDICE A - CÁLCULO DOS CUSTOS DE VIAGEM DA FROTA NA PRIMEIRA MILHA COM 30 VC E ÚLTIMA MILHA 20 VC</b>		<b>97</b>
<b>APÊNDICE B - VEÍCULO AUTÔNOMO: UMA VISÃO GERAL DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA BASEADA NA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA</b>		<b>100</b>
<b>APÊNDICE C - REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DOS ESTUDOS REFERENTES A VEÍCULOS AUTÔNOMOS EM REVISTAS INDEXADAS DAS BASES DE DADOS WEB OF SCIENCE E SCOPUS</b>		<b>112</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Linhas de pesquisa em desenvolvimento no Brasil.....	16
Tabela 4.1 – Número de veículos com viagem entre as zonas de Ceilândia e as zonas do Plano Piloto .....	53
Tabela 4.2 – Número de pessoas solicitando viagens com veículos compartilhados entre as zonas de Ceilândia e as zonas do Plano Piloto.....	54
Tabela 4.3 – Pessoas ao finalizar a simulação dos cenários com veículos compartilhados nas zonas de Ceilândia com destino a estação Terminal Ceilândia.....	61
Tabela 4.4 – Pessoas ao finalizar a simulação dos cenários de veículos compartilhados nas estações do Plano Piloto em direção ao destino .....	61
Tabela 4.5 – Horários de chegada dos trens nas estações do Plano Piloto.....	63
Tabela 5.1 – Dados de viagem dos veículos nos cenários simulados na rede viária de Ceilândia .....	69
Tabela 5.2 – Dados de viagem dos veículos nos cenários simulados na rede viária do Plano Piloto .....	70
Tabela 5.3 – Matriz Origem/Destino das viagens com destino às estações do Plano Piloto das 6 às 8 horas da manhã .....	86
Tabela 5.4 – Aumento do número de viagens por metrô nos cenários.....	86
Tabela A.1 – Cálculo dos custos de viagem sendo a primeira milha com 30 VC e a última milha 20 VC .....	97

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3-1 – Tipos de Cenários de Simulação .....	28
---	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estrutura da dissertação .....	8
Figura 2.1 – Acoplamento bibliográfico com os 1000 documentos com maior força total de <i>link</i> com os demais documentos – <i>Web of Science</i> .....	13
Figura 2.2– Acoplamento bibliográfico com os 1000 documentos com maior força total de <i>link</i> com os demais documentos – <i>Scopus</i> .....	14
Figura 2.3 – Co-citação com os documentos da <i>Web of Science</i> , com as referências citadas com no mínimo de 10 citações (843 referências citadas).....	15
Figura 2.4 – As 4 linhas de pesquisas referentes a veículos autônomos .....	15
Figura 2.5 – Visão geral das alternativas de viagem incorporadas ao experimento do estudo de Yap <i>et al.</i> (2016).....	21
Figura 3.1 – Etapas do método da pesquisa .....	25
Figura 3.2 – Representação das simulações do cenário base e dos cenários com veículos compartilhados .....	27
Figura 4.1 – Fluxograma da aplicação do método .....	32
Figura 4.2 – Mapa do sistema de transporte público por metrô de Brasília (DF) .....	33
Figura 4.3 –Estação Terminal Ceilândia, Isócronas de (a) 5 min, (b) 10 min, e (c) 15 min ....	35
Figura 4.4 – Isócronas de 5 minutos das estações do Plano Piloto, (a) Terminal Asa Sul, (b) 114 Sul, (c) 112 Sul, (d) 108 Sul.....	36
Figura 4.5 – Isócronas de 5 minutos das estações do Plano Piloto, (e) 102 Sul, (f) Galeria, e (g) Central. ....	37
Figura 4.6 – Áreas de influência de 5, 10 e 15 minutos da estação Terminal Ceilândia.....	38
Figura 4.7 – Área de influência de 5 minutos das estações: 114 Sul, 112 Sul, 108 Sul, 102 Sul, Galeria e Central.....	39
Figura 4.8 – Distribuição por horário das viagens por veículos particulares e metrô, com a origem na área de influência de Ceilândia .....	40
Figura 4.9 – Distribuição das viagens das 6h às 8h por veículo particular e metrô que tem como origem áreas de influências de 5, 10 e 15 minutos da estação Terminal Ceilândia .....	41
Figura 4.10 – Distribuição por hora das viagens por veículos particulares e metrô, com o destino na área de influência do Plano Piloto .....	42
Figura 4.11 – Distribuição das viagens das 6h às 8h por veículo particular e metrô que tem como destino a área de influência de 5 minutos das estações do Plano Piloto .....	43
Figura 4.12 – Linha <i>netconvert</i> no prompt de comando .....	45
Figura 4.13 – Arquivo da rede viária das áreas de influência da estação Terminal Ceilândia. ....	45
Figura 4.14 – Arquivo da rede viária das áreas de influência da estação do Plano Piloto.....	45
Figura 4.15 – Linha <i>polyconvert</i> no prompt de comando .....	46
Figura 4.16 – Linha <i>edgesInDistricts.py</i> no prompt de comando .....	46
Figura 4.17 – Borda das Regiões Administrativas na rede viária de Ceilândia .....	47
Figura 4.18 – Borda das Regiões Administrativas na rede viária do Plano Piloto.....	47
Figura 4.19 – Exemplo de viagem gerado pelo od2trips.....	49
Figura 4.20 – Parâmetros para definição do veículo particular (convencional).....	49
Figura 4.21 – Linha <i>duarouter</i> no prompt de comando .....	50
Figura 4.22 – Exemplo de conflito na rede viária corrigido com NETEDIT.....	51
Figura 4.23 – Distribuição nas zonas das viagens a serem substituídas por pessoas solicitando viagens com veículos compartilhados.....	52
Figura 4.24 – Parâmetros para definição do veículo compartilhado .....	55
Figura 4.25 – Parâmetros para definição do veículo compartilhado elétrico .....	55

Figura 4.26 – Parâmetros para definição do veículo compartilhado autônomo .....	56
Figura 4.27 – Parâmetros para definição do veículo compartilhado autônomo elétrico .....	56
Figura 4.28 – Estacionamento da Estação Terminal Ceilândia .....	57
Figura 4.29 – Estacionamentos das Estações do Plano Piloto .....	57
Figura 5.1 – Emissões nas redes viárias com viagens de Veículo Compartilhado com origem nas zonas de 5 minutos da estação Terminal.....	72
Figura 5.2 – Emissões das redes viárias com viagens de Veículo Compartilhado com origem nas zonas de 10 minutos da estação Terminal.....	73
Figura 5.3 – Emissões das redes viárias com viagens de Veículo Compartilhado com origem nas zonas de 15 minutos da estação Terminal.....	74
Figura 5.4 – Tempo de espera 1 nas simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia.....	76
Figura 5.5 – Tempo de espera 1 nas simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia.....	77
Figura 5.6 – Tempo de espera 1 nas simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia.....	77
Figura 5.7 – Tempo de espera 3 nas simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia.....	78
Figura 5.8 – Tempo de espera 3 nas simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia.....	79
Figura 5.9 – Tempo de espera 3 nas simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia.....	80
Figura 5.10 – Comparação do Custo Total 1 entre as simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia e o cenário base .....	81
Figura 5.11 – Comparação do Custo Total 2 entre as simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia e o cenário base .....	82
Figura 5.12 – Comparação do Custo Total 1 entre as simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia e o cenário base .....	83
Figura 5.13 – Comparação do Custo Total 2 entre as simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia e o cenário base .....	83
Figura 5.14 – Comparação do Custo Total 1 entre as simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia e o cenário base .....	84
Figura 5.15 – Comparação do Custo Total 2 entre as simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia e o cenário base .....	85

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ADS - Sistema de Direção Automatizado  
ATs - Táxi Automatizado  
AVRI - Índice de Prontidão para Veículos Autônomos  
DDT - Tarefa de Condução Dinâmica  
DRT - Transporte Responsivo à Demanda  
MaaS - Mobilidade como um Serviço  
ODD - Domínio de *Design* Operacional  
OEDR - Detecção e Resposta de Objeto e Evento  
VA – Veículos Autônomos  
VC - Veículo Compartilhado  
VCE - Veículo Compartilhado elétrico  
VCA - Veículo Compartilhado autônomo  
VCAE - Veículo Compartilhado autônomo elétrico  
VE - Veículo Elétrico  
TIC - Tecnologia da informação e comunicação

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. APRESENTAÇÃO

Problemas de mobilidade têm dificultado o crescimento econômico principalmente nos países em desenvolvimento. Tempos de viagem geralmente altos e crescentes, ocorrem, provavelmente, devido ao crescimento desordenado das cidades e a uma priorização do transporte privado (ACHARYA, 2005; CERVERO, 2013; GAKENHEIMER, 1999; GWILLIAM, 2003).

No entanto, com este ritmo acelerado no crescimento das cidades e da motorização nos países em desenvolvimento, o nível da infraestrutura viária e serviços de transporte tornam-se insuficientes, dificultando os fluxos de tráfego (ACHARYA, 2005; CERVERO, 2013; GAKENHEIMER, 1999; GWILLIAM, 2003; PUCHER *et al.*, 2005). Além disso, observa-se, nos países em desenvolvimento, que a população de baixa renda tende a ser marginalizada em locais periféricos, distantes dos serviços essenciais (CERVERO, 2013; GAKENHEIMER, 1999; GWILLIAM, 2003).

Assim, com o grande fluxo de veículos, a redução da mobilidade ocorre devido ao aumento de congestionamentos (ACHARYA, 2005; CERVERO, 2013; GAKENHEIMER, 1999; GWILLIAM, 2003; PUCHER *et al.*, 2005). Portanto, são necessárias medidas para melhorar os sistemas de transporte público de passageiros, que têm um papel crítico na redução do congestionamento do tráfego, do consumo de gasolina e das emissões de carbono, especialmente nas grandes cidades.

Os sistemas de transporte público de passageiros necessitam de soluções para o aumento de sua eficiência, e com base nos modos compartilhados e desenvolvimentos em tecnologias da informação e comunicação (TIC), a Mobilidade como um serviço (MaaS – *Mobility as a Service*) é um dos novos conceitos de mobilidade que podem ajudar a fornecer mobilidade porta a porta a partir da integração do transporte urbano de passageiros com diferentes modos de transporte (KAMARGIANNI *et al.*, 2016).

As plataformas que incorporam o conceito de MaaS, entre outras vantagens, possibilitam uma mudança em relação ao serviço, pois foca o usuário como centro da atenção e integra numa mesma plataforma os vários serviços da mobilidade com os modos de transporte disponíveis. Possibilita a mudança de conceito em que a posse do automóvel é substituída pelo serviço da mobilidade, estando este modo disponível para reserva para viagens ponto a ponto, e no futuro podendo ser com ou sem motorista (HENSHER, 2017).

A MaaS pode permitir uma viagem intermodal, fornecendo combinações de diferentes modos de transporte, juntamente com um sistema de reserva com um único pagamento para todos os modos de transporte, integrando-os e gerando informações em tempo real (KAMARGIANNI *et al.*, 2015). Assim pode-se oferecer serviços de, por exemplo: mobilidade compartilhada (compartilhamento de carro, bicicleta e scooter), carona (*ride-sharing* ou *carpooling*), *ride-hailing* (conhecido também como *ridesourcing*, que são viagens sob demanda solicitada por aplicativo), *ridesplitting* (tipo de *ridesourcing* quando a origem e destino de passageiros são semelhantes, compartilhando o trajeto e os custos), Transporte responsivo à demanda (*Demand-Responsive Transit – DRT*, transporte compartilhado que altera sua rota dependendo da demanda), veículos elétricos, veículos conectados e veículos autônomos (carro, caminhão, ônibus e táxi).

Ainda a MaaS vem tomando maior importância com o desenvolvimento tecnológico dos Veículos Autônomos (VAs, em inglês *Automated Vehicles (AVs)*, também chamados de *Autonomous Vehicles*, *Self-driving Vehicles* ou *Driverless Vehicles*). A implantação de VAs oferece diversos benefícios como, principalmente, a redução de acidentes devido o erro humano, aumento da mobilidade para aqueles com limitações (como deficientes físicos ou mentais, menores de idade e idosos), redução de congestionamentos, menor necessidade de estacionamentos e melhoria na economia de combustível proporcionando a redução de emissões (ANDERSON *et al.*, 2014; FAGNANT & KOCKELMAN, 2015).

Porém a adoção dos VAs proporciona desvantagens, como o aumento de quilômetros percorridos por veículo (ANDERSON *et al.*, 2014; FAGNANT & KOCKELMAN, 2015; MILAKIS *et al.*, 2017), que pode causar congestionamentos (ANDERSON *et al.*, 2014), aumento de consumo de combustível (ANDERSON *et al.*, 2014; FAGNANT & KOCKELMAN, 2015) e conseqüentemente de emissões, com o aumento do número de viagens (FAGNANT & KOCKELMAN, 2015).

Como observado, dependendo de como os VAs serão implementados no futuro, pode-se gerar diversos resultados, podendo desde aumentar o número de veículos nas vias urbanas, gerando mais congestionamentos, até uma contribuição para a formação de cidades sustentáveis, recuperando espaço urbano, com menos veículos nas vias. Porém esta segunda opção só poderá ocorrer se os VAs forem introduzidos no sistema de transporte em frotas de diferentes tamanhos, reforçando uma rede de transporte público eficiente de alta capacidade que apoia caminhadas e ciclismo, podendo utilizar os VAs como componentes da mobilidade integrados ao sistema (UITP, 2017). Assim, os VAs podem ser usados como alimentadores para estações de transporte público; veículos de diversos tamanhos como robô-táxis e ônibus sob demanda; compartilhamento de carros; e mini-ônibus autônomos sob demanda baseados em área (UITP, 2017).

Assim, pode-se inferir que os VAs não podem substituir os veículos de transporte público, sendo que estes ainda continuam sendo a principal solução para cumprir a maior parte das viagens urbanas (UITP, 2017), mas nos últimos anos está se procurando uma forma de otimizar os sistemas de alta capacidade com sua integração sustentável com outros modos de transporte, permitindo a redução de congestionamentos e impactos econômicos e ambientais relacionados (YAP *et al.*, 2016). Assim, procura-se integrar esses sistemas de transporte público a modos como a bicicleta, caminhada, veículos compartilhados, automóvel ou até mesmo com outro transporte público, por exemplo a integração do trem/metrô com ônibus.

Assim, sendo que um maior uso de transporte público de alta capacidade como trem/metrô implica em um alto nível de sustentabilidade e de redução de congestionamento, com seus impactos econômicos e ambientais relacionados (YAP *et al.*, 2016), deve-se buscar métodos para incentivar o uso deste modos, e uma solução seria a integração deste transporte público com outro modo de transporte.

Porém para estimular o uso do transporte público como trem/metrô, deve-se melhorar sua acessibilidade, sendo uma solução o uso de transporte de primeira e última milha a fim de reduzir o tempo extra e incômodo que os passageiros enfrentam em acessar a estação e sair da estação até o destino (CHONG *et al.*, 2011). Entenda-se como primeira milha em um sistema público metroviário o deslocamento que o passageiro faz da origem da sua viagem até a

estação, enquanto última milha o deslocamento que o passageiro faz da estação até o destino final da sua viagem.

Assim, o uso de uma frota de veículos compartilhados, podendo ser autônomo e/ou elétrico, são considerados como um meio potencial de integração com o trem, fornecendo um serviço de transporte porta a porta sustentável e com boa relação custo-benefício de primeira e a última milha nas estações de metrô (CHONG *et al.*, 2011; LIANG *et al.*, 2016; YAP *et al.*, 2016).

## **1.2. DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA**

Dentre as mais de 5,2 milhões de viagens realizadas diariamente no Distrito Federal, 3,79 milhões (72,4%) são por modos motorizados, sendo 45,9% são realizadas por transporte individual, 25,7% por transporte coletivo, e 0,8% por outros modos e pela combinação de modos de mais de um grupo (METRÔ-DF, 2018b). Sendo que, em relação as viagens por metrô, 2,49% corresponde a viagens com menos um de seus trechos por metrô e 2,07% viagens exclusivas por metrô.

Já em relação a frota de veículos, em outubro de 2020, o Distrito Federal possuía 1.924.141 veículos, sendo 1.350.125 automóveis, o que equivale a 70% da frota de veículos (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2020). O incremento no número de viagens realizadas pelos moradores do Distrito Federal, nas últimas décadas derivou do aumento no uso do transporte privado individual (automóveis e motocicletas), o que representa uma situação cada vez mais crítica e menos sustentável em termos de impacto social, ambiental e econômico (METRÔ-DF, 2018b). Em 1990 a porcentagem de viagens por transporte motorizado coletivo (36,1%) era maior que as viagens por modo individual (32%), já em 2016, segundo dados da PMU (Pesquisa de Mobilidade Urbana) as viagens por modo individual motorizado estavam próximas dos 50% das viagens totais.

A situação de Brasília não é diferente de outras cidades. O uso do transporte individual privado em detrimento do transporte público coletivo tem se tornado o centro das atenções em prol da sustentabilidade urbana (DE LARA & MARX, 2018). Autores como Chong *et al.*, (2011), afirmam que é possível obter uma mobilidade urbana sustentável promovendo o uso do transporte público, principalmente o trem/metrô, porém é importante não apenas estimular o

seu uso, mas também melhorar sua acessibilidade. Assim, de modo a atrair mais usuários a usar o transporte público deve-se fornecer um serviço que promova uma experiência agradável, desenvolvendo sistemas novos e inovadores com componentes avançados, atraentes e de baixo custo (LIU *et al.*, 2020). Portanto, fornece um serviço de transporte integrado, flexível, dinâmico, sustentável e compartilhado para aumentar o acesso ao transporte público de massa, tal como os sistemas metroferroviários, na primeira e última milha, é uma opção que pode aumentar a eficiência do sistema.

Assim, considerando a possibilidade de acesso a uma plataforma de MaaS com serviços de compartilhamento de uma frota de veículos compartilhados, autônomos e elétricos, integrados na primeira e última milha do sistema de transporte público por metrô de Brasília, quais os benefícios da sua implantação nos quesitos econômicos e ambientais?

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar os impactos econômicos e ambientais da implantação de transporte público com veículo compartilhado na primeira e última milha no sistema de transporte por metrô em Brasília, fornecendo um serviço de transporte porta a porta.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver cenários de comparação que considerem as condições de integração dos veículos compartilhados com o sistema de metrô;
- Analisar os benefícios da integração de frotas de veículos compartilhados com o metrô em função dos custos de viagem dos usuários;
- Analisar os benefícios da integração de frotas de veículos compartilhados elétricos com o metrô em função das emissões.

#### 1.4. JUSTIFICATIVA

Na literatura, os veículos compartilhados apresentam diversos benefícios que motivam o investimento de sua implantação nos centros urbanos, podendo diminuir o número de veículos nas vias, e conseqüentemente o número de emissões. Estes veículos por fornecer um serviço com viagens sob demanda solicitadas por aplicativo, podem ser integrados a um sistema público de transporte como o metrô, melhorando a sua atratividade e aumentando a demanda ao ser usado na primeira e última milha deste transporte público. O aumento da acessibilidade do uso do sistema metroviário, pode reduzir o tempo extra e incômodo que os passageiros enfrentam para acessar à estação desde sua origem e da estação até o destino. Embora existam estudos sobre o tema, na sua totalidade estão restritos a experiências internacionais e nada em relação à realidade local.

A incorporação dos veículos compartilhados autônomos causaria mudanças comportamentais nos usuários na forma de interação com os sistemas de transporte conseqüentemente isto pode gerar externalidades econômicas e ambientais que são necessárias de serem mensuradas.

Por exemplo, um veículo para as viagens compartilhadas, pode aumentar a taxa de ocupação dos veículos nas viagens, se for autônomo pode otimizar a rota e o atendimento dinâmico das viagens, se for elétrico uma diminuição das emissões e uma economia energética. Desta forma uma análise por cenários das diversas combinações de uso dos veículos compartilhados comparados com uma situação base (veículos convencionais) se faz necessária para mensurar os seus potenciais benefícios econômicos e ambientais.

Ao observar o caso de estudo, Brasília é uma cidade que prioriza o automóvel particular, assim como muitos outros centros urbanos, o que deve ocasionar os principais problemas de mobilidade urbana (como congestionamentos, poluição sonora e atmosférica, e alta taxa de acidentes). Sendo assim, os resultados da análise da implantação de veículos compartilhados, podendo ser autônomo e elétricos, integrado ao transporte público por metrô poderia auxiliar na construção de uma agenda estratégica de discussão para uma futura incorporação no sistema da mobilidade urbana de Brasília.

Sabe-se também que ainda existem muitas barreiras que devem ser vencidas para que os veículos compartilhados, principalmente autônomos, possam ser implantados nos centros

urbanos, como é o caso de Brasília. Todavia, é importante que a pesquisa possa contribuir na construção de conhecimento, antes que estes veículos sejam implantados, para analisar a eficiência desses serviços no sistema e para o usuário.

## 1.5. ETAPAS METODOLÓGICAS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi dividida em cinco etapas metodológicas, de forma a planejar o andamento do estudo, e são descritas abaixo:

**Etapa 1 – Revisão da literatura:** após o levantamento das linhas de pesquisa relacionadas aos VAs através de uma Revisão bibliométrica usada para medir a contribuição do conhecimento científico das publicações na área (ver Apêndices B e C), foram analisados os estudos relacionados ao impacto e adoção da direção automatizada no sistema de transporte, de forma a subsidiar o método do estudo voltado para simulação de cenários.

**Etapa 2 – Desenvolvimento do método:** o método proposto para a simulação de novos cenários implementando veículos compartilhados em Brasília na primeira e última milha do transporte público por metrô foi realizada com o *software* SUMO. Sendo assim foi definida a área de estudo e foram coletados os dados para a simulação dos cenários.

**Etapa 3 – Simulação dos cenários:** nesta etapa foram simulados dois tipos de cenários, sendo o primeiro o cenário base com veículos convencionais. Já no segundo cenário foram adicionados a simulação os veículos compartilhados, podendo ser autônomos e elétricos, utilizados nas viagens os usuários na primeira e última milha no sistema de transporte público por metrô.

**Etapa 4 – Análise dos resultados:** nesta etapa foram comparados os dois tipos de cenários simulados, focando-se principalmente em analisar a emissão e custo de viagem. Verificou quais os benefícios que a integração de veículos compartilhados no sistema de transporte público por metrô de Brasília na primeira e última milha.

## 1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, de acordo como apresentado na Figura 1.1.

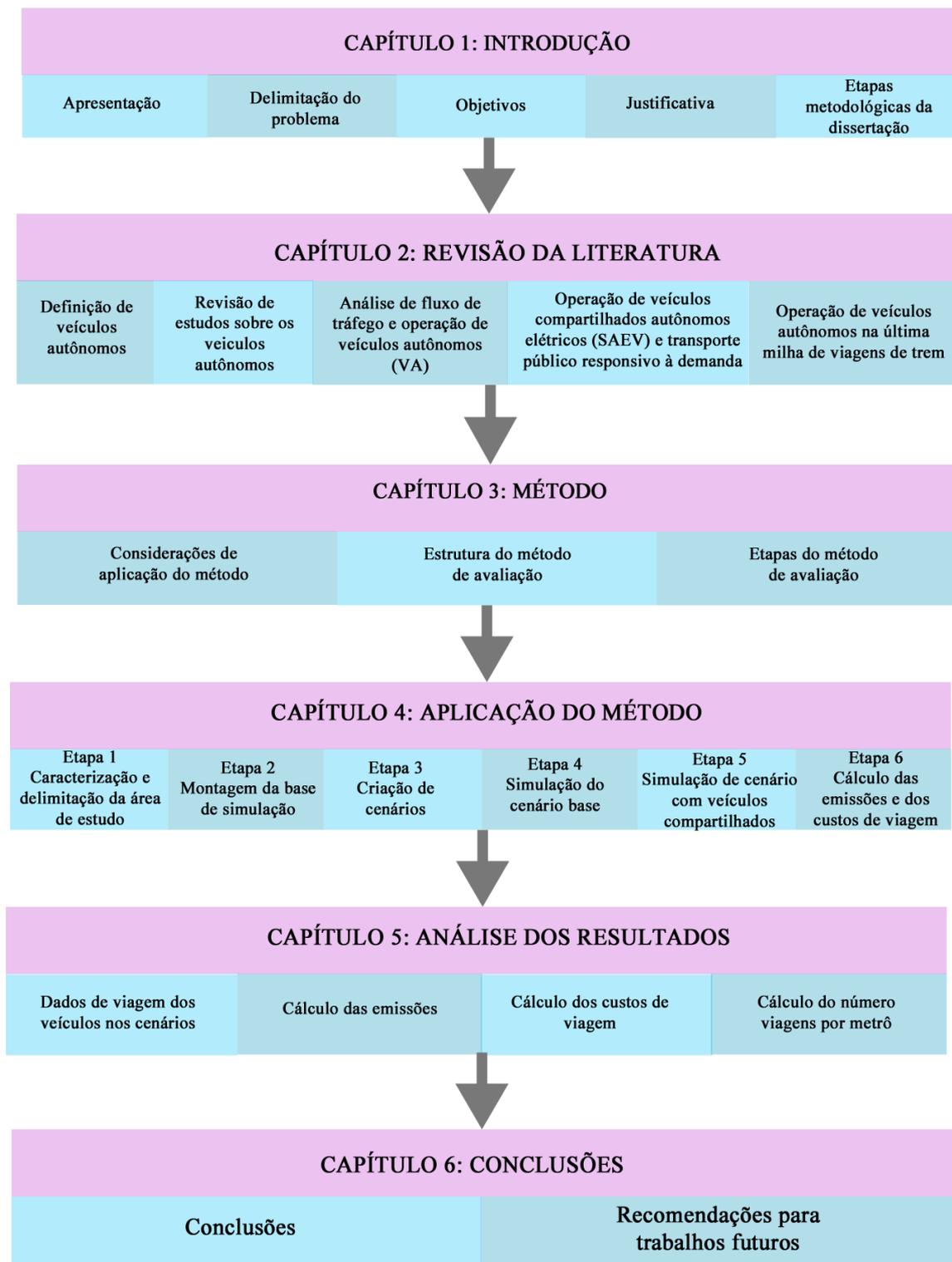


Figura 1.1 – Estrutura da dissertação

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. APRESENTAÇÃO

O objetivo do presente capítulo é, a partir da literatura existente, identificar os principais conceitos, estudos e aplicações sobre VAs, que serão utilizados para desenvolvimento do método da dissertação. Assim, o capítulo está dividido em cinco seções. A primeira seção traz a definição dos VAs, benefícios, desvantagens, e uma breve revisão do desenvolvimento desta tecnologia em nível internacional e no Brasil. Na segunda seção apresenta de forma compacta os resultados de uma Revisão Sistemática da Literatura com indicadores bibliométricos referente ao estado da arte dos VAs. Como pode ser visto de forma mais detalhada nos artigos do Apêndice B e C, foram identificadas as principais linhas de pesquisa sobre VAs. Na terceira seção são apresentados estudos abordando a temática de análise de fluxo de tráfego e operação de VAs. Na quarta seção é tratado sobre os estudos referentes à operação de veículo compartilhado autônomo elétrico. Na seção 5 são abordados estudos referentes à operação integrada dos VAs com sistemas ferroviários, considerando a última milha de viagem de trem.

### 2.2. DEFINIÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS

A partir dos conceitos estabelecidos em SAE International (2018), os VAs são veículos equipados com um sistema automatizado de direção (*driving automation system*), podendo executar parte ou todas as Tarefas de Condução Dinâmica (*Dynamic Driving Task - DDT*) de forma sustentada, considerando também, se houver, determinadas limitações pelo Domínio de *Design Operacional (Operational Design Domain - ODD)*, podendo o veículo requerer um motorista (humano) para toda ou parte da viagem dependendo do nível de automação.

O DDT envolve todas as funções táticas e operacionais necessárias para operar um veículo, excluindo as funções estratégicas. Já o ODD são condições operacionais sob as quais o sistema foi projetado para funcionar. Também deve-se considerar o conceito de DDT *fallback*, que é a resposta do usuário para realizar as DDT ou atingir a condição de risco mínimo após uma falha no sistema, ou após a saída do ODD, ou a resposta de Sistema de Direção Automatizado (*Automated Driving System - ADS*) para atingir a condição de risco mínimo, dadas as mesmas circunstâncias (SAE INTERNATIONAL, 2018).

Para a classificação dos níveis de automação, SAE International (2018) apresenta seis níveis distintos e mutuamente exclusivos, que varia do nível 0, chamado de Sem automação de direção (*No Driving Automation*) até o nível 5, chamado de Automação de direção completa (*Full Driving Automation*). Na taxonomia de automação de direção, o nível 4 e o nível 5 o sistema automatizado de direção executa o DDT completo e o DDT *fallback*, porém a diferença entre estes dois níveis é que no 4 há limitações de ODD, enquanto no 5 não. Ao comparar o nível 3 e o nível 4, a diferença está que no 3 o sistema não executa o DDT *fallback*, sendo papel do motorista. No nível 2, o DDT não é realizado completo pelo sistema, sendo executado somente o controle dos movimentos longitudinal e lateral do veículo, mas não a Detecção e Resposta de Objeto e Evento (*Object and Event Detection and Response - OEDR*), sendo feito pelo motorista. Já no nível 1, somente o movimento longitudinal ou o lateral é executado pelo sistema de automação (não ambos, como ocorre nos níveis 2 a 5). No nível 0 a DDT é executada todo o tempo pelo motorista, mas podendo ter sistemas que possam fornecer avisos ou suporte, como intervenção de emergência momentânea.

Na literatura a tecnologia dos VAs apresentam diversos benefícios que motivam o investimento de sua implantação nos centros urbanos, como promover a redução de acidentes, aumento da mobilidade, principalmente daqueles que não podem ou não querem dirigir, redução de congestionamentos, menor necessidade de estacionamentos próximos, incentivo a programas de compartilhamento de veículos, melhoria na economia de combustível proporcionando a redução de emissões, aumento da capacidade das estradas, operação mais eficiente dos veículos com melhor tempo de viagem, entre outros (ANDERSON *et al.*, 2014; FAGNANT & KOCKELMAN, 2015). Ainda a incorporação dos VAs causaria mudanças comportamentais que afetaria a maneira como os usuários interagem com os sistemas de transporte, pois os seus deslocamentos seriam feitos sem nenhuma intervenção humana na condução.

Porém há também as desvantagens na adoção de VAs, principalmente relacionadas com o aumento de quilômetros percorridos por veículos (ANDERSON *et al.*, 2014; FAGNANT & KOCKELMAN, 2015; MILAKIS *et al.*, 2017), que podem causar congestionamentos (ANDERSON *et al.*, 2014), aumento de consumo de combustível e consequentemente de emissões (ANDERSON *et al.*, 2014; FAGNANT & KOCKELMAN, 2015) e com o aumento do número de viagens (FAGNANT & KOCKELMAN, 2015). Também se estima que afete algumas instituições, como por exemplo prejudicando a receita de estacionamentos,

aumentando o desemprego com a profissão de motorista se tornando desnecessária, a possibilidade de mudança de usuários do transporte público para os VAs. Ainda a redução de acidentes acabaria afetando as companhias de seguros, e o setor de funilaria, entre outros. Existem também barreiras da implantação de VAs, relacionados com a tecnologia, tais como os ciberataques em potencial (PETIT & SHLADOVER, 2015), questões éticas sobre quem se responsabilizaria em caso de acidente envolvendo VAs (HEVELKE & NIDA-RÜMELIN, 2015), e como devem ser configurados o ambiente de ética e programação computacional dos VAs para se comportar perante um acidente inevitável (GOGOLL & MÜLLER, 2017; SANTONI DE SIO, 2017).

Independente das diversas vantagens e desvantagens dos VAs, vários países desenvolvidos estão testando protótipos nas suas rodovias e desenvolvendo legislação para lidar com os riscos de responsabilidade (TAEIHAGH & LIM, 2019). Apesar dos países desenvolvidos adotarem primeiro as novas tecnologias, os países em desenvolvimento têm uma adoção tecnológica geralmente tardia, fazendo com que estes tenham melhor posição para difundir as tecnologias mais rapidamente (BITTENCOURT *et al.*, 2019; PERKINS & NEUMAYER, 2005). No estudo de Bittencourt *et al.* (2019) ao se comparar a propensão à adoção de tecnologia do consumidor no Brasil com a dos EUA, os brasileiros apresentam uma maior propensão de uso, mostrando a importância de considerar a adoção e aceitação de novas tecnologias no contexto nacional.

Assim, os VAs mesmo advindo dos países desenvolvidos, a sua aceitação e implantação em países subdesenvolvidos será uma questão de tempo, e isto se deve ao fato de que existe a possibilidade desta tecnologia ser implantada nas economias desenvolvidas e emergentes em épocas semelhantes. Esta questão deve ser levada em consideração pois não se sabe ainda quando esta tecnologia chegará de maneira comercial no mercado, e como as taxas de penetração evoluíram ao ponto de afetar a demanda e o planejamento de transporte (MILAKIS *et al.*, 2017).

A tecnologia de VAs pode impactar no uso do solo nos países em desenvolvimento, pois estes países ainda possuem uma infraestrutura de transporte em andamento, podendo focar na construção de alguns aspectos voltados para modelos de mobilidade como compartilhamento de carros e redes rodoviárias ajustadas para VAs, poupando-os dos custos associados à

expansão da infraestrutura intensiva voltada somente para veículos convencionais (ANDERSON *et al.*, 2016; BAGLOEE *et al.*, 2016), podendo focar em comunicação veículo-a-infra-estrutura (V2I - *vehicle to infrastructure*), por exemplo.

Ao analisar a literatura sobre VAs, é perceptível que principalmente os países desenvolvidos estão avançando nesta tecnologia. Segundo Taelhagh & Lim (2019), os governos dos Estados Unidos, Reino Unido, Austrália, Coreia do Sul, União Europeia, Cingapura, Japão e China já regulamentam projetos de regras que permitam e apoiam testes para VAs, e já analisam uma legislação para lidar com os riscos de responsabilidade. Porém no estudo Moody *et al.* (2020), ao se analisar um dos principais benefícios potenciais dos VAs que é a segurança nas estradas, percebe-se que os países desenvolvidos relatam percepções pessimistas da segurança atual e futura dos VAs ao se comparar com os países em desenvolvimento, sendo que os países em desenvolvimento da Ásia e o Brasil relatam uma conscientização extremamente alta dos VAs e previsões extremamente otimistas da segurança de VA.

A KPMG *International* desenvolveu ao longo dos últimos três anos estudos que mostram a potencialidade de implantação de VAs, o Índice de Prontidão para Veículos Autônomos (AVRI - *Autonomous Vehicles Readiness Index*) (KPMG INTERNATIONAL, 2018, 2019, 2020), avaliando-se quesitos relacionados com política e legislação, tecnologia e inovação, infraestrutura, e aceitação do consumidor. Ao se analisar o AVRI, o Brasil ficou em 2018 na posição 17 de 20, em 2019 apresentou a posição 25 de 25 e em 2020 a posição 30 de 30 países.

Nesse contexto em que incorporação dos VAs vem precedido de um processo tecnológico dinâmico, é importante compreender, conhecer e analisar essa nova realidade e as suas implicações para o cenário brasileiro.

### **2.3. REVISÃO DE ESTUDOS SOBRE OS VEÍCULOS AUTÔNOMOS**

Esta revisão teve como objetivo coletar documentos sobre VAs para dar suporte na justificativa da abordagem, na sua inserção no contexto da pesquisa nacional e internacional e no embasamento do método da dissertação. Assim, foram analisadas as linhas de pesquisas em desenvolvimento em relação aos VAs, identificando-se os principais pontos e ideias emergentes, observando sua evolução e indicando as tendências de desenvolvimento, conforme recomendam Li *et al.* (2017). Os estudos levantados auxiliaram na avaliação dos

custos da implantação de transporte público com veículo compartilhado na primeira e última milha no sistema de transporte por metrô em Brasília. A revisão foi limitada até dezembro de 2019, e foram utilizadas as bases de dados *Web of Science* (WoS) e *Scopus*, como apresentado de forma mais detalhada nos Apêndices B e C.

### 2.3.1. Desenvolvimento das linhas de pesquisa de veículos autônomos

Para a análise das linhas de pesquisas relacionadas com VAs foi realizada análise de acoplamento bibliográfico e co-citação (KESSLER, 1963; SMALL, 1973; VAN ECK & WALTMAN, 2014), elaborados no *software* VOSviewer. A análise de acoplamento bibliográfico dos dados da pesquisa na *Web of Science*, determinou 4 *clusters* (Figura 2.1). A área de estudo de cada *cluster* foi resultado da análise dos 10 documentos mais citados de cada um destes *clusters*. Observa-se na Figura 2.1 que os *cluster* mais à esquerda (azul e verde) possuem áreas mais voltadas para o desenvolvimento de VAs e sua influência no tráfego, enquanto os *clusters* a direita (vermelho e amarelo) são mais focados na área comportamental e a aceitabilidade referente ao veículo autônomo.

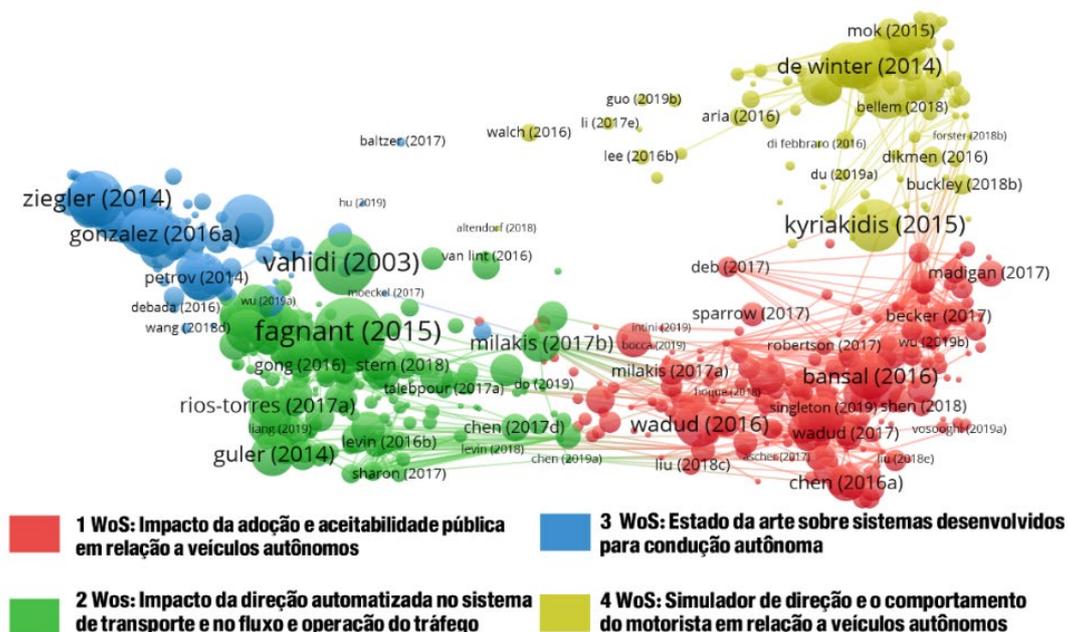


Figura 2.1 – Acoplamento bibliográfico com os 1000 documentos com maior força total de *link* com os demais documentos – *Web of Science*

Na análise de acoplamento bibliográfico dos dados da pesquisa na *Scopus*, identificaram-se 6 *clusters*. Também foram analisados os 10 documentos mais citados de cada um dos *clusters*,

para determinar sua área de estudo. Os *clusters* apresentam mais linhas de pesquisas centradas no comportamento e aceitabilidade do usuário, e isso talvez se deve aos resultados da *Scopus* terem sido filtrados pela área *Social Science*, com exceção do *cluster 2* Sco (verde), que é voltado para o os impactos dos VAs no sistema de transporte (Figura 2.2).

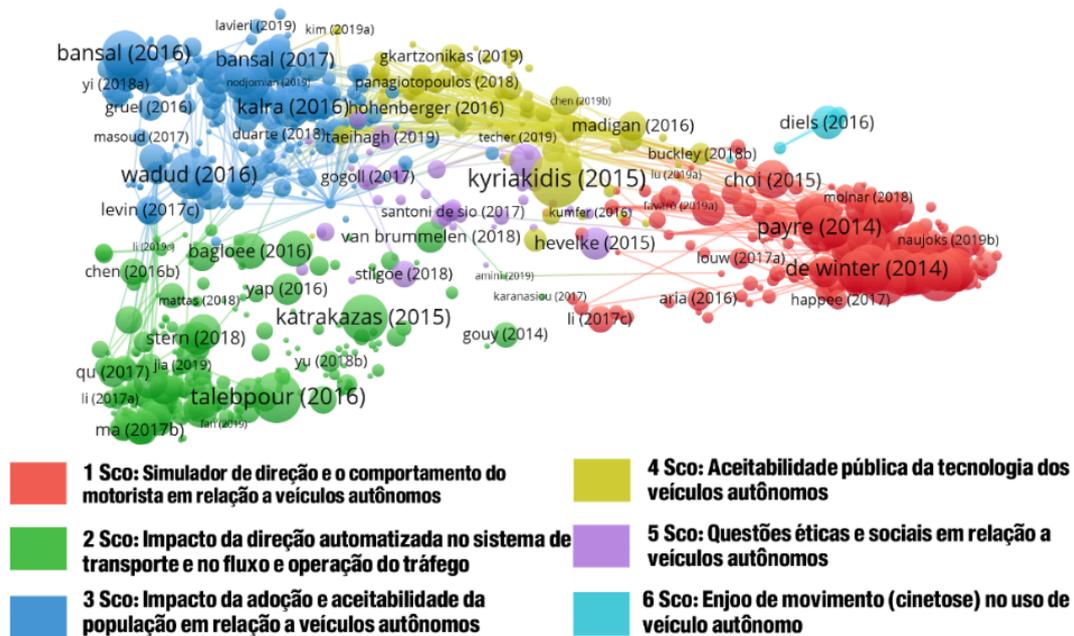


Figura 2.2– Acoplamento bibliográfico com os 1000 documentos com maior força total de *link* com os demais documentos – *Scopus*

A análise de co-citação foi realizada somente para os dados da pesquisa da *Web of Science*, visto que para os dados da *Scopus* precisam de um tratamento maior. Foram identificados 5 *clusters*. Ao aplicar o mesmo critério para definição das áreas de estudo do acoplamento bibliográfico, foram determinadas 5 áreas de estudo (Figura 2.3)

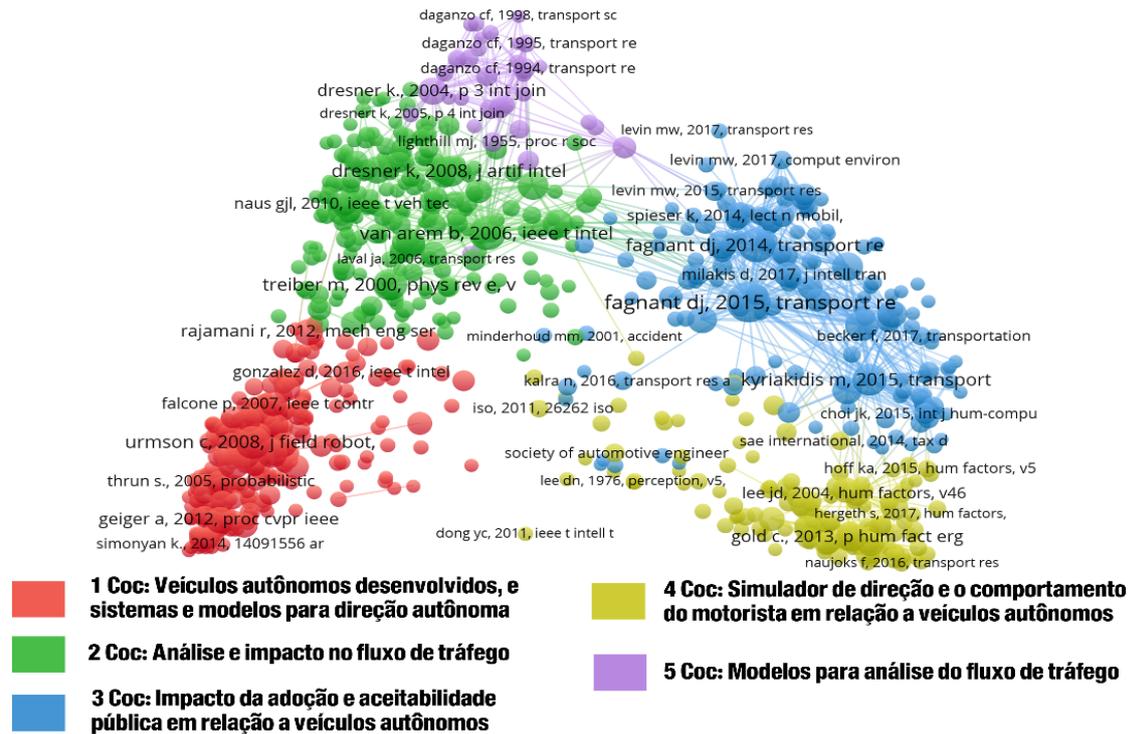


Figura 2.3 – Co-citação com os documentos da *Web of Science*, com as referências citadas com no mínimo de 10 citações (843 referências citadas)

### 2.3.2. Análise das linhas de pesquisas referente a veículos autônomos

Após a Revisão Bibliométrica, foi possível perceber que alguns *cluster* poderiam ser unidos para a formação de linhas de pesquisas, obtendo-se 4 linhas de pesquisas sobre VAs (Figura 2.4). Deve-se ter em consideração que esta análise levantou somente as linhas de pesquisa de maior força na área de transportes, não apresentando em totalidade as linhas sobre VAs, como por exemplo a linha de pesquisa abordando sobre a legislação de VAs não apresentou impacto suficiente na análise para ser identificada.

LP 1: Veículos autônomos desenvolvidos, e sistemas e modelos para direção autônoma	LP 2: Impacto da direção automatizada no sistema de transporte e no fluxo e operação do tráfego	LP 3: Aceitabilidade pública, questões éticas e sociais e impacto da adoção em relação a veículos autônomos	LP 4: Simulador de direção e o comportamento do motorista em relação a veículos autônomos
<b>3 WoS</b>	<b>2 WoS</b>	<b>1 WoS</b>	<b>4 WoS</b>
	<b>2 Sco</b>	<b>3 Sco 4 Sco 5 Sco</b>	<b>1 Sco 6 Sco</b>
<b>1 CoC</b>	<b>2 CoC 5 CoC</b>	<b>3 CoC</b>	<b>4 CoC</b>

Figura 2.4 – As 4 linhas de pesquisas referentes a veículos autônomos

Também é possível observar agrupamentos entre as linhas de pesquisas: (LP1 e LP2), (LP2 e LP3) e (LP3 e LP4). O agrupamento entre LP2 e LP3 está relacionado com os impactos que se esperam com a implantação dos VAs, tanto no sistema de transporte quanto no usuário. Já o agrupamento LP1 e LP2 aborda aspectos técnicos e tecnológicos, focando no desenvolvimento dos veículos autônomos e sua operação no tráfego, e o LP 3 e LP3 analisam questões comportamentais, sociais e éticas em relação aos VAs. Para o desenvolvimento do método deste estudo é interessante analisar os documentos pertencentes ao agrupamento LP2 e LP3, focando mais especificamente nos documentos da LP2.

### 2.3.3. Linhas de pesquisas desenvolvidas no Brasil referente a veículos autônomos

A busca de estudos brasileiros com VAs, resultou em 91 documentos. Assim, foi realizada uma análise apenas pelo título e/ou resumo, considerando principalmente que alguns documentos estão em andamento, classificando em qual linha de pesquisa o documento melhor se insere (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Linhas de pesquisa em desenvolvimento no Brasil

<b>Linhas de Pesquisa (LP)</b>	<b>Número de documentos</b>	<b>% de documentos</b>	<b>Anos</b>
<b>LP1</b>	45	49,5%	1998 - 2019
<b>LP2</b>	22	24,2%	2012 - 2019
<b>LP3</b>	18	19,8%	2013 - 2019
<b>LP4</b>	6	6,6%	2017 - 2019
<b>Total</b>	91	100,0%	1998 - 2019

Percebe-se que a maioria dos documentos (49,5%) pertencem a linha de pesquisa voltada para desenvolvimento de sistemas para a condução autônoma (LP1), com estudos focados, principalmente, na questão de detecção e percepção do meio ambiente, a fim do veículo autônomo tomar decisões relacionadas aos seus movimentos. A LP2 apresenta 22 documentos, menos da metade ao se comparar com a LP1, porém se percebe o interesse dos pesquisadores brasileiros em analisar os impactos dos veículos autônomos no sistema de transporte. Sendo que desses documentos, dois estão relacionados com esta dissertação.

Deste modo, com o levantamento do estado da arte de VAs, e com a análise das linhas de pesquisas em desenvolvimento sobre o tema, foi possível coletar artigos referentes à análise de fluxo de tráfego e a operação dos VAs no sistema de tráfego de forma a contribuir com o método da pesquisa. O presente estudo pertence a LP2, voltada para os impactos da direção

automatizada no sistema de transporte, mas também possui elementos contidos na LP3, referente aos SAVs (Veículos Compartilhados Autônomos e Elétricos). Sendo assim, nas próximas seções serão abordados os artigos contidos nessas linhas de pesquisas considerados relevantes para a atual pesquisa. Também serão abordados estudos encontrados em pesquisas à parte da Revisão Bibliométrica também conhecidos como literatura cinzenta.

#### **2.4. ANÁLISE DE FLUXO DE TRÁFEGO E OPERAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS (VAs)**

Os estudos elencados na literatura tratam dos diversos modelos para análise do fluxo de tráfego até as análises de simulações da operação do tráfego considerando os VAs. Assim, Dresner & Stone (2004) utilizando uma abordagem multiagente analisam os resultados do gerenciamento de VAs em uma interseção, na diminuição dos congestionamentos; Dresner & Stone (2008) apresentam um mecanismo de controle de interseção chamado *Autonomous Intersection Management* (AIM), para gerenciar um grande número de veículos autônomos em interseção; Fajardo *et al.* (2011) avaliaram um mecanismo de controle de interseção automatizado chamado protocolo *first-come, first-served* (FCFS); Lee & Park (2012) pesquisam a relação do ambiente com veículos conectados, apresentando o algoritmo *Cooperative Vehicle Intersection Control* (CVIC), que permite a cooperação entre veículos e infraestrutura para operações e gerenciamento eficazes de interseção; Carlino *et al.* (2013) propõem um esquema descentralizado de gerenciamento de interseções autônomas baseado em leilão que reflete a variação no valor do tempo dos viajantes; Li *et al.* (2013) modelam o algoritmo chamado *autonomous control of urban traffic* (ACUTA) no VISSIM; e Zhu & Ukkusuri (2015) desenvolvem uma nova formulação de programação linear para controle de interseção autônoma, que contabiliza a dinâmica do tráfego em um ambiente de veículo conectado.

Também focando nos VAs, Rajamani *et al.* (2000) apresentam um sistema de controle longitudinal e lateral integrado para a operação de veículos automatizados em pelotões de oito veículos, com operação contínua de 6 a 8 horas por dia e por três semanas consecutivas, desenvolvendo um sistema capaz de realizar um controle preciso de velocidade e espaçamento e manter a faixa precisa, além de fornecer excelente qualidade de condução. Outros estudos utilizam de simulações para analisar a operação do tráfego, focando na comunicação entre os veículos em um pelotão (FERNANDES & NUNES, 2012; ILGIN GULER *et al.*, 2014;

AMOOZADEH *et al.*, 2015; TALEBPOUR & MAHMASSANI, 2016; ZHENG *et al.*, 2016). Amoozadeh *et al.* (2015) desenvolveram um protocolo de gerenciamento de pelotão para veículos, parcialmente automatizados, com base em comunicação sem fio através da  *Vehicular Ad-hoc Network* (VANET), para realização de manobras básicas. Para testar esse protocolo foi utilizado o simulador VENTOS, desenvolvido com base no *software* SUMO e OMNET++/Veins.

As condições e situações de tráfego misto, em que são avaliados a operação com veículos convencionais (motorista humano) e autônomos e também o conceito de veículo conectado para uma comunicação entre os veículos (V2V) são apresentados na literatura (LEVIN & BOYLES, 2016; MAHMASSANI, 2016; STERN *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2016).

Ainda, Wang *et al.* (2015) apresentam uma abordagem preditiva para o controle unificado de mudança de faixa e de *car-following*, gerando sequências e acelerações de mudança de faixa previstas aplicável para sistemas de veículos autônomos conectados. Le Vine *et al.* (2015) analisam a dinâmica de aceleração/desaceleração do VAs relacionado ao conforto dos passageiros, avaliando a experiência de viagem dos ocupantes, com uso de microsimulação de tráfego misto, utilizando o *software* VISSIM.

Esses estudos mostram o desenvolvimento dos modelos para análise do fluxo de tráfego até as análises de simulações da operação do tráfego, focando na comunicação entre os veículos em um pelotão, e o uso de VAs em tráfego misto, que é um dos focos deste estudo. Sendo que uma simulação com pelotão de veículos autônomos, deve-se considerar parâmetros como a taxa de penetração, o tamanho da frota, tempo de operação, e aspectos do tráfego misto, aspectos que devem ser considerados no método a ser adotado neste documento.

## **2.5. OPERAÇÃO DE VEÍCULOS COMPARTILHADOS AUTÔNOMOS ELÉTRICOS E TRANSPORTE PÚBLICO RESPONSIVO À DEMANDA**

Os serviços de mobilidade sob demanda têm crescido nos últimos anos, como o compartilhamento de bicicletas e caronas, oferecendo aos usuários mais flexibilidade nos seus deslocamentos nas cidades (ALAZZAWI *et al.*, 2018). Assim, os estudos sobre veículo compartilhado autônomo elétrico (VCAEs) procuram avaliar os benefícios de um serviço de

assinatura ou pagamento sob demanda, pelo menos em áreas onde a densidade populacional torna tais sistemas economicamente viáveis, com o objetivo de diminuir o número de viagens por carros privados (FAGNANT & KOCKELMAN, 2014; FAGNANT *et al.*, 2016; KATSUKI & TANIGUCHI, 2017).

Além disso, esta forma de mobilidade permite aqueles que possuem algum impedimento para conduzir um automóvel, como deficientes, menores de idade e idosos, ou até os que não possuem carteira de habilitação, a poderem se locomover utilizando o automóvel ocasionalmente. Também por não haver necessidade de dirigir, o cliente do sistema pode realizar outras atividades durante sua viagem com segurança. Cada veículo compartilhado autônomo (VCA) também pode mover-se (desocupado) para o próximo viajante ou deslocar-se enquanto estiver desocupado para um local mais favorável, para estacionamento de baixo custo e serviço de passageiro futuro mais rápido. Com isso a necessidade de estacionamentos é reduzida, resolvendo o problema em que apesar da grande frota de automóveis particulares, estes se encontram em sua maior parte do tempo ociosos estacionados (ANDERSON *et al.*, 2014; FAGNANT & KOCKELMAN, 2015).

Fagnant & Kockelman (2014) um modelo baseado em agente para operações de veículos autônomos compartilhados (SAV), concentrando-se nas viagens e nas implicações ambientais da frota. A partir de modelagem de cenários, o estudo indica que um sistema de SAVs pode muito bem economizar em dez vezes o número de carros que seriam necessários em viagens de veículos individuais próprios, mas geraria em cerca de 11% mais viagens, para chegar até o passageiro.

Zhang *et al.* (2015) estimaram os vários níveis de estacionamento em sistemas com SAV, caracterizados por tamanhos de frota e tempos de espera de passageiros variados, sendo essas estimativas fundadas em um modelo baseado em agente de uma cidade hipotética, programado em Matlab. Os resultados da simulação indicam a quantidade de vagas de estacionamento economizadas em comparação com os sistemas convencionais. Um VCA será capaz de substituir cerca de 14 veículos de propriedade privada, ou ainda mais quando o nível de vontade de compartilhar for maior. Aproximadamente 90% da demanda de estacionamento para os clientes participantes pode ser reduzida após a implantação do sistema SAV, e com sistema de carona pode reduzir ainda mais a demanda de estacionamento em um ponto percentual.

Chen *et al.* (2016), usando de base o estudo de Fagnant & Kockelman (2014), exploraram o gerenciamento de uma frota de VCAEs, analisando a operação e impactos destes veículos com modelo baseado em agente executado em vários cenários.

Fagnant & Kockelman (2018), também se baseando no estudo de Fagnant & Kockelman (2014), investigam as operações de VCA usando uma estrutura de simulação baseada em agente, no MATsim. Neste estudo foi considerado o compartilhamento dinâmico de viagens (DRS - *dynamic ride-sharing*) que agrupa vários viajantes com origens, destinos e horários de partida semelhantes no mesmo veículo, o que pode auxiliar no excesso de quilômetros percorridos por veículo. Assim, na simulação, o excesso de quilômetros foi reduzido de 8,7% para 4,5%, podendo também reduzir o tempo de espera, principalmente em horários de pico, de 9,0 min a 4,5 min, e também a média do serviço (espera mais tempo no veículo) também melhorou, de 15,0 min para 14,7 min, mesmo com custos de tempo de rota indireta e o tempo gasto para pegar ou deixar outros passageiros.

E em relação a documentos relativos ao Transporte Público Responsivo à Demanda (TPRD) em Brasília (Distrito Federal), existem dois estudos relevantes (BRASIL, 2019; FURTADO, 2017). Furtado (2017) utilizando-se de pesquisa de Preferência Declarada analisa os requisitos de aceitabilidade do Transporte Coletivo Responsivo à Demanda para potenciais usuários no Distrito Federal. Já Brasil (2019) aborda o desempenho do TPRD no Distrito Federal, através de indicadores gerados em uma simulação multiagente baseada em atividades, com uso do *software* MATsim.

## **2.6. OPERAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NA ÚLTIMA MILHA DE VIAGENS DE TREM**

Apesar da implantação de VCAE auxiliar na redução de emissões, ao disponibilizar os veículos para aqueles que antes possuíam alguma limitação, acaba por aumentar o número de viagens, ocasionando um aumento de milhas percorridas, e também podendo aumentar o número de veículos em circulação.

Assim, com objetivo de minimizar estes problemas, de forma a promover uma mobilidade urbana sustentável, deve-se buscar soluções para atrair mais usuários ao sistema de transporte público, principalmente o transporte por trem/metrô. Uma das soluções propostas na literatura

foca-se em fornecer um serviço de primeira e última milha para o transporte público usando VAs. Assim, ainda nos estudos levantados na revisão, dois deles abordam sobre o uso de VAs para a última milha de viagens de trem (LIANG *et al.*, 2016; YAP *et al.*, 2016).

Yap *et al.* (2016) estudaram o potencial dos VAs para as viagens de última milha entre uma estação de trem e o destino final dos viajantes, através de aplicação de questionário nos Países Baixos. Foi apresentado a opção de integração de trem com VA como uma alternativa de viagem multimodal ao lado de alternativas de viagem multimodal mais comuns existentes (Figura 2.5). Foi concluído que especialmente para os viajantes de trem de primeira classe, a introdução de VAs como novo modo de transporte entre a estação de trem e o destino final tem potencial. No entanto, pelos resultados é perceptível que os passageiros não percebem essa vantagem teórica, pelo menos ainda não. Essa percepção talvez seja devido à falta de experiência real de viajar em um veículo automatizado, ou ao fato da última milha ser apenas uma parte relativamente curta da viagem total dos entrevistados.

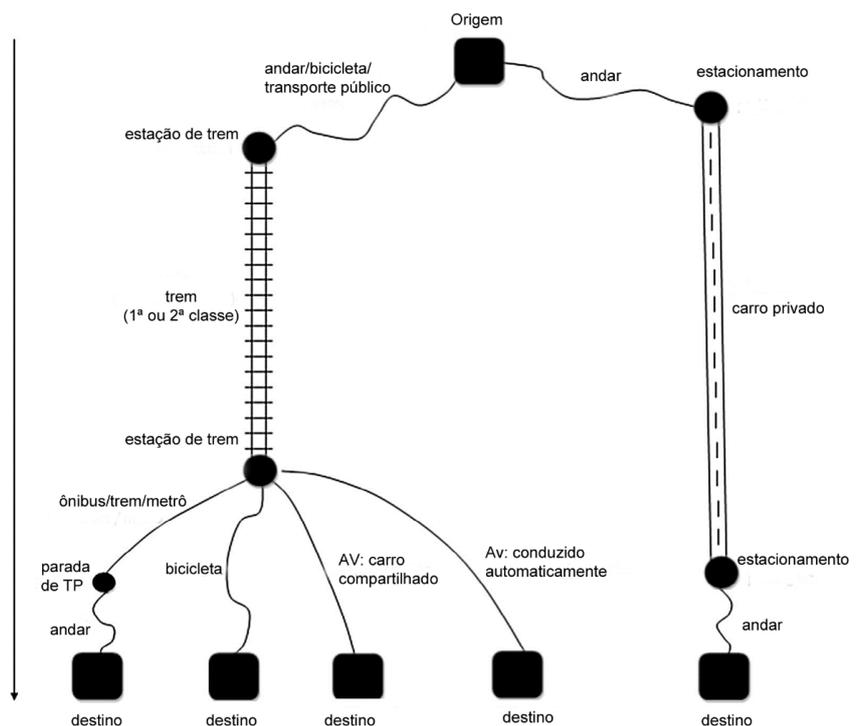


Figura 2.5 – Visão geral das alternativas de viagem incorporadas ao experimento do estudo de Yap *et al.* (2016)

Fonte: Adaptado de Yap *et al.* (2016)

Já Liang *et al.* (2016) analisam o potencial do uso de táxis automatizados (ATs) como uma conexão de última milha em viagens de trem, utilizando de uma abordagem de otimização para definir a área de serviço de um sistema AT que satisfaz as solicitações dos passageiros para acessar ou sair de uma estação de trem. O sistema ATs é baseado na pré-reserva obrigatória, sendo que a viagem solicitada pode ser aceita ou rejeitada a fim de maximizar o lucro do sistema. São definidos dois modelos: S1 em que permite ao sistema selecionar livremente as viagens de acordo com a maximização do lucro; e S2 considera que todas as viagens solicitadas de/para as zonas atendidas devem ser satisfeitas, mas não significa que todas as solicitações serão atendidas, porque as zonas também devem ser selecionadas pelo modelo.

Os dois modelos (LIANG *et al.*, 2016) foram estabelecidos com o objetivo de maximizar o lucro diário desse sistema. São construídos quatro cenários com frotas com número de veículos diferentes (20, 40, 60 e 80 ATs) para cada modelo. Assim, o estudo fornece um modelo matemático para planejar um sistema AT baseado em reservas de última milha para o acesso às estações de trem. Ao comparar os dois modelos, no modelo S1, quando o sistema está livre para escolher solicitações de atendimento, o lucro diário é sempre maior ao comparar com o modelo (S2), e isso ocorre porque não pode rejeitar viagens inconvenientes para o sistema sem cancelar uma zona operacional inteira. Sendo que no estudo de caso, foi necessária uma frota de 20 ATs no S1 e uma de 60 ATs para obter o lucro máximo.

Sendo assim, estes dois estudos mostraram a eficiência do uso de VAs em fornecer um serviço de última milha para o transporte público de trem. O uso de veículos elétricos totalmente automatizados para alimentar esses sistemas de maior capacidade, com objetivo de levar mais pessoas ao transporte público é uma boa solução, melhorando a sustentabilidade do transporte (LIANG *et al.*, 2016). Portanto, os VAs são um meio potencial de aumentar a atratividade da viagem porta a porta, fornecendo um serviço de última milha que leva os viajantes da estação de trem até o seu destino final de maneira sustentável (YAP *et al.*, 2016).

## **2.7. TÓPICOS CONCLUSIVOS**

No presente capítulo foram apresentados os conceitos sobre VAs, os níveis de automação, que vai do nível 0, sem automação, até o nível 5, automação de direção completa. Foram abordados

os benefícios e desvantagens dos VAs, o status do desenvolvimento desta tecnologia em alguns países, abordando também sobre o Brasil.

A revisão da literatura possibilitou identificar as linhas de pesquisas referentes aos VAs, estudos com VCAEs relacionados com o compartilhamento relevantes para os VEs, e estudos sobre transporte público responsivo à demanda. Finalmente foram apresentados dois estudos que focam na operação de VAs na última milha de viagens de trem. A partir desses estudos, consegue-se verificar as potencialidades da integração de veículos compartilhados autônomos elétricos com o sistema de transporte público por trem/metrô.

Entretanto, uma avaliação dos resultados desta integração em vários cenários torna-se necessária utilizando-se de simulação, a fim de poder quantificar os seus impactos e assim gerar subsídios para promover uma mobilidade urbana sustentável. Nesse sentido, o próximo capítulo traz o procedimento metodológico para fins de avaliação da implantação de veículos compartilhados, podendo ser autônomo e elétrico, junto de um sistema de metrô na primeira e última milha de entrada e saída das estações.

### **3. MÉTODO**

#### **3.1. APRESENTAÇÃO**

Neste capítulo é descrito o método para avaliação dos impactos da integração dos veículos compartilhados no sistema de transporte público por metrô de uma área de estudo. O método utiliza-se de simulação por cenários que consideram a situação inicial com veículos convencionais e novos cenários substituindo veículos particulares por viagens em veículos compartilhados integrados na primeira e última milha em estações do metrô da área de estudo.

#### **3.2. CONSIDERAÇÕES DE APLICAÇÃO DO MÉTODO**

No desenvolvimento do método é necessário estabelecer alguns pressupostos, a fim de distinguir aquilo que será objeto e o que não será objeto da aplicação.

Parte-se do pressuposto de que existem usuários que estarão dispostos a substituir sua viagem em veículo particular por uma viagem em veículo compartilhado integrado ao sistema de transporte público por metrô, considerando uma taxa de penetração de 100%.

Também, pressupõe-se que existem individuais que moram na área de influência de estação de metrô (origem), mas que não utilizam o metrô e preferem utilizar o seu veículo particular para se locomover até o local final (destino) de sua atividade principal.

Ainda serão desconsiderados aspectos relacionados com os fatores comportamentais de aceitabilidade de utilização dos VAs, como por exemplo, disposição e conforto do usuário na escolha de VAs compartilhados.

Pressupõe-se também que os usuários tenham acesso a uma plataforma intermodal de Mobilidade como um Serviço (*Mobility as a Service* - MaaS), na qual está incorporado o serviço proposto no estudo, com viagens em veículos compartilhados integrado com o metrô na última e primeira milha.

Para as simulações dos cenários base, serão consideradas somente as viagens feitas com veículos particulares, desconsiderando a influência de outros modos de transportes. Nos

cenários com veículos compartilhados, viagens que antes eram feitas com veículos particulares, até um determinado destino, serão convertidas em pessoas solicitando veículos compartilhados. Assim, para as simulações realizadas, os efeitos na rede viária pelos modos de transportes como motos, bicicletas, ônibus, caminhões, entre outros serão desconsiderados. Isto é as condições de tráfego misto não foram consideradas nos cenários de simulação.

### 3.3. ESTRUTURA DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO

O método proposto é dividido em seis etapas, como apresentado na Figura 3.1, e descrito nos itens seguintes.

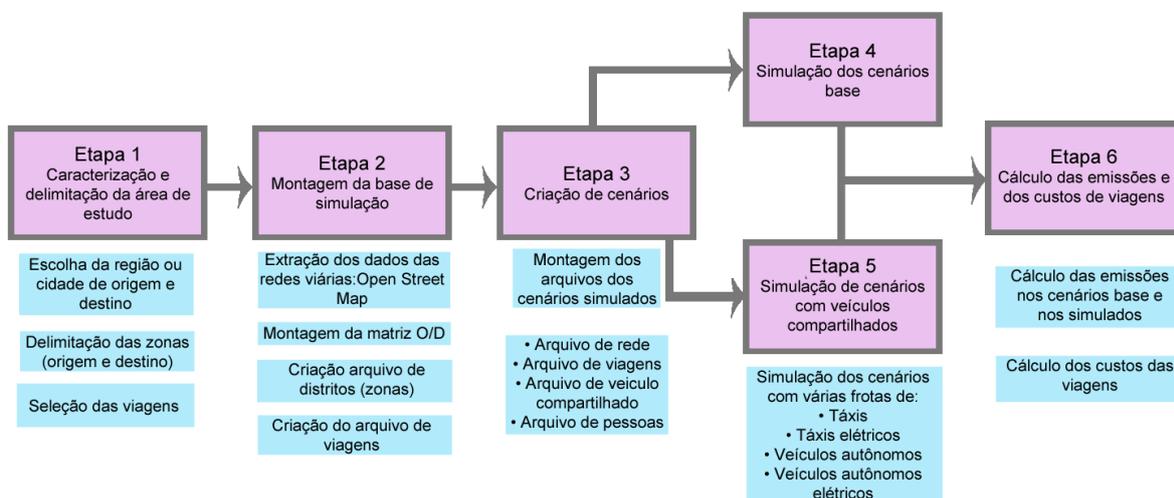


Figura 3.1 – Etapas do método da pesquisa

### 3.4. ETAPAS DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO

Nesta seção as cinco etapas do método são descritas, com suas respectivas considerações.

#### 3.4.1. Etapa 1 – Caracterização e delimitação da área de estudo

A etapa 1 consiste na caracterização e delimitação da área de estudo. Para a delimitação desta área, deve-se escolher as regiões, áreas, ou zonas de tráfego de origem e destino das viagens, que possuem um sistema metroviário que permite viagens entre elas. Em seguida, dentro da área de estudo, deve-se selecionar estações de metrô na origem e no destino. Para a definição da área de influência destas estações, deve-se definir isócronas de tempo, que determinam a partir da estação escolhida as zonas com determinado tempo de deslocamento, ou seja, o

tempo de acesso até a estação. Deve-se analisar as viagens nas zonas no interior destas áreas de influência.

Para identificação dos potenciais usuários do sistema integrado de veículos compartilhados com o metrô, serão utilizados os moradores que se encontram nas zonas dentro das isócronas de tempo da Estação Origem com destino a zonas na isócrona da Estação Destino na hora de pico analisada, que se deslocam com veículo particular entre essas zonas. Apesar de existir oferta de infraestrutura metroferroviária (linha de metrô/trem e estações) acessível, o indivíduo realiza seu deslocamento utilizando veículo particular. Entende-se por veículo particular um carro de propriedade do passageiro para transporte individual, podendo ter mais de um ocupante, considerando a taxa de ocupação veicular da cidade analisada. A representação de como delimitar a área de estudo pelas isócronas e os dois tipos de cenários simulados são esquematizados na Figura 3.2.

Ao se observar a Figura 3.2, no cenário base (a) a pessoa escolhe viajar da origem até o destino usando o veículo particular, e já no cenário com veículos compartilhados (b), a partir de uma plataforma, o usuário solicita um veículo compartilhado que o leva até a estação origem (primeira milha), viaja por metrô até a estação destino, e na estação destino solicita outro veículo compartilhado (última milha) até o seu destino. O sistema metroviário existe nos dois tipos de cenários, mas no primeiro tipo a pessoa faz a escolha de não usar o metrô.

Para os cenários simulados, os usuários que moram na área das isócronas da origem substituirão suas viagens de veículo particular por viagem com veículo compartilhado na “primeira” e “última milha” integrado com sistema metroviário. Para fins da simulação, parte-se do pressuposto que estes usuários se deslocam até a estação do metrô em veículo compartilhado, viajam de metrô até uma estação destino, desembarcam e utilizam um outro veículo compartilhado até o seu destino final.

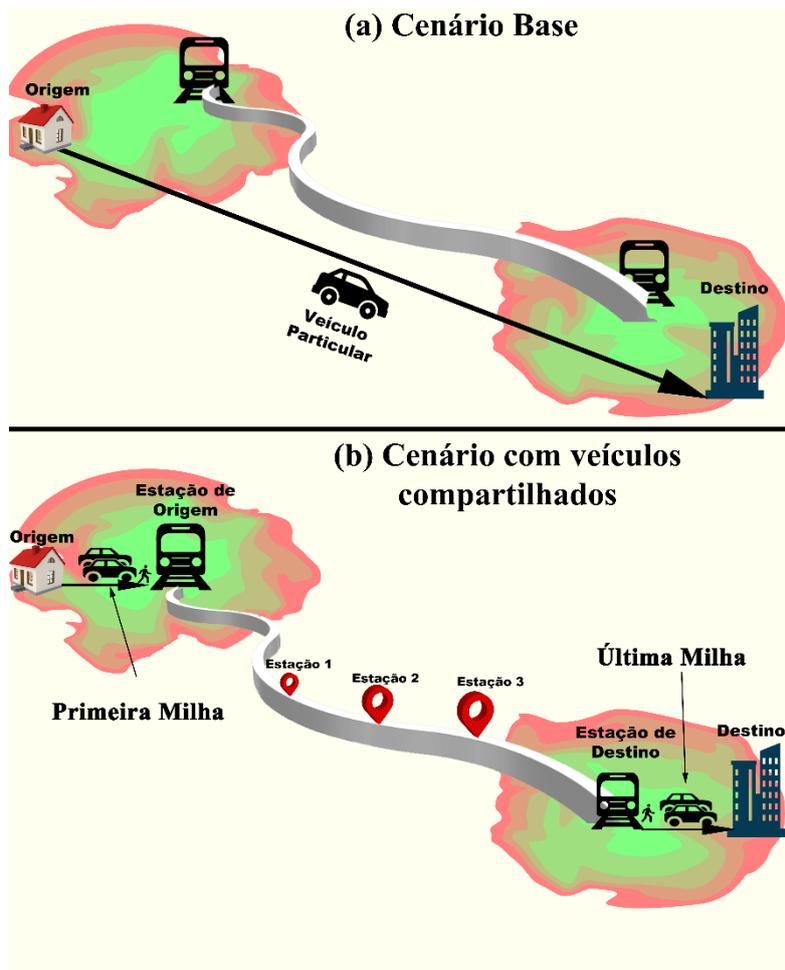


Figura 3.2 – Representação das simulações do cenário base e dos cenários com veículos compartilhados

### 3.4.2. Etapa 2 – Montagem da base de simulação

Para a simulação dos cenários recomenda-se o *software* SUMO (ECLIPSE, 2021), uma ferramenta de código aberto para simulação microscópica de trânsito. Para a simulação é necessário como dados de entrada os arquivos da rede viária e da matriz origem-destino da área de estudo. O arquivo da rede viária pode ser obtido no *OpenStreetMap*. A linha de comando *netconvert* deve ser aplicada para simplificar a rede importada e converter o formato de arquivo “.OSM” para “.NET.XML” (formato suportado no SUMO). Para os dados de viagens da área de estudo, deve-se buscar uma fonte para prever a demanda de mobilidade na forma de uma matriz origem-destino (O/D), que tenha o número de viagens entre as zonas dentro das isócronas definidas.

Os dados de zoneamento em um arquivo *shapefiles* podem ser importados em forma de polígonos com a linha de comando *polyconvert*. Em seguida, com o *edgesInDistricts.py*, como arquivo da rede viária e a lista de polígonos gerados pelo *polyconvert*, é possível gerar um arquivo “.taz” com todas as arestas que estão dentro da respectiva forma poligonal, criando assim o arquivo de distritos (zonas) das áreas de influência.

Deste modo, com os dados da matriz origem-destino e o arquivo de distritos, é criado o arquivo de viagens com o comando *od2trips*, com as bordas de origem e destino de cada viagem. A linha de comando *duarouter* verifica se existem rotas possíveis nas bordas geradas nas viagens pelo *od2trips*. Rotas inexistentes são corrigidas manualmente por bordas do mesmo distrito (zona) com rota existente.

### 3.4.3. Etapa 3 – Criação de cenários

São criados dois tipos de cenários (Quadro 3-1), o primeiro é o cenário base (C1) com os veículos convencionais, já o segundo tipo de cenário é com veículos compartilhados (C2) inseridos na simulação, substituindo viagens de veículos particulares por viagens integradas com o sistema público por metrô na primeira e última milha até um determinado destino. Neste segundo tipo de cenário serão gerados vários cenários, em que os veículos compartilhados são frotas de veículos compartilhados (C2-1), veículos compartilhados elétricos (C2-2), veículos compartilhados autônomos (C2-3), ou veículos compartilhados autônomos elétricos (C2-4), sendo gerado na simulação no SUMO um arquivo denominado de veículo compartilhado.

Quadro 3-1 – Tipos de Cenários de Simulação

Cenário	Código - Descrição
Cenário Base (C1)	C1 - Veículos Convencionais
Cenário Compartilhado (C2)	C2-1 - Veículos compartilhados (VC) C2-2 - Veículos compartilhados elétricos (VCE) C2-3 - Veículos compartilhados autônomos (VCA) C2-4 - Veículos compartilhados autônomos elétricos (VCAE)

Para se gerar este segundo tipo de cenário, devem-se selecionar as viagens com veículos particulares do cenário base que possuem como origem as zonas dentro da isócrona da estação origem a ser analisada e como destino as zonas da isócrona da estação destino. Em seguida

estes veículos são substituídos por pessoas solicitando veículos compartilhados, criando o arquivo de pessoas. Para se converter viagens em pessoas, deve-se considerar a taxa de ocupação dos veículos.

#### **3.4.4. Etapa 4 – Simulação dos cenários base**

Para a simulação dos cenários base das zonas de origem e de destino, são inseridos os dados dos arquivos da rede viária e de viagens no comando para ser lido pelo *software* SUMO. Os cenários base são gerados com os dados de viagem no horário-pico. Assim, são gerados os dados de dois cenários base, sendo o primeiro nas zonas de origem e o outro nas zonas de destino.

#### **3.4.5. Etapa 5 – Simulação de cenário com veículos compartilhados**

Nesta etapa são simulados cenários em que haverá uma combinação entre veículos convencionais e veículos compartilhados, podendo ser: veículos compartilhados, veículos compartilhados elétricos, veículos compartilhados autônomo ou veículos compartilhados autônomo elétrico. Assim, é necessário inserir as diferenças entre os modos de viagens, sendo que os veículos compartilhados devem compor as escolhas na primeira e última milha no sistema de transporte público por metrô.

Com a determinação da área de influência da estação de origem, composta pelas zonas dentro das isócronas de tempo, os veículos compartilhados buscam potenciais usuários do sistema, com destino a área de influência da estação de destino. O serviço de transporte de primeira milha é feito pelo veículo compartilhando, levando a pessoa do seu domicílio até a estação de origem, em seguida o usuário viaja de metrô indo até a estação de destino mais próxima do local onde realiza suas atividades. Na última milha, outros veículos compartilhados são usados para transportar as pessoas da estação de destino até o destino final, tendo assim um serviço porta a porta.

#### **3.4.6. Etapa 6 – Cálculo das emissões e dos custos de viagem**

##### **a) Cálculo das emissões**

Para o cálculo das emissões são considerados os gases dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos (HC), material particulado

(MP) nas viagens de todos os veículos durante as simulações, apresentando, assim, as emissões acumuladas nos cenários gerados.

## b) Cálculo dos custos de viagem

O custo generalizado de viagem é uma medida que combina todos os atributos principais relacionados à desutilidade de uma viagem, e pode ser considerado em termos de unidades de distância, tempo ou dinheiro, sendo preferível em unidades de tempo (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011). Assim, este custo é definido pela função linear:

$$C_{ij} = a_1 \cdot t_{ij}^v + a_2 \cdot t_{ij}^w + a_3 \cdot t_{ij}^t + a_4 \cdot t_{ij}^n + a_5 \cdot F_{ij} + a_6 \cdot \phi_j + \delta \quad (1)$$

Onde:

$t_{ij}^v$  é o tempo de viagem no veículo entre i e j;

$t_{ij}^w$  é o tempo de caminhada de e para as paradas (estações) ou da área / estacionamento;

$t_{ij}^t$  é o tempo de espera nas paradas (ou tempo gasto procurando uma vaga para estacionar);

$t_{ij}^n$  é o horário de intercâmbio, se houver;

$F_{ij}$  é uma cobrança monetária: a tarifa cobrada para viajar entre i e j ou o custo de usar o carro para essa viagem, incluindo pedágios ou taxas de congestionamento;

$\phi_j$  é um custo terminal (normalmente de estacionamento) associado à viagem de i a j;

$\delta$  é uma penalidade modal, um parâmetro que representa todos os outros atributos não incluídos na medida generalizada até agora, por exemplo, segurança, conforto e comodidade;

$a_{1..6}$  são pesos atribuídos a cada elemento de custo; eles têm dimensões apropriadas para a conversão de todos os atributos em unidades comuns, por exemplo, dinheiro ou tempo.

Para este modelo devem ser considerados para o cálculo de custos generalizados: os tempos de viagem, os tempos de caminhada, os tempos de espera, e as cobranças monetárias (custo tarifário) e custo de uso do carro particular (combustível).

## **4. APLICAÇÃO DO MÉTODO**

### **4.1. APRESENTAÇÃO**

Este capítulo apresenta a aplicação do método descrito no capítulo anterior, na região de Brasília, Distrito Federal. O método será aplicado nas viagens por veículo particular que se originam na área de influência da estação de metrô Terminal Ceilândia com destino a área de influência das estações do Plano Piloto. Sendo que a aplicação do método consiste em 5 etapas, apresentadas no capítulo anterior, com fluxograma apresentado na Figura 4.1. Não foi realizada calibração do modelo de simulação aplicado.

- Etapa 1 – Caracterização e delimitação da área de estudo
- Etapa 2 – Montagem da base de simulação
- Etapa 3 – Criação de cenários
- Etapa 4 – Simulação dos cenários atuais
- Etapa 5 – Simulação de cenário com veículos compartilhados

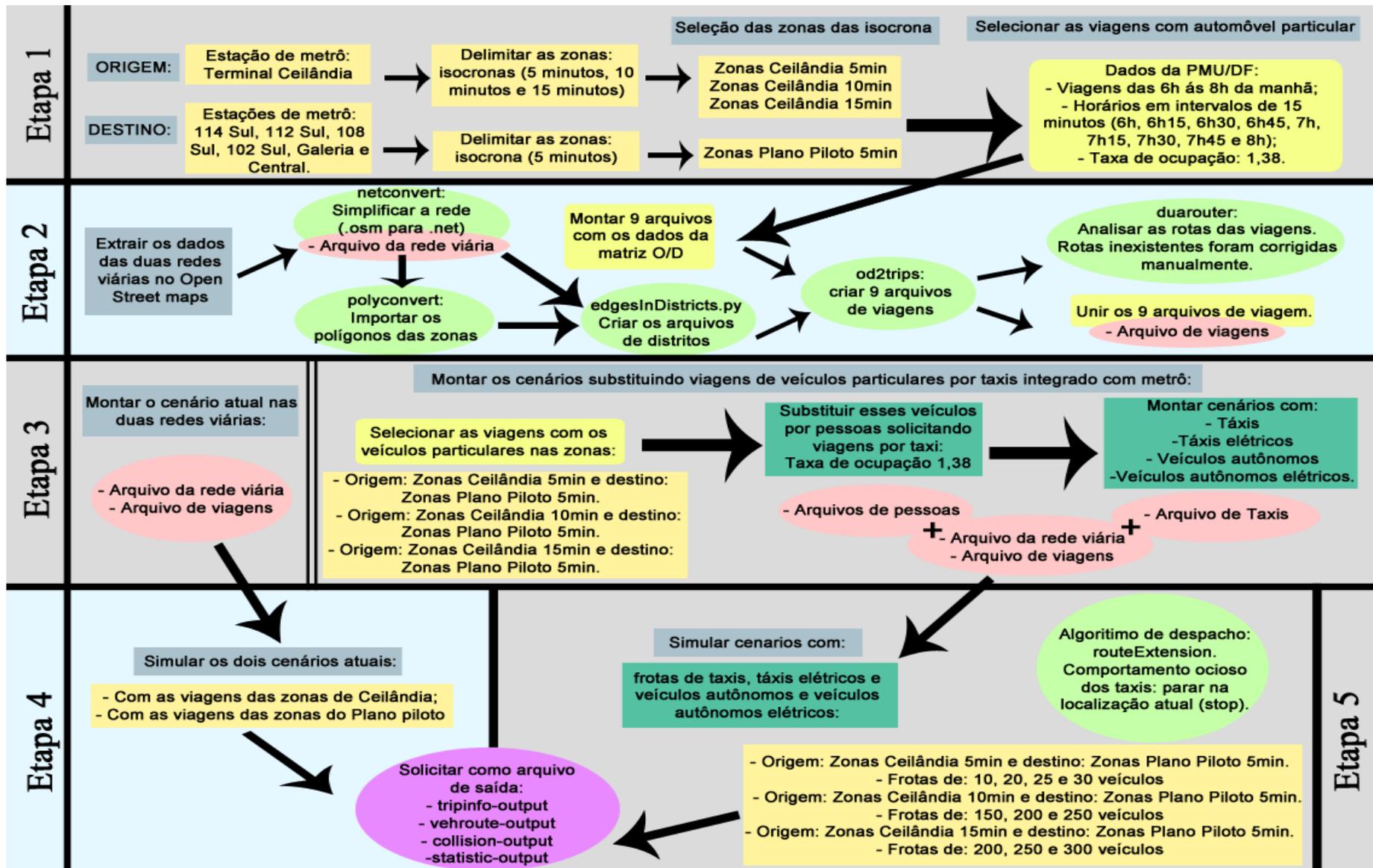


Figura 4.1 – Fluxograma da aplicação do método

## 4.2. ETAPA 1 – CARACTERIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A primeira etapa consiste em definir a área de estudo. Brasília se encontra no Distrito Federal (DF) na Região Centro-Oeste do Brasil, com uma extensão de 5.779 km<sup>2</sup>, e sendo dividido, atualmente, em 33 Regiões Administrativas (RA) (CODEPLAN, 2020). A área de estudo é delimitada pelas zonas de tráfego de origem/destino adjacentes às estações do metrô de Brasília, especificamente as localizadas na RA do Plano Piloto e da Estação Terminal localizada na RA de Ceilândia (Figura 4.2).

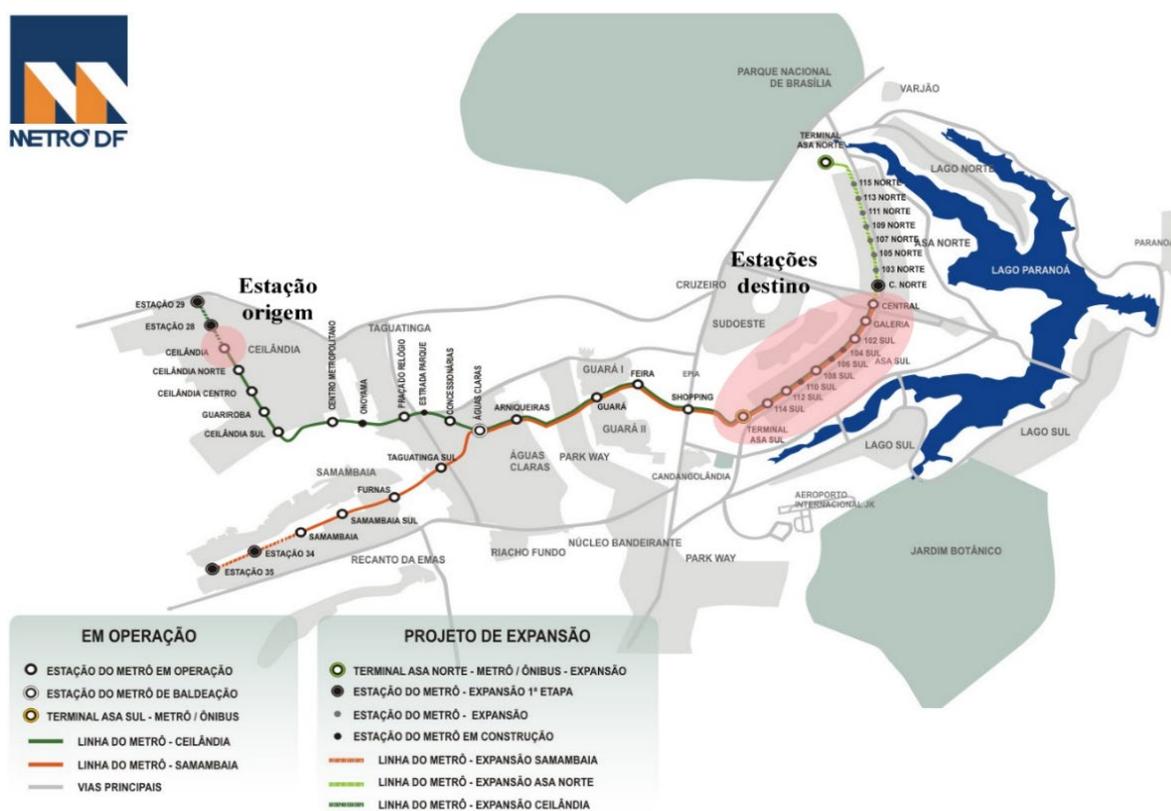


Figura 4.2 – Mapa do sistema de transporte público por metrô de Brasília (DF)

Fonte: adaptado de METRÔ-DF (2020)

Os dados das viagens, utilizados para montagem da matriz O/D dos usuários da Estação Terminal Ceilândia em direção às Estações do Plano Piloto, foram obtidas da Pesquisa de Mobilidade Urbana do Distrito Federal (PMU/DF) (METRÔ-DF, 2018a).

Para o estudo foi escolhido como origem das viagens às zonas que se encontram na área de influência da estação Terminal Ceilândia, isto é, as zonas localizadas dentro das isócronas de tempo de 5, 10 e 15 minutos respectivamente da estação (Figura 4.3). As isócronas foram

geradas pelo *plugin* Hqgis do QGIS, sendo que o tipo de cálculo de rota foi selecionado o balanceado, ou seja, equilibrando entre as rotas mais curtas e as mais rápidas. O modo de transporte foi automóvel e optou-se por restrição de tráfego, calculando as rotas no horário de 7 horas da manhã.

Como destino das viagens, no Plano Piloto, foram consideradas as estações: Terminal Asa Sul, 114 Sul, 112 Sul, 108 Sul, 102 Sul, Galeria e Central. A área de influência de cada estação corresponde às zonas que se encontram dentro da isócrona de tempo de 5 minutos da estação (Figura 4.4 e Figura 4.5). Após serem geradas as isócronas de cada estação, observou-se que a estação Terminal Asa Sul agregou poucas zonas em sua área de influência, motivo pelo qual foi descartada para análise, restando somente seis estações.

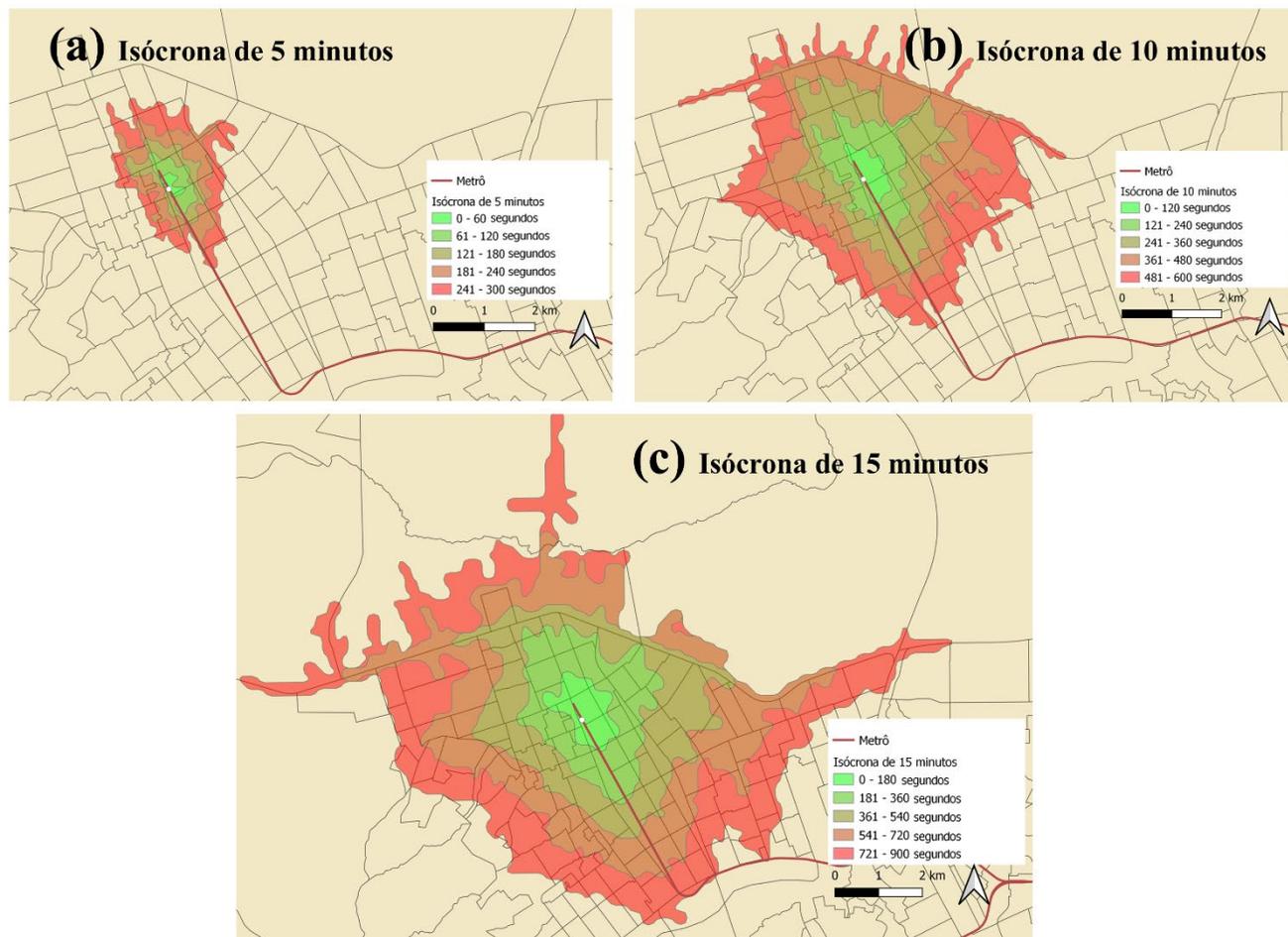


Figura 4.3 –Estação Terminal Ceilândia, Isócronas de (a) 5 min, (b) 10 min, e (c) 15 min

Fonte: Elaboração própria com dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a)

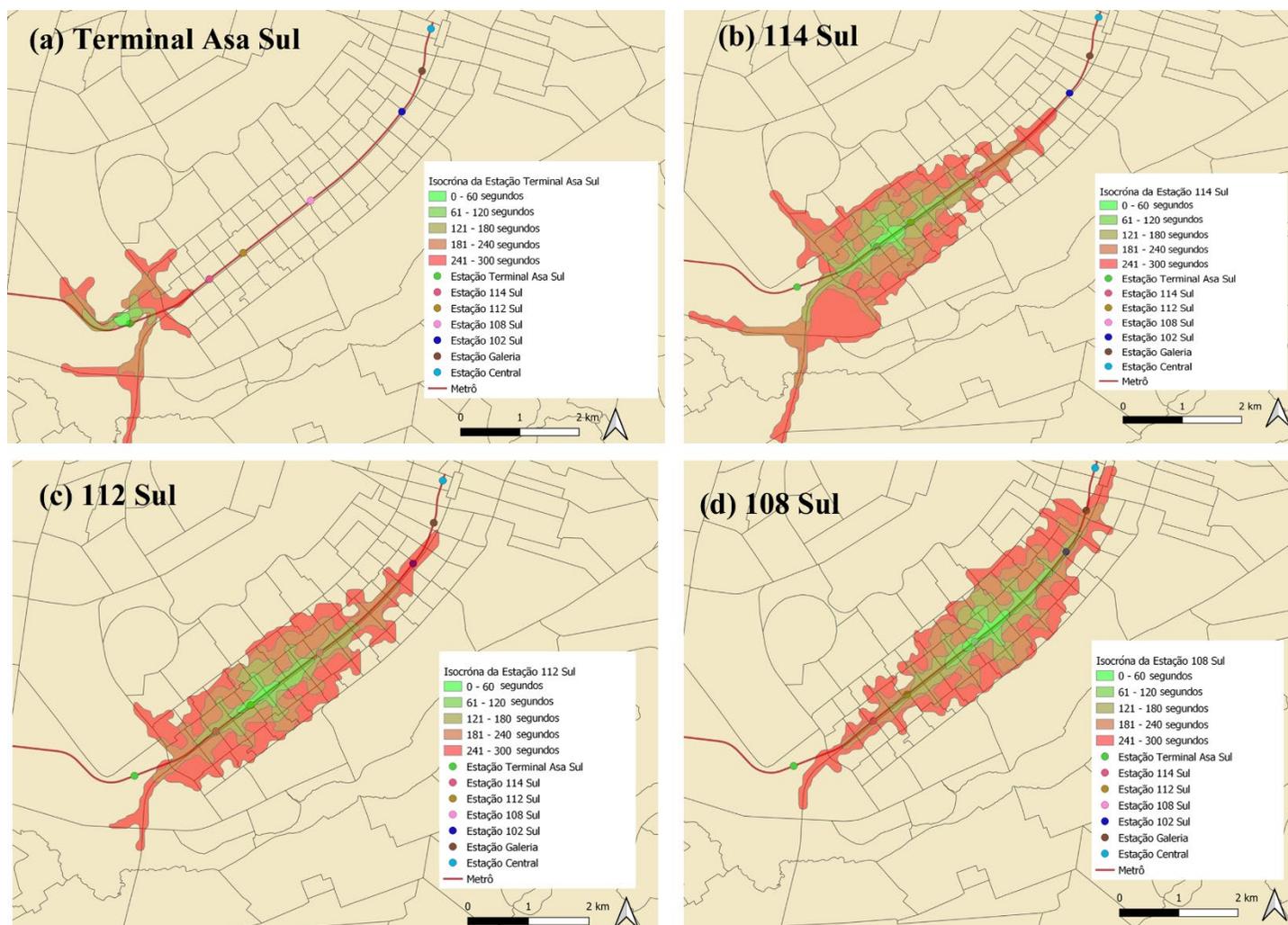


Figura 4.4 – Isócronas de 5 minutos das estações do Plano Piloto, (a) Terminal Asa Sul, (b) 114 Sul, (c) 112 Sul, (d) 108 Sul.

Fonte: Elaboração própria com dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a)

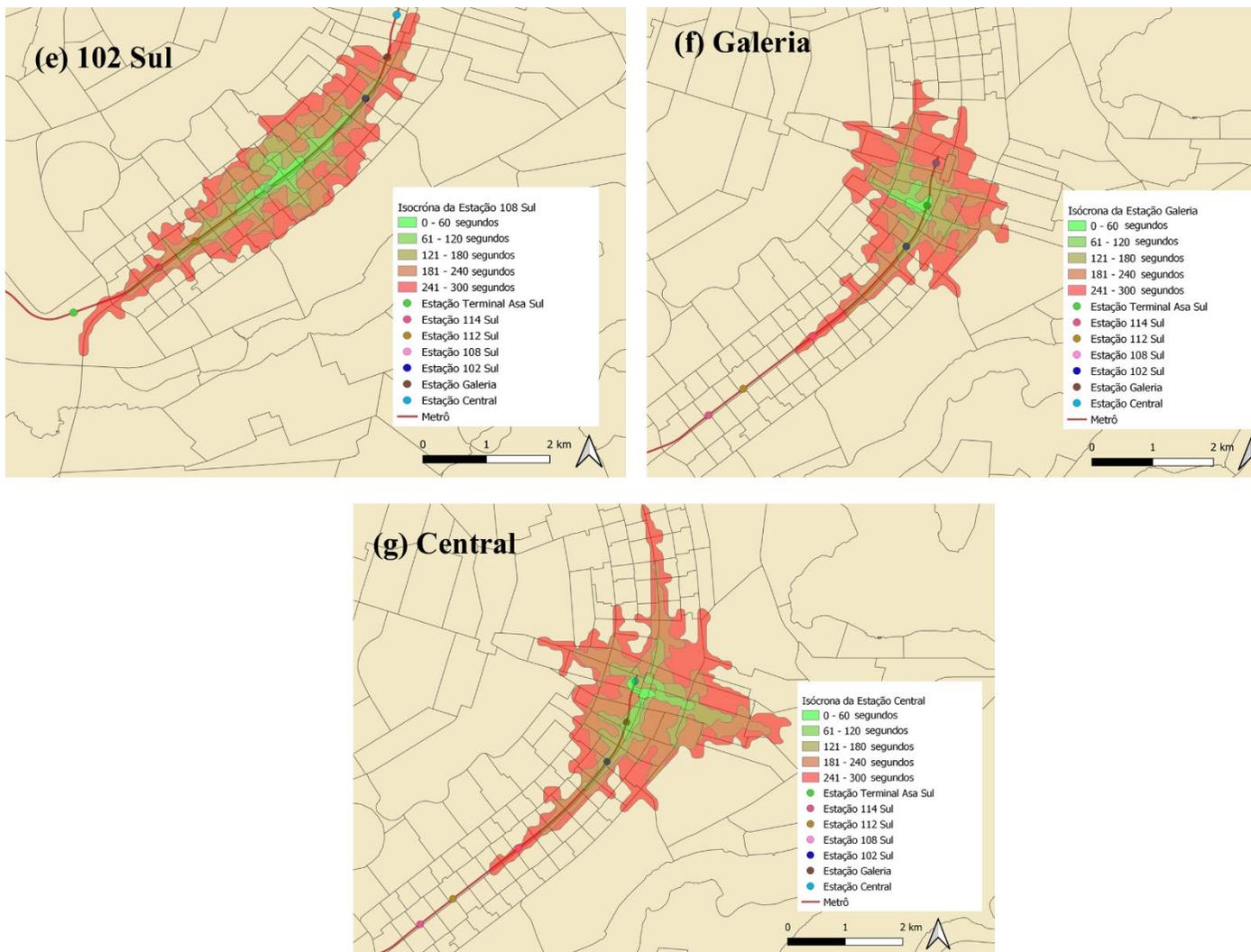


Figura 4.5 – Isócronas de 5 minutos das estações do Plano Piloto, (e) 102 Sul, (f) Galeria, e (g) Central.

Fonte: Elaboração própria com dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a)

Na Figura 4.6 é apresentada a distribuição das zonas de cada área de influência, sendo que a área de influência de 5 minutos é conformada pelas zonas de 5 minutos, a de 10 minutos é composta pelas zonas de 5 e 10 minutos, e a área de 15 minutos está constituída pelas zonas de 5, 10 e 15 minutos observadas na legenda da Figura 4.4. Sendo assim, a primeira área de influência, composta por todas as zonas no interior da isócrona 5 minutos, possui 17 zonas. Já a segunda área de influência, tendo as zonas a 10 minutos de distância da estação Terminal Ceilândia, tem ao todo 58 zonas. Por fim, a terceira área de influência, de 15 minutos, possui 114 zonas.

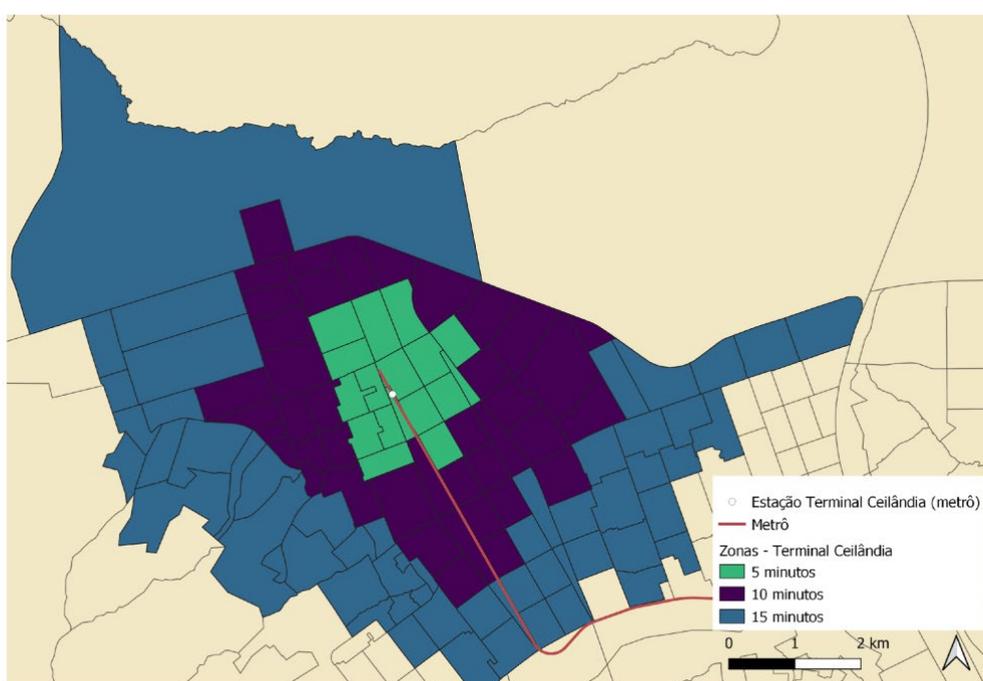


Figura 4.6 – Áreas de influência de 5, 10 e 15 minutos da estação Terminal Ceilândia

Fonte: Elaboração própria com dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a)

A mesma análise foi realizada na Figura 4.3, e assim com as isócronas de 5 minutos das estações do Plano Piloto, foi definido a área de influência de cada estação, e a distribuição destas áreas pode ser observada na Figura 4.7. Ao todo se tem 87 zonas na união das isócronas de 5 minutos das estações do Plano Piloto, e estão divididas em: área de influência da Estação 114 Sul, com 15 zonas ao todo; área de influência da Estação 112 Sul, com 14 zonas; área de influência da Estação 108 Sul, com 23 zonas; área de influência da Estação 102 Sul, 13 zonas; área de influência da Estação Galeria, 7 zonas; e área de influência da Estação Central, 15 zonas.

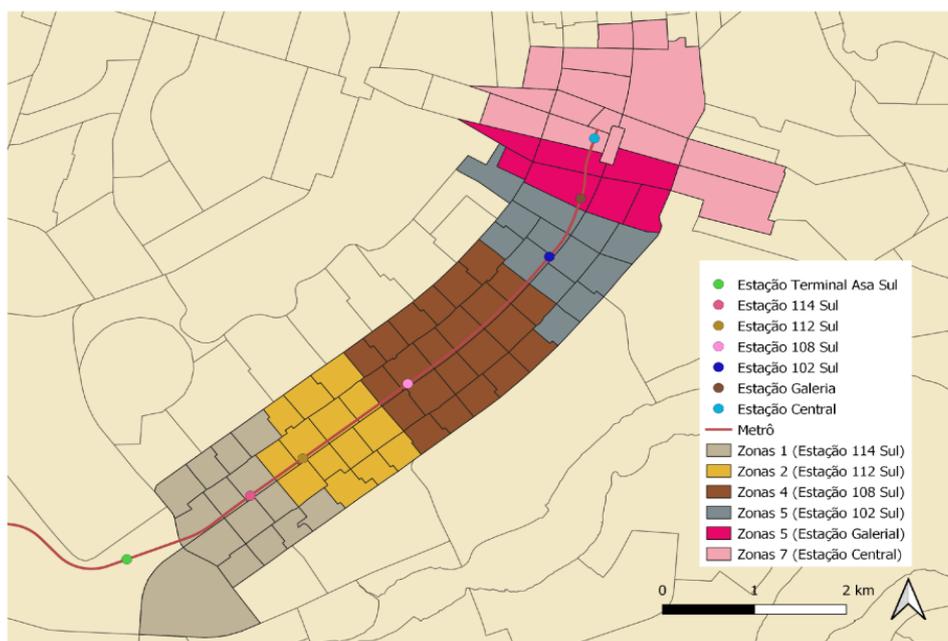


Figura 4.7 – Área de influência de 5 minutos das estações: 114 Sul, 112 Sul, 108 Sul, 102 Sul, Galeria e Central

Fonte: Elaboração própria com dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a)

Tendo as áreas de estudo delimitadas, são analisadas as viagens com automóvel particular e as viagens com metrô que ocorrem nas zonas nestas áreas. As viagens com automóvel particular são inseridas na simulação, e as viagens por metrô são utilizadas na análise dos resultados, de forma a calcular o aumento do número de viagens de metrô nos cenários simulados com veículos compartilhados. Para os dados de viagens, dos indivíduos que estão nas zonas das áreas de influência foi obtida a matriz origem-destino a partir dos dados da PMU/DF de 2016.

Neste estudo é importante analisar as viagens que se originam nas áreas de influência de Ceilândia, sendo analisado o horário pico das 6h às 8h. Também porque o estudo está focado em direcionar algumas viagens de veículo particular que se originam nesta região e substituir estas por viagens de veículos compartilhados. Assim na Figura 4.8 e Figura 4.9 é possível observar a distribuição por hora e a distribuição na hora pico manhã nas zonas das viagens tanto de veículo particular quanto de metrô nas zonas das áreas de influência de 5, 10 e 15 minutos da estação Terminal Ceilândia. Verifica-se que mesmo com a oferta do sistema de metrô nessas zonas, o uso de veículos particulares nas viagens que se originam nesta região é predominante.

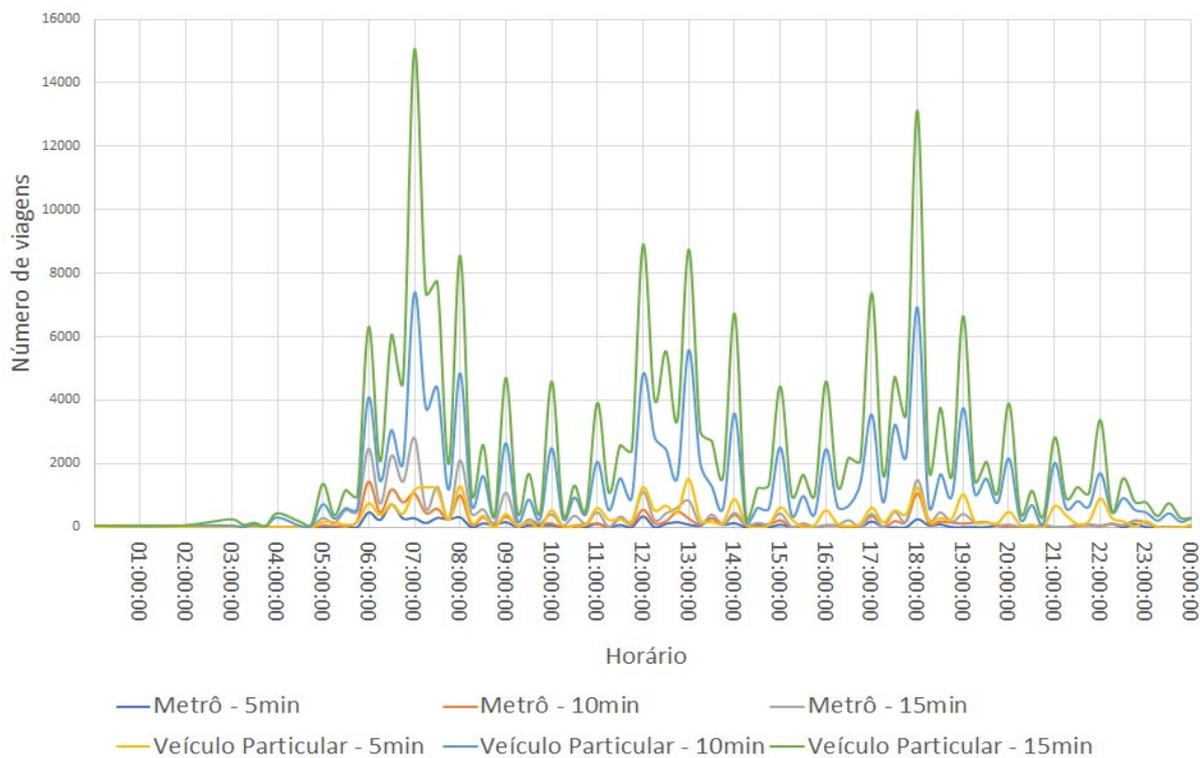


Figura 4.8 – Distribuição por horário das viagens por veículos particulares e metrô, com a origem na área de influência de Ceilândia

Fonte: Elaboração própria com dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a)

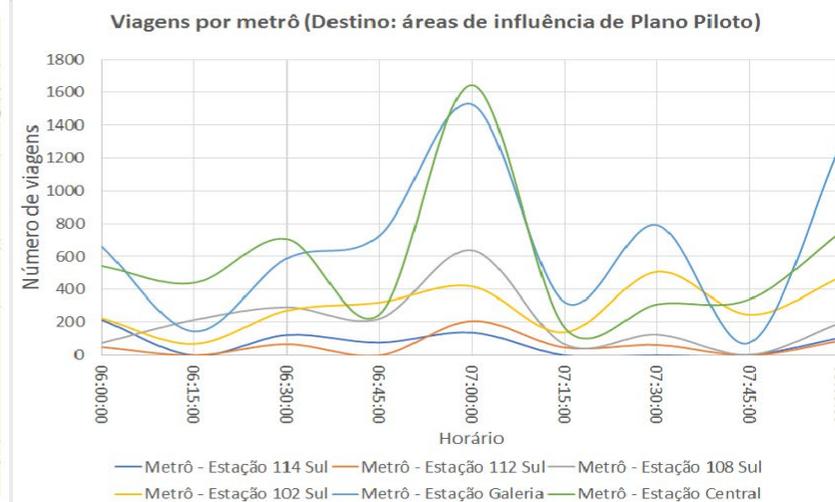
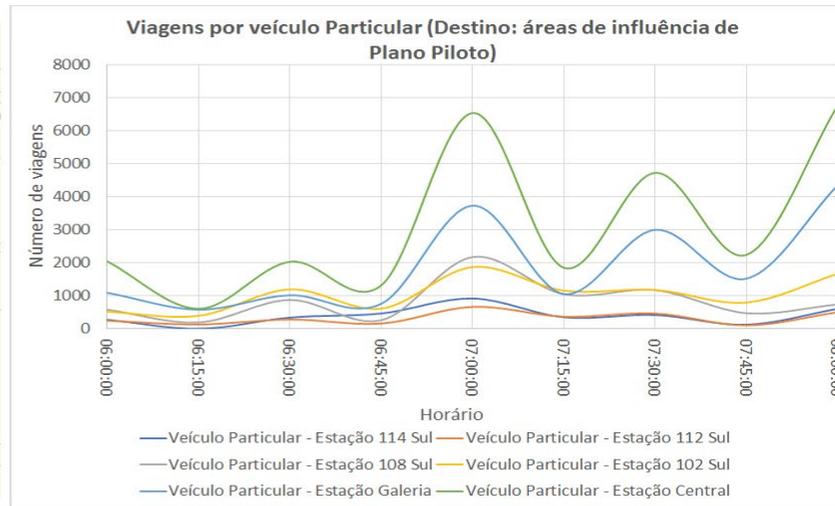
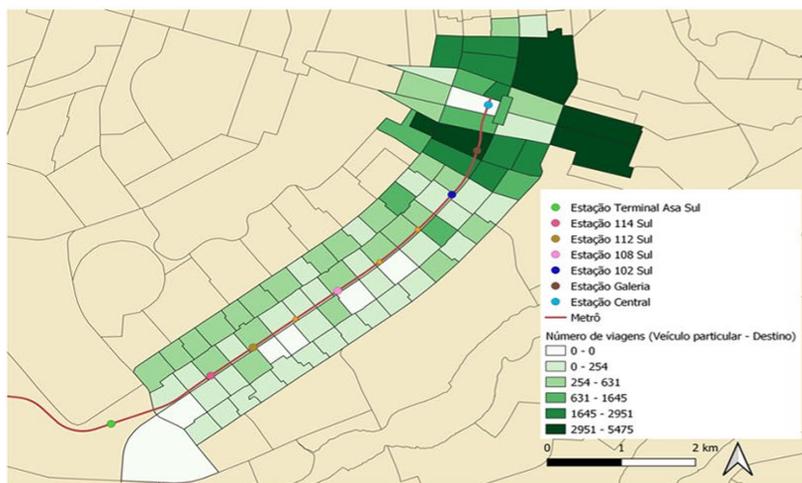


Figura 4.9 – Distribuição das viagens das 6h às 8h por veículo particular e metrô que tem como origem áreas de influências de 5, 10 e 15 minutos da estação Terminal Ceilândia

Fonte: Elaboração própria com dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a)

E nas áreas de influência do Plano Piloto, é importante analisar as viagens que se destinam a essas zonas, especialmente devido a este estudo estar focado no horário de pico das 6h às 8h, já que as zonas do Plano Piloto são polos geradores de viagens, em que atrai mais do que produz viagens neste horário. Também deve-se considerar que este estudo propõe substituir algumas viagens em veículos particulares com destino a essas zonas por veículos compartilhados. Desta forma, ao analisar a Figura 4.10 e Figura 4.11, novamente é possível observar que mesmo com um sistema de metrô implantando nessas áreas, é predominante o uso de veículos particulares nas viagens que se destinam a esta região.

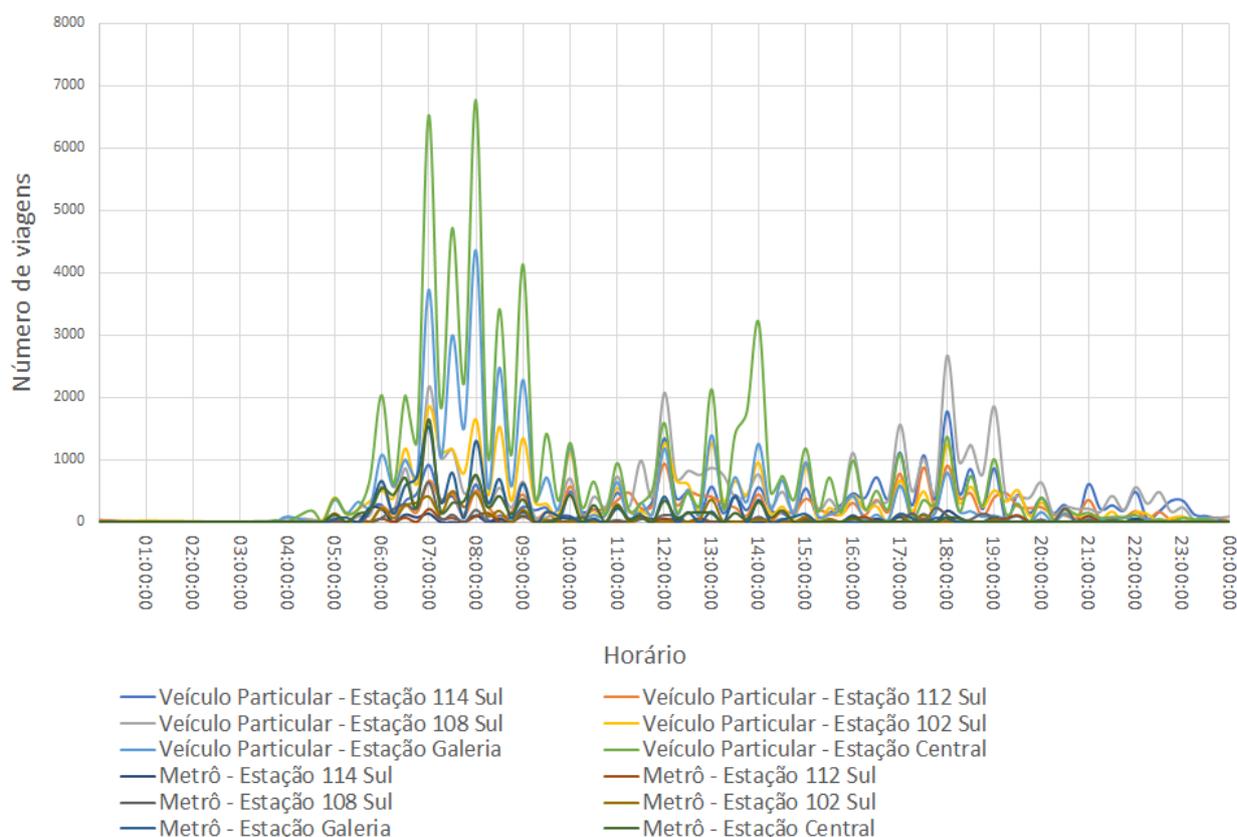


Figura 4.10 – Distribuição por hora das viagens por veículos particulares e metrô, com o destino na área de influência do Plano Piloto

Fonte: Elaboração própria com dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a)

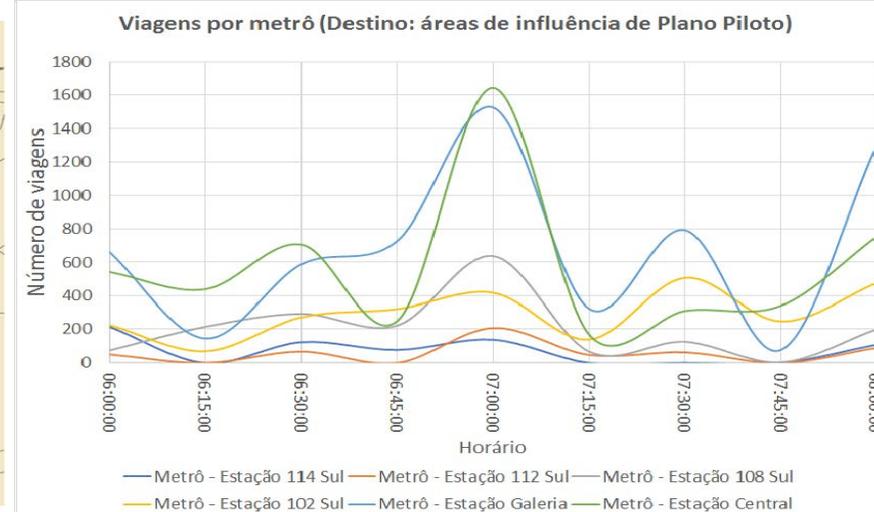
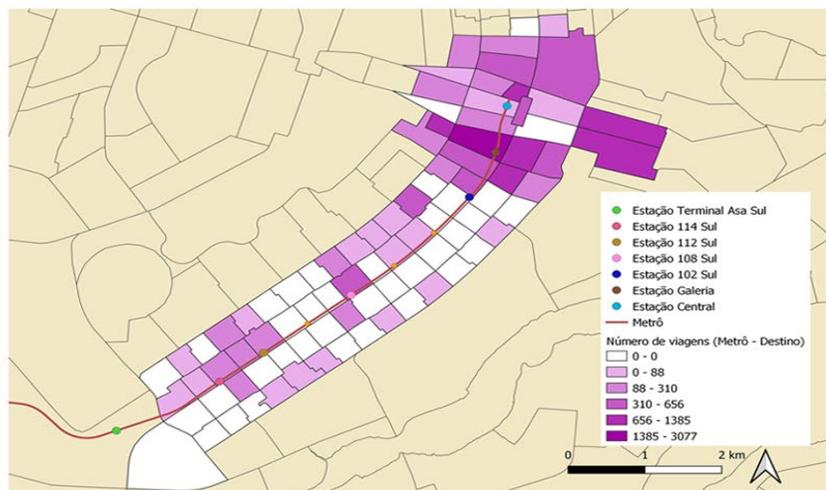
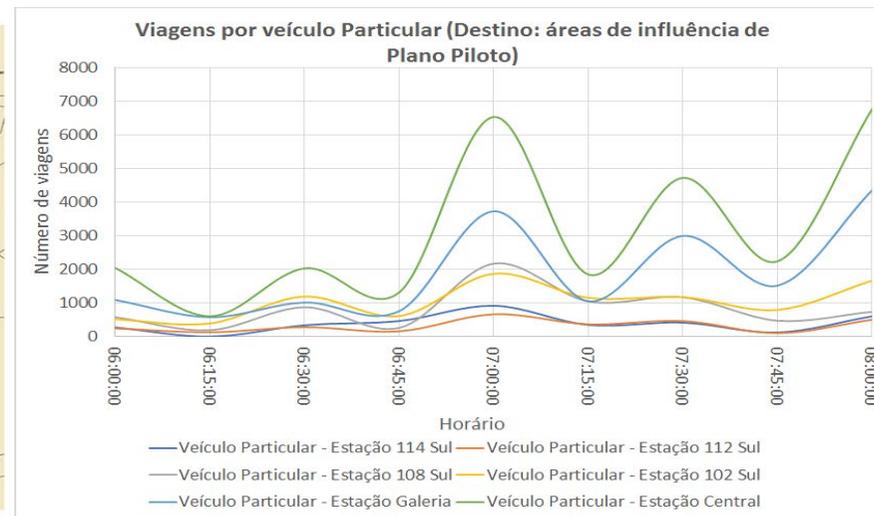
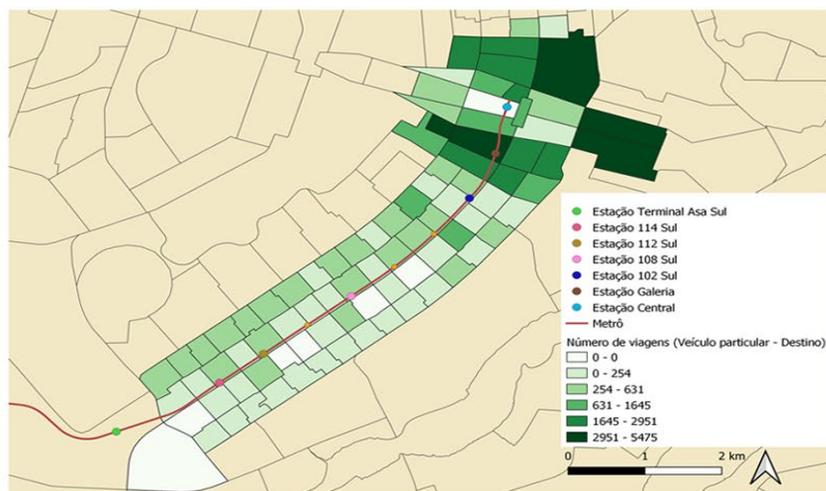


Figura 4.11 – Distribuição das viagens das 6h às 8h por veículo particular e metrô que tem como destino a área de influência de 5 minutos das estações do Plano Piloto

Fonte: Elaboração própria com dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a)

Para as viagens em automóvel particular, são filtradas as viagens de automóvel tanto como motorista quanto como passageiro. Para Brasília, a taxa de ocupação dos veículos particulares é 1,38124394103668, a partir dos dados da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a), sendo essa taxa usada para converter as viagens em veículos a serem inseridos na simulação.

Nas simulações dos cenários de Ceilândia, são consideradas as viagens que têm pelo menos a origem e/ou o destino em uma destas zonas, de modo a viabilizar a simulação de cenários mais próximos da realidade. Considerado a taxa de ocupação dos veículos, e arredondando o número de viagens dos dados da PMU/DF, na simulação do cenário atual, sendo distribuídos 53.003 veículos das 6h às 8h da manhã. O mesmo foi feito nas simulações dos cenários do Plano Piloto, com pelo menos a origem e/ou destino em uma das zonas da área de influência, obtendo-se 61.210 veículos a serem distribuídos entre 6h e 8h da manhã. Foram desconsideradas as viagens que tinham como Região Administrativa as opções: Externa ou alguma região da RIDE (Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno).

Para facilidade na simulação, os horários foram arredondados para intervalos de 15 em 15 minutos, assim, criando 9 matrizes origem destino para os horários de 6h, 6h15, 6h30, 6h45, 7h, 7h15, 7h30, 7h45 e 8h.

### **4.3. ETAPA 2 – MONTAGEM DA BASE DE SIMULAÇÃO**

Na etapa 2, após se delimitar a área de estudo, é possível extrair os dados das duas redes viárias no *OpenStreetMap*, contendo as zonas das áreas de influência de Ceilândia e do Plano Piloto. O formato do arquivo é *.OSM* (map.osm), que não é suportado pelo *software* SUMO, logo será necessário usar a linha de comando *netconvert* para converter para um arquivo *.NET.XML* (map.net.xml).

O uso do *netconvert* (Figura 4.12) nos dados da rede viária extraída do *OpenStreetMap*, além de converter o formato do arquivo, é possível realizar algumas simplificações na rede, principalmente removendo a rede cicloviária que causava interferências nas simulações de teste. Na Figura 4.13 é apresentada a rede viária das áreas de influência da Ceilândia, e na Figura 4.14 a rede viária das áreas de influência do Plano Piloto.

```
C:\Users\...>netconvert --type-files osmNetconv
ert.typ.xml,osmNetconvertUrbanDe.typ.xml --osm-files map.osm --output-file map.n
et.xml --geometry.remove --ramps.guess --junctions.join --junctions.join-dist 3
--tls.guess-signals --tls.discard-simple --tls.join --tls.default-type actuated
--remove-edges.by-vclass bicycle_
```

Figura 4.12 – Linha *netconvert* no prompt de comando



Figura 4.13 – Arquivo da rede viária das áreas de influência da estação Terminal Ceilândia

Fonte: Rede extraída do *OpenStreetMap*



Figura 4.14 – Arquivo da rede viária das áreas de influência da estação do Plano Piloto

Fonte: Rede extraída do *OpenStreetMap*

Com o arquivo *shapefile* de zoneamento da PMU/DF (METRÔ-DF, 2018a), usando a linha de comando *polyconvert* (Figura 4.15), é possível importar os polígonos das zonas das áreas de influência. Esse processo é necessário para a criação da matriz origem-destino, devido aos dados de viagens da PMU/DF estarem com a origem e destino nas zonas deste arquivo de zoneamento.

```
C:\Users\...>polyconvert --net-file map.net.xml
--shapefile-prefixes Zonas --shapefile.id-column ZONA --shapefile.add-param true
--shapefile.fill false --shapefile.traditional-axis-mapping true -o Zonas.poly
.xml --type taz _
```

Figura 4.15 – Linha *polyconvert* no prompt de comando

Assim, com arquivo dos polígonos das zonas (*Zonas.poly.xml*), o próximo passo é a criação do arquivo de distritos (Figura 4.16), sendo que distritos é a forma que o sumo se refere às zonas. Este arquivo contém o nome dos distritos e todas as bordas que se encontram nele, possibilitando a criação do arquivo de viagens. É necessário limitar a seleção das bordas em que são permitidas a classe de veículos *passenger*, que representam todos os veículos particulares convencionais. É necessária essa limitação para que no arquivo de distrito não sejam adicionadas bordas em que se permite somente pedestres (calçadas), por exemplo.

```
C:\Users\...>python edgesInDistricts.py -n map.net.xml -t Zonas.poly.xml --vclass passenger
```

Figura 4.16 – Linha *edgesInDistricts.py* no prompt de comando

No arquivo de distritos foi adicionado manualmente as Regiões Administrativas (RA) que possuíam como origem ou destino uma das zonas das áreas de influência estudadas no horário da simulação, das 6h às 8h. Para a escolha da borda das RAs, foi usado o *Google Maps* para analisar a rota, e assim foi escolhida a última borda desta rota que existe no arquivo da rede viária extraída do *OpenStreetMap*. Na Figura 4.17 apresenta a escolha das bordas das demais Regiões Administrativas na rede viária de Ceilândia e na Figura 4.18 a escolha das bordas na rede viária do Plano Piloto.

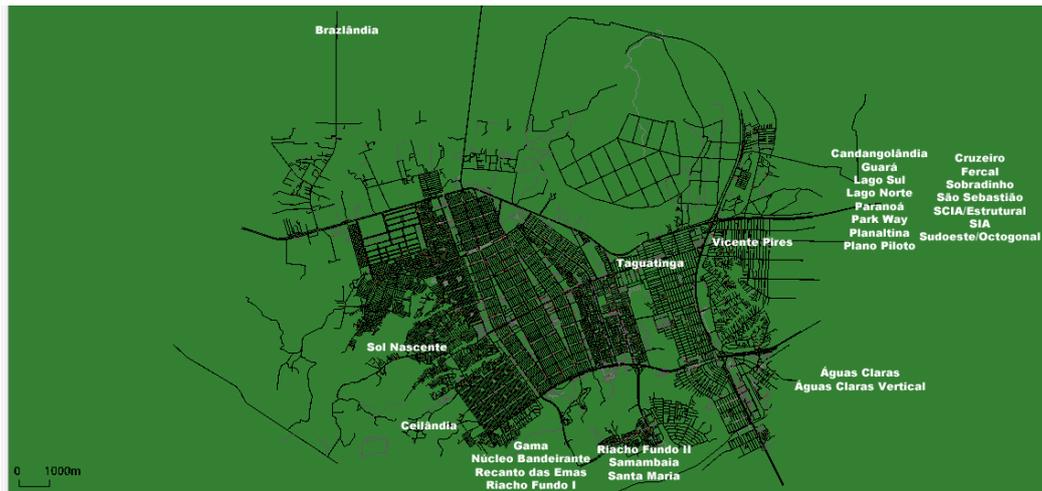


Figura 4.17 – Borda das Regiões Administrativas na rede viária de Ceilândia

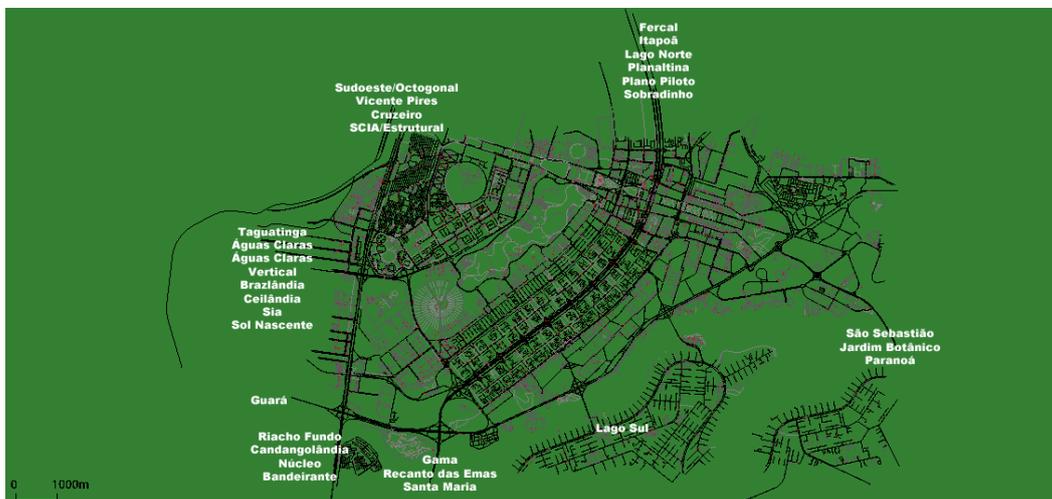


Figura 4.18 – Borda das Regiões Administrativas na rede viária do Plano Piloto

Com os dados de viagens filtrados da PMU/DF na etapa anterior, é possível criar 9 arquivos com os dados da matriz origem/destino (OD\_fileX.od), com os respectivos horários de 6h, 6h15, 6h30, 6h45, 7h, 7h15, 7h30, 7h45 e 8h. Nos arquivos das matrizes origem-destino, na determinação do intervalo de tempo das viagens na simulação, o formato a ser usado é HORA.MINUTOS. Com a simulação tendo duas horas de duração, das 6h às 8h, o tempo de simulação definido e o número de veículos para esses nove arquivos no cenário de Ceilândia foi:

- Tempo de simulação: 00.00 00.13 (as viagens às 6h): 5105 veículos;
- Tempo de simulação: 00.13 00.27 (as viagens às 6h15): 1702 veículos;
- Tempo de simulação: 00.27 00.40 (as viagens às 6h30): 5773 veículos;

- Tempo de simulação: 00.40 00.53 (as viagens às 6h45): 4363 veículos;
- Tempo de simulação: 00.53 01.07 (as viagens às 7h): 13276 veículos;
- Tempo de simulação: 01.07 01.20 (as viagens às 7h15): 6283 veículos;
- Tempo de simulação: 01.20 01.33 (as viagens às 7h30): 7146 veículos;
- Tempo de simulação: 01.33 01.47 (as viagens às 7h45): 1767 veículos;
- Tempo de simulação: 01.47 02.00 (as viagens às 8h): 7588 veículos.

E no cenário do Plano Piloto foi:

- Tempo de simulação: 00.00 00.13 (as viagens às 6h): 3502 veículos;
- Tempo de simulação: 00.13 00.27 (as viagens às 6h15): 1470 veículos;
- Tempo de simulação: 00.27 00.40 (as viagens às 6h30): 4530 veículos;
- Tempo de simulação: 00.40 00.53 (as viagens às 6h45): 3171 veículos;
- Tempo de simulação: 00.53 01.07 (as viagens às 7h): 14005 veículos;
- Tempo de simulação: 01.07 01.20 (as viagens às 7h15): 5842 veículos;
- Tempo de simulação: 01.20 01.33 (as viagens às 7h30): 10235 veículos;
- Tempo de simulação: 01.33 01.47 (as viagens às 7h45): 5010 veículos;
- Tempo de simulação: 01.47 02.00 (as viagens às 8h): 13445 veículos.

Em seguida, com os 9 arquivos da matriz origem-destino (OD\_fileX.od) e o arquivo de distritos (districts.taz.xml), com uso do comando od2trips, é possível importar as matrizes e transformar em um arquivo de viagens (od\_fileX.odtrips.xml).

```
od2trips -c od2trips.config.xml -n districts.taz.xml -d OD_file1.od -o od_file1.odtrips.xml
od2trips -c od2trips.config.xml -n districts.taz.xml -d OD_file2.od -o od_file2.odtrips.xml
od2trips -c od2trips.config.xml -n districts.taz.xml -d OD_file3.od -o od_file3.odtrips.xml
od2trips -c od2trips.config.xml -n districts.taz.xml -d OD_file4.od -o od_file4.odtrips.xml
od2trips -c od2trips.config.xml -n districts.taz.xml -d OD_file5.od -o od_file5.odtrips.xml
od2trips -c od2trips.config.xml -n districts.taz.xml -d OD_file6.od -o od_file6.odtrips.xml
od2trips -c od2trips.config.xml -n districts.taz.xml -d OD_file7.od -o od_file7.odtrips.xml
od2trips -c od2trips.config.xml -n districts.taz.xml -d OD_file8.od -o od_file8.odtrips.xml
od2trips -c od2trips.config.xml -n districts.taz.xml -d OD_file9.od -o od_file9.odtrips.xml
```

O arquivo de viagens gerado usa o arquivo da matriz origem-destino (OD\_filex.od) para ver as zonas de origem e destino e o número de viagens entre essas zonas, e assim com o arquivo de distrito (districts.taz.xml) selecionar aleatoriamente uma borda destas zonas e criar uma viagem entre elas. Na Figura 4.19 está um exemplo de uma viagem gerada pelo od2trips:

```
<trip id="1" type="passenger" depart="0.12" from="-158687029#1" to="141411001#2"
fromTaz="34217" toTaz="47" departLane="free" departSpeed="random"/>
```

Figura 4.19 – Exemplo de viagem gerado pelo od2trips

Esta é a viagem ID 1 da simulação do cenário atual de Ceilândia, em que o tipo de veículo é de passageiro, com os parâmetros definidos na Figura 4.20, entrando na rede aos 0,12 segundos de simulação, partindo da borda "-158687029#1" da zona "34217" em direção a borda "141411001#2" da zona "47" (RA Setor de Indústria e Abastecimento – SIA). Em *departLane* é determinada em qual pista tenta-se inserir o veículo, sendo a opção *free* determina que a faixa mais livre (menos ocupada) é escolhida. Já *departSpeed* determina a velocidade do veículo na inserção, sendo selecionada *random*, em que uma velocidade aleatória entre 0 e a máxima velocidade (por padrão no sumo é 200km/h) é usada, mas essa velocidade podendo ser adaptada para garantir uma distância segura para o veículo líder.

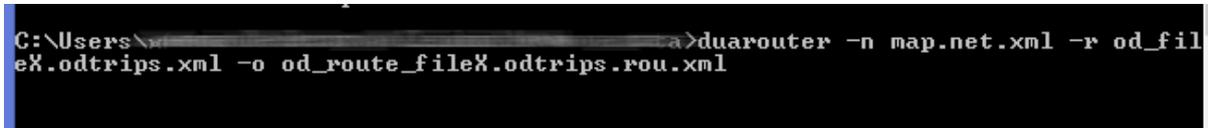
```
<vType id="passenger" length="5" width="1.8" height="1.5" minGap="2.5" accel="2.6" decel="4.5"
emergencyDecel="9" sigma="0.5" speedDev="0.1" emissionClass="HBEFA3/PC_G_EU4"/>
```

Figura 4.20 – Parâmetros para definição do veículo particular (convencional)

Nos parâmetros da Figura 4.20, a classe de emissão HBEFA3/PC\_G\_EU4 diz respeito ao Manual de Fatores de Emissão para Transporte Rodoviário versão 3.1 (HBEFA - *The Handbook Emission Factors for Road Transport*) (HAUSBERGER *et al*, 2009), sendo PC\_G\_EU4 Norma Euro 4 para automóveis de passageiros movidos a gasolina.

Porém há viagens entre bordas com rotas inexistentes devido a composição da rede viária extraída do *OpenStreetMap*. Assim, o comando *duarouter* (Figura 4.21) será usado para

analisar se as viagens geradas pelo *od2trips* possuem rotas possíveis. As rotas inexistentes são substituídas manualmente por rotas possíveis. O comando será usado em cada um dos arquivos de viagens gerados anteriormente.



```
C:\Users\...>duarouter -n map.net.xml -r od_file%.odtrips.xml -o od_route_file%.odtrips.rou.xml
```

Figura 4.21 – Linha *duarouter* no prompt de comando

Por fim, após verificar a possibilidade de rotas nas viagens, os 9 arquivos gerados de viagens foram unidos em um único arquivo (*od\_file.odtrips.xml*).

Esta etapa é importante principalmente pela geração do arquivo da rede viária (*map.net.xml*) e o arquivo de viagem (*od\_file.odtrips.xml*) para as simulações das etapas seguintes.

#### 4.4. ETAPA 3 – CRIAÇÃO DE CENÁRIOS

Nesta etapa serão criados dois tipos de cenário, o primeiro tipo é o cenário atual e o segundo é o cenário substituindo algumas viagens por veículos particulares por viagens com uso de veículos compartilhados integrado ao sistema público por metrô.

Para a criação do primeiro tipo de cenário é necessário somente dois tipos de arquivos, o arquivo da rede viária e o arquivo de viagens, sendo estes dois gerados na etapa anterior. Os arquivos da rede viária, após alguns testes, foram observadas alguns locais na rede com conflitos, assim com o uso do *Google Maps* foram identificados alguns semáforos que não foram importados do *OpenStreetMap*, e algumas conexão e interseções entre as pistas que necessitavam ser ajustadas, sendo assim com o uso do *NETEDIT* esses ajustes foram feitos no arquivo de rede viária. Na Figura 4.22 é possível observar um conflito em uma interseção observada em simulações de teste. Com o uso do *Google Maps*, foi analisado que a interseção é semaforizada (simbolizada em azul), e também foram removidas conexões entre pista não permitidas.

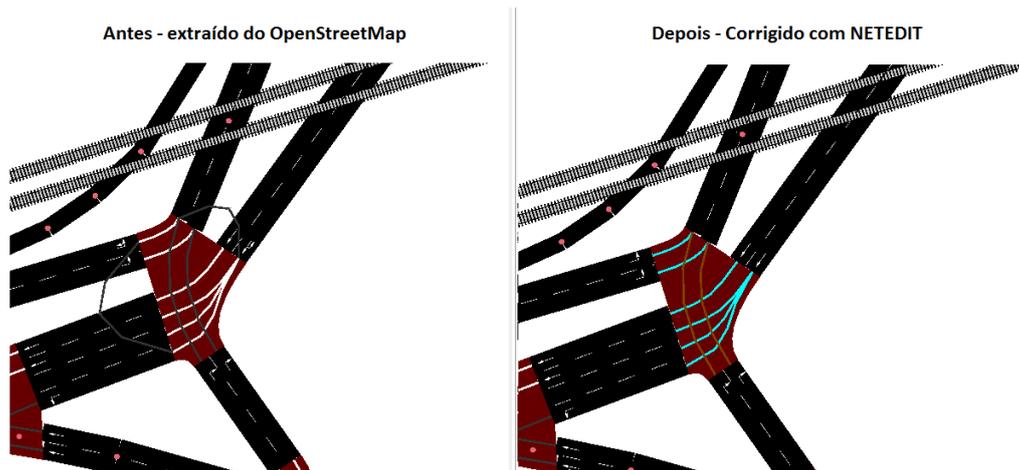


Figura 4.22 – Exemplo de conflito na rede viária corrigido com NETEDIT

Já para o segundo tipo de cenário, para a simulação com veículo compartilhado, foram montados vários cenários com viagens de frotas de veículos compartilhados, veículos compartilhados elétricos, veículo compartilhados autônomo e veículo compartilhados autônomo elétrico integrados com o sistema público por metrô, tendo como origem e destino:

- a origem nas Zonas Ceilândia 5min e destino as Zonas Plano Piloto 5min;
- a origem nas Zonas Ceilândia 10min e destino as Zonas Plano Piloto 5min;
- a origem nas Zonas Ceilândia 15min e destino as Zonas Plano Piloto 5min.

Assim, os veículos particulares que possuem estas origens e destinos nos cenários atuais montados anteriormente, são removidos do arquivo de viagens, e convertidos em pessoas solicitando viagens por veículo compartilhado. Para transformar veículo particular em pessoa é usado novamente a taxa de ocupação dos veículos de 1,38124394103668.

Na Figura 4.23 são apresentadas as distribuições nas zonas das viagens por veículo particular a serem substituídas nos cenários por veículos compartilhados.

Na esquerda é possível observar a distribuição destas viagens nas zonas da Ceilândia (origem), e na direita a distribuição das viagens nas zonas do Plano Piloto (destino). Assim, após remover os veículos que possuem origem em uma das áreas de influência de Ceilândia com destino a área de influência do Plano Piloto, esses são convertidos em pessoas com a taxa de ocupação, e assim se obtém o arquivo de pessoas (person.odtrips.xml). Na Tabela 4.1 é apresentado o número de veículos entre as zonas de Ceilândia e as do Plano Piloto. Já na Tabela 4.2 está o número de pessoas que substituirão estes veículos na simulação.

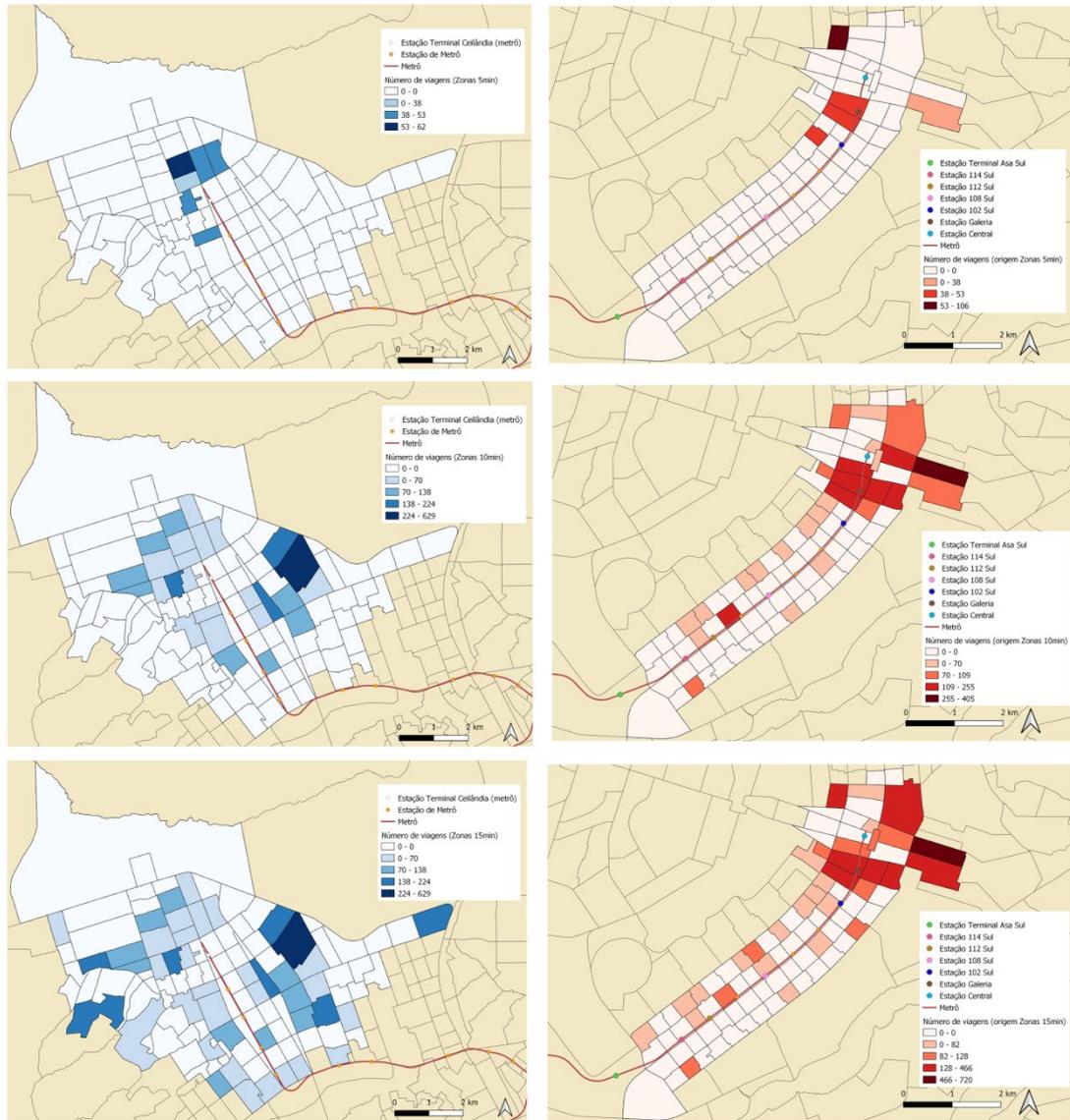


Figura 4.23 – Distribuição nas zonas das viagens a serem substituídas por pessoas solicitando viagens com veículos compartilhados

Tabela 4.1 – Número de veículos com viagem entre as zonas de Ceilândia e as zonas do Plano Piloto

Zona de Origem	Estação Destino	06:00:00	06:15:00	06:30:00	06:45:00	07:00:00	07:15:00	07:30:00	07:45:00	08:00:00	Total Geral
5min	Estação 5	38	0	0	0	0	0	33	0	0	71
5min	Estação 6	33	0	0	0	0	0	0	0	0	33
5min	Estação 7	28	0	32	0	0	45	0	0	0	105
10min	Estação 2	0	0	0	0	0	0	62	0	41	103
10min	Estação 3	0	90	0	0	45	0	0	0	27	162
10min	Estação 4	65	0	35	0	50	46	35	0	0	231
10min	Estação 5	0	33	50	0	35	46	0	0	0	164
10min	Estação 6	20	90	29	60	157	0	0	0	154	510
10min	Estação 7	292	0	90	0	94	29	49	31	62	647
15min	Estação 2	0	0	0	0	0	0	0	0	44	44
15min	Estação 4	0	33	0	0	49	0	0	0	0	82
15min	Estação 5	0	26	0	0	50	80	0	0	38	194
15min	Estação 6	0	0	55	0	56	0	96	0	78	285
15min	Estação 7	138	0	135	0	40	52	107	0	0	472
<b>Total Geral</b>		614	272	426	60	576	298	382	31	444	3103

Tabela 4.2 – Número de pessoas solicitando viagens com veículos compartilhados entre as zonas de Ceilândia e as zonas do Plano Piloto

<b>Zona de Origem</b>	<b>Estação Destino</b>	<b>06:00:00</b>	<b>06:15:00</b>	<b>06:30:00</b>	<b>06:45:00</b>	<b>07:00:00</b>	<b>07:15:00</b>	<b>07:30:00</b>	<b>07:45:00</b>	<b>08:00:00</b>	<b>Total Geral</b>
<b>5min</b>	Estação 5	53	0	0	0	0	0	45	0	0	98
<b>5min</b>	Estação 6	45	0	0	0	0	0	0	0	0	45
<b>5min</b>	Estação 7	38	0	44	0	0	62	0	0	0	144
<b>10min</b>	Estação 2	0	0	0	0	0	0	86	0	56	142
<b>10min</b>	Estação 3	0	124	0	0	62	0	0	0	37	223
<b>10min</b>	Estação 4	91	0	48	0	69	64	48	0	0	320
<b>10min</b>	Estação 5	0	46	69	0	49	64	0	0	0	228
<b>10min</b>	Estação 6	28	126	40	84	216	0	0	0	212	706
<b>10min</b>	Estação 7	404	0	126	0	131	40	67	43	86	897
<b>15min</b>	Estação 2	0	0	0	0	0	0	0	0	61	61
<b>15min</b>	Estação 4	0	45	0	0	67	0	0	0	0	112
<b>15min</b>	Estação 5	0	36	0	0	69	110	0	0	52	267
<b>15min</b>	Estação 6	0	0	76	0	78	0	133	0	108	395
<b>15min</b>	Estação 7	191	0	188	0	55	72	148	0	0	654
<b>Total Geral</b>		850	377	591	84	796	412	527	43	612	4292

Em seguida, para a montagem do arquivo de táxi (taxi\_.odtrips.xml), é necessário definir os parâmetros para diferenciar o tipo de veículo compartilhado a ser usado: veículo compartilhado, veículo compartilhado elétrico, veículo compartilhado autônomo ou veículo compartilhado autônomo elétrico.

Para a definição dos parâmetros do veículo elétrico buscou-se basear em um modelo real não muito caro, assim o veículo modelo foi o JAC E-JS1, principalmente em relação a máxima capacidade de bateria de 30,2 Kwh, com 300 km de autonomia, não sendo necessário ser carregado durante a simulação.

Em relação aos veículos autônomos, estes possuirão um assento a mais disponível ao comparar com os veículos compartilhados, devido a este veículo não necessitar de motorista. Sigma é um parâmetro em relação a imperfeição do motorista, sendo que 0 denota uma direção perfeita, o que pode ser considerado em um veículo autônomo. O *speedFactor* é o fator multiplicador de velocidade individual do veículo, determinando se o veículo se locomove acima ou abaixo da velocidade, assim para os veículos autônomos esse fator foi determinado como 1,0. Esses parâmetros são apresentados nas Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26 e Figura 4.27.

```
<vType id="taxi" vClass="taxi" personCapacity="4" color="1,1,1" length="5"
width="1.8" height="1.5" minGap="2.5" accel="2.6" decel="4.5" emergencyDecel="9"
sigma="0.5" speedDev="0.1" emissionClass="HBEFA3/PC_G_EU4">
  <param key="has.taxi.device" value="true"/>
</vType>
```

Figura 4.24 – Parâmetros para definição do veículo compartilhado

```
<vType id="taxi" vClass="taxi" personCapacity="4" color="1,1,1"
length="5" width="1.8" height="1.5" minGap="2.5" accel="2.6" decel="4.5"
emergencyDecel="9" sigma="0.5" speedDev="0.1" emissionClass="Energy">
  <param key="has.taxi.device" value="true"/>
  <param key="has.taxi.device" value="true"/>
  <param key="has.battery.device" value="true"/>
  <param key="maximumBatteryCapacity" value="30200"/>
  <param key="maximumPower" value="110000"/>
  <param key="vehicleMass" value="1630"/>
  <param key="frontSurfaceArea" value="2.6"/>
  <param key="airDragCoefficient" value="0.35"/>
  <param key="internalMomentOfInertia" value="0.01"/>
  <param key="radialDragCoefficient" value="0.5"/>
  <param key="rollDragCoefficient" value="0.01"/>
  <param key="constantPowerIntake" value="100"/>
  <param key="propulsionEfficiency" value="0.9"/>
  <param key="recuperationEfficiency" value="0.9"/>
  <param key="stoppingTreshold" value="0.1"/>
</vType>
```

Figura 4.25 – Parâmetros para definição do veículo compartilhado elétrico

```

<vType id="automated" vClass="taxi" sigma="0." speedFactor="1" personCapacity="5"
color="1,1,1" length="5" width="1.8" height="1.5" minGap="2.5" accel="2.6"
decel="4.5" emergencyDecel="9" emissionClass="HBEFA3/PC_G_EU4">
  <param key="has.taxi.device" value="true"/>
  <param key="has.toc.device" value="true"/>
  <param key="device.toc.automatedType" value="automated" />
  <param key="device.toc.manualType" value="manual" />
</vType>

<vType id="manual" vClass="taxi" sigma="0.5" color="1,1,1" personCapacity="4"
length="5" width="1.8" height="1.5" minGap="2.5" accel="2.6" decel="4.5"
emergencyDecel="9" speedDev="0.1" emissionClass="HBEFA3/PC_G_EU4">
  <param key="has.taxi.device" value="true"/>
  <param key="has.toc.device" value="true"/>
  <param key="device.toc.automatedType" value="automated" />
  <param key="device.toc.manualType" value="manual" />
</vType>

```

Figura 4.26 – Parâmetros para definição do veículo compartilhado autônomo

```

<vType id="automated" vClass="taxi" sigma="0." speedFactor="1"
personCapacity="5" color="1,1,1" length="5" width="1.8" height="1.5"
minGap="2.5" accel="2.6" decel="4.5" emergencyDecel="9" emissionClass="Energy">
  <param key="has.taxi.device" value="true"/>
  <param key="has.toc.device" value="true"/>
  <param key="device.toc.automatedType" value="automated" />
  <param key="device.toc.manualType" value="manual" />
  <param key="has.battery.device" value="true"/>
  <param key="maximumBatteryCapacity" value="30200"/>
  <param key="maximumPower" value="110000"/>
  <param key="vehicleMass" value="1630"/>
  <param key="frontSurfaceArea" value="2.6"/>
  <param key="airDragCoefficient" value="0.35"/>
  <param key="internalMomentOfInertia" value="0.01"/>
  <param key="radialDragCoefficient" value="0.5"/>
  <param key="rollDragCoefficient" value="0.01"/>
  <param key="constantPowerIntake" value="100"/>
  <param key="propulsionEfficiency" value="0.9"/>
  <param key="recuperationEfficiency" value="0.9"/>
  <param key="stoppingTreshold" value="0.1"/>
</vType>

<vType id="manual" vClass="taxi" sigma="0.5" color="1,1,1"
personCapacity="4" length="5" width="1.8" height="1.5" minGap="2.5"
accel="2.6" decel="4.5" emergencyDecel="9" speedDev="0.1" emissionClass="Energy">
  <param key="has.taxi.device" value="true"/>
  <param key="has.toc.device" value="true"/>
  <param key="device.toc.automatedType" value="automated" />
  <param key="device.toc.manualType" value="manual" />
  <param key="has.battery.device" value="true"/>
  <param key="maximumBatteryCapacity" value="30200"/>
  <param key="maximumPower" value="110000"/>
  <param key="vehicleMass" value="1630"/>
  <param key="frontSurfaceArea" value="2.6"/>
  <param key="airDragCoefficient" value="0.35"/>
  <param key="internalMomentOfInertia" value="0.01"/>
  <param key="radialDragCoefficient" value="0.5"/>
  <param key="rollDragCoefficient" value="0.01"/>
  <param key="constantPowerIntake" value="100"/>
  <param key="propulsionEfficiency" value="0.9"/>
  <param key="recuperationEfficiency" value="0.9"/>
  <param key="stoppingTreshold" value="0.1"/>
</vType>

```

Figura 4.27 – Parâmetros para definição do veículo compartilhado autônomo elétrico

Os veículos compartilhados são inseridos em estacionamentos no início da simulação, então como uso do *Google Maps* se buscou estacionamentos próximos às estações Terminal Ceilândia, 114 Sul, 112 Sul, 108 Sul, 102 Sul, Galeria e Central. O estacionamento usado para as simulações de Ceilândia precisou ser modificado com NETEDIT para comportar o número de veículos inseridos. Próximo dos estacionamentos deve-se buscar calçadas para que as

peças possam caminhar tanto para entrar na estação de metrô nas simulações dos cenários de Ceilândia, quanto para sair nas simulações dos cenários do Plano Piloto. O estacionamento usado nas simulações de Ceilândia pode ser visto na Figura 4.28 e os estacionamentos dos cenários do Plano Piloto na Figura 4.29.

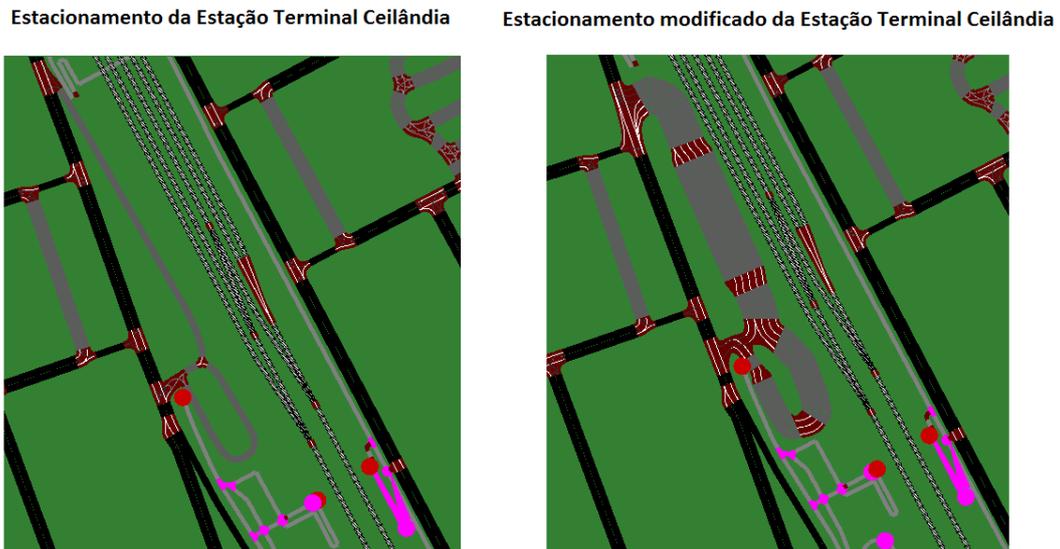


Figura 4.28 – Estacionamento da Estação Terminal Ceilândia

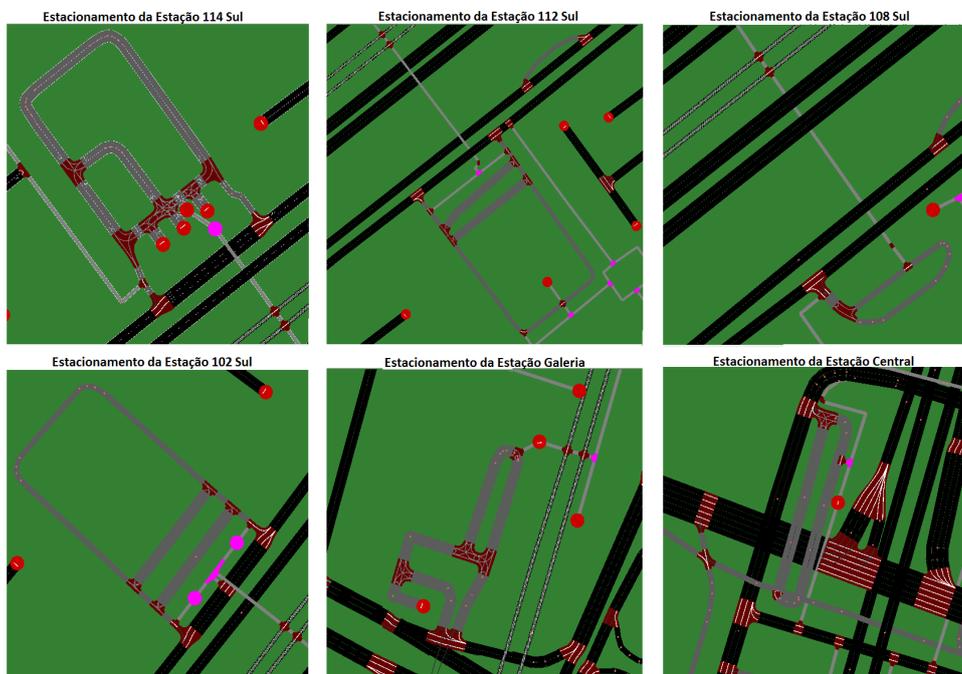


Figura 4.29 – Estacionamentos das Estações do Plano Piloto

#### 4.5. ETAPA 4 – SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS BASE

Após a criação dos cenários e montagem dos arquivos de rede e viagens na etapa anterior, esta etapa tem como objetivo iniciar o processo de simulação do cenário atual, tanto das zonas da área de influência de Ceilândia quanto das zonas da área do Plano Piloto. Como mencionado anteriormente, o *software* usado para as simulações é o *Simulation of Urban MObility* (SUMO) (versão SUMO GUI Version v1\_10\_0+0841-46a5257c3cd).

No final da simulação se solicita como arquivos de saída: tripinfo-output e statistic-output, a serem usados na análise dos resultados. A saída tripinfo-output tem as informações sobre cada veículo e pessoa da simulação, como dados de chegada, partida e emissões. Já a saída statistic-output são os dados estatísticos total da simulação, como as estatísticas de viagem dos veículos e dos pedestres, informando dados como comprimento médio da rota e duração média de viagem.

Na simulação de tráfego será considerado somente os efeitos dos veículos convencionais particulares, com taxa de ocupação de aproximadamente 1,38. A simulação tem duração de 7200 segundos, com os dados da hora pico manhã 6h às 8h, em que quase toda a simulação é esperada analisar uma rede congestionada. Na simulação de Ceilândia serão distribuídos 53.003 veículos durante os 7200 segundos de simulação, e na simulação do Plano Piloto são 61.210 veículos.

Nesta simulação teletransportes serão permitidos, e são esperados em simulações no SUMO principalmente em cenários congestionados. Eles podem ocorrer devido a três circunstâncias: pista errada, em que o veículo está preso em uma pista que não tem conexão com a próxima borda do trajeto; prioridade de passagem, onde o veículo está preso em uma estrada de baixa prioridade e não encontrou uma lacuna no tráfego priorizado; e congestionamento, com o veículo preso em uma estrada prioritária e não há espaço na próxima borda. Quando o veículo espera mais de 300 segundos parado em uma borda, este é considerado bloqueado e teletransportado para a próxima borda livre em sua rota.

#### **4.6. ETAPA 5 – SIMULAÇÃO DE CENÁRIO COM VEÍCULOS COMPARTILHADOS**

Esta etapa 5 é responsável pelas simulações dos cenários com veículos compartilhados com os dados das áreas de influência de Ceilândia e do Plano Piloto. Com os arquivos de rede viária, viagens, pessoas e táxis montados na Etapa 3, é preciso definir o tamanho das frotas destes veículos compartilhados em cada cenário. Inicialmente nos três cenários realizados com os dados das zonas de Ceilândia, foram definidas 4 tipos frotas de veículos compartilhados para o cenário em que se substitui as viagens de veículos particulares das zonas de 5 minutos, e 3 tipo de frotas para os cenários das zonas de 10 e 15 minutos, apresentadas a seguir:

- a origem nas Zonas Ceilândia 5min e destino as Zonas Plano Piloto 5min (frota de 10, 20, 25 e 30 veículos);
- a origem nas Zonas Ceilândia 10min e destino as Zonas Plano Piloto 5min (frota de 150, 200 e 250 veículos);
- a origem nas Zonas Ceilândia 15min e destino as Zonas Plano Piloto 5min (frota de 200, 250 e 300 veículos).

Cada uma dessas frotas é simulada com veículos do tipo veículo compartilhado, veículo compartilhado elétrico, veículo compartilhado autônomo e veículo compartilhado autônomo elétrico, dando ao todo 40 cenários simulados com os dados das zonas das áreas de influência de 5, 10 e 15 minutos de Ceilândia. Em todos os cenários os veículos compartilhados buscam as pessoas na porta de casa e as levam até a estação Terminal Ceilândia.

Nos cenários com a origem nas Zonas Ceilândia 5min e destino as Zonas Plano Piloto 5min, 209 veículos particular são substituídos por 287 pessoas solicitando viagem por veículo compartilhado; nos cenários com a origem nas Zonas Ceilândia 10min e destino as Zonas Plano Piloto 5min, são 2027 veículos particulares sendo substituídos por 2803 pessoas; e nos cenários com a origem nas Zonas Ceilândia 15min e destino as Zonas Plano Piloto 5min 3104 veículos são substituídos por 4292 pessoas.

Nas configurações de táxi (*taxi\_device*), o algoritmo de despacho escolhido foi *routeExtension*, em que o veículo pode pegar qualquer passageiro ao longo da rota e também estender a rota original (dentro do limite de capacidade pessoas no veículo). No caso de

comportamento ocioso do táxi, ou seja, quando o veículo não possui passageiros nem solicitando viagem nem no seu interior, foi definido que o veículo deve parar na localização atual após a entrega do último passageiro.

Tabela 4.3 – Pessoas ao finalizar a simulação dos cenários com veículos compartilhados nas zonas de Ceilândia com destino a estação Terminal Ceilândia

	Zonas de 5 minutos								Zonas de 10 minutos						Zonas de 15 minutos					
	Veículo Compartilhado				Veículo Compartilhado Autônomo				Veículo Compartilhado			Veículo Compartilhado Autônomo			Veículo Compartilhado			Veículo Compartilhado Autônomo		
	10	20	25	30	10	20	25	30	150	200	250	150	200	250	200	250	300	200	250	300
<b>Pessoa tipo 1</b>	45	0	4	<b>0</b>	18	<b>0</b>	38	3	1744	<b>1600</b>	1621	<b>1002</b>	946	1226	<b>2903</b>	3010	3068	2358	<b>2279</b>	2655
<b>Pessoa tipo 2</b>	3	10	0	<b>0</b>	1	<b>0</b>	25	0	154	<b>75</b>	110	<b>83</b>	275	247	<b>194</b>	211	39	82	<b>140</b>	182
<b>Pessoa tipo 3</b>	0	2	2	<b>0</b>	0	<b>0</b>	7	1	0	<b>13</b>	0	<b>53</b>	2	0	<b>10</b>	0	1	0	<b>25</b>	26
<b>Pessoa tipo 4</b>	239	275	281	<b>287</b>	268	<b>287</b>	217	283	905	<b>1115</b>	1072	<b>1665</b>	1580	1330	<b>1185</b>	1071	1184	1852	<b>1848</b>	1429

Tabela 4.4 – Pessoas ao finalizar a simulação dos cenários de veículos compartilhados nas estações do Plano Piloto em direção ao destino

	Zonas de 5 minutos								Zonas de 10 minutos								Zonas de 15 minutos							
	Veículo Compartilhado				Veículo Compartilhado Autônomo				Veículo Compartilhado				Veículo Compartilhado Autônomo				Veículo Compartilhado				Veículo Compartilhado Autônomo			
	20	30	40	60	20	30	40	60	150	200	300	400	150	200	300	400	200	250	400	500	200	250	400	500
<b>Pessoa tipo 3</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
<b>Pessoa tipo 1</b>	84	27	28	<b>18</b>	98	23	22	<b>13</b>	87	<b>68</b>	47	33	265	286	266	<b>102</b>	116	75	<b>41</b>	42	299	261	239	<b>118</b>
<b>Pessoa tipo 2</b>	22	40	41	<b>33</b>	32	49	34	<b>32</b>	113	<b>91</b>	169	131	143	125	248	<b>241</b>	170	168	<b>143</b>	168	201	210	195	<b>304</b>
<b>Pessoa tipo 4</b>	74	113	111	<b>129</b>	50	108	124	<b>135</b>	269	<b>310</b>	253	305	264	261	158	<b>329</b>	207	250	<b>309</b>	283	340	369	406	<b>418</b>

Pessoa tipo 1: pessoas esperando pelo veículo compartilhado;

Pessoa tipo 2: pessoas que no final da simulação se encontram dentro do veículo compartilhado;

Pessoa tipo 3: são aquelas que estão caminhando;

Pessoa tipo 4: são aquelas que saíram da simulação, ou seja, chegaram à estação para esperar o metrô ou chegaram ao destino.

Com os todos os dados das 40 simulações gerados com os dados das zonas de Ceilândia, são escolhidos os melhores cenários de cada modo de transporte nas três áreas de influência (5, 10 e 15 minutos) principalmente em relação ao número de pessoas que saíram da simulação, em outras palavras, pessoas que chegaram à estação para aguardar a chegada do trem, tendo assim 6 cenários escolhidos, que pode ser observado na Tabela 4.3 em azul.

Na Tabela 4.3 é possível observar o número de pessoas em cada etapa da viagem ao finalizar as simulações com veículos compartilhados nas zonas de influência da origem. Para se simular os cenários do Plano Piloto com veículos compartilhados deve-se analisar os dados do tripinfo-output destes 6 cenários escolhidos das simulações de Ceilândia, observando o horário em que as pessoas deixaram a simulação, ou seja, o horário em que terminaram de caminhar até a estação Terminal Ceilândia. Este horário deve ser somado com o tempo de espera do metrô e o tempo de duração da viagem por metrô, definindo assim o horário em cada cenário do Plano Piloto com veículos compartilhados que as pessoas serão inseridas. A frota de veículos será a mesma usada nas simulações de Ceilândia, e também será simulado o dobro desta frota, sendo 48 cenários gerados, que pode ser observado na Tabela 4.4. Na Tabela 4.3 e Tabela 4.4 são mostrados somente metade dos cenários simulados pois os resultados do status da pessoa no final da simulação dos veículos compartilhados elétricos e veículo compartilhado autônomo elétrico são os mesmos dos veículos não elétricos, somente mudando os dados de emissões.

A gestão da operação no METRÔ-DF é realizada por Manutenção de Intervalo (*headway*), não sendo definido horários de chegada e partidas dos trens na plataforma. Sendo assim, a programação para dias úteis, nos horários de Horário 05:30 a 06:45, o intervalo no Ramal Ceilândia é de 05 minutos e 41 segundos, e no horário de Horário 06:45 a 08:45 o intervalo é de 11 minutos e 40 segundos. Em relação a duração da viagem, partindo da Estação Terminal Ceilândia são 36 minutos até a estação 114 Sul, 38 minutos até a 112 Sul, 42 minutos até a 108 Sul, 46 minutos até a 102 Sul, 48 minutos até a Galeria e 50 minutos até a Central. Assim, considerando que o primeiro trem dos cenários parte às 6h da manhã, a Tabela 4.5 apresenta os horários de chegada em cada estação do Plano Piloto. Em verde estão os horários que chegam durante o tempo de simulação, e em vermelho os trens que chegam depois de finalizada a simulação, em outras palavras, chega após as 8h na plataforma das estações.

Assim, nos cenários do Plano Piloto, quando o passageiro chega nas estações de metrô do Plano Piloto 114 Sul, 112 Sul, 108 Sul, 102 Sul, Galeria e Central, a estação mais próxima da

zona do seu destino, este caminha até o estacionamento e solicita uma viagem de veículo compartilhado, e aguarda a chegada do veículo. Ao entrar no veículo, o passageiro é levado da estação até a porta do seu destino.

Tabela 4.5 – Horários de chegada dos trens nas estações do Plano Piloto

Origem	Terminal Ceilândia						
Destino	114 Sul	112 Sul	108 Sul	102 Sul	Galeria	Central	
Tempo de viagem	00:36:00	00:38:00	00:42:00	00:46:00	00:48:00	00:50:00	
H o r á r i o d e p a r t i d a	06:00:00	06:36:00	06:38:00	06:42:00	06:46:00	06:48:00	06:50:00
	06:05:41	06:41:41	06:43:41	06:47:41	06:51:41	06:53:41	06:55:41
	06:11:22	06:47:22	06:49:22	06:53:22	06:57:22	06:59:22	07:01:22
	06:17:03	06:53:03	06:55:03	06:59:03	07:03:03	07:05:03	07:07:03
	06:22:44	06:58:44	07:00:44	07:04:44	07:08:44	07:10:44	07:12:44
	06:28:25	07:04:25	07:06:25	07:10:25	07:14:25	07:16:25	07:18:25
	06:34:06	07:10:06	07:12:06	07:16:06	07:20:06	07:22:06	07:24:06
	06:39:47	07:15:47	07:17:47	07:21:47	07:25:47	07:27:47	07:29:47
	06:51:27	07:27:27	07:29:27	07:33:27	07:37:27	07:39:27	07:41:27
	07:03:07	07:39:07	07:41:07	07:45:07	07:49:07	07:51:07	07:53:07
	07:14:47	07:50:47	07:52:47	07:56:47	08:00:47	08:02:47	08:04:47
	07:26:27	08:02:27	08:04:27	08:08:27	08:12:27	08:14:27	08:16:27
	07:38:07	08:14:07	08:16:07	08:20:07	08:24:07	08:26:07	08:28:07
	07:49:47	08:25:47	08:27:47	08:31:47	08:35:47	08:37:47	08:39:47
08:01:27	08:37:27	08:39:27	08:43:27	08:47:27	08:49:27	08:51:27	

#### a) Condições da simulação na “primeira milha” - Estação Ceilândia

No início da simulação na região de Ceilândia, o veículo compartilhado começa desocupado estacionado na estação de Ceilândia, e procura por uma pessoa solicitando uma viagem. Se esta pessoa não é encontrada, o veículo continua estacionado até encontrar um usuário. Depois de identificar um usuário solicitando serviço é calculada a rota de acesso até a pessoa e o veículo vai em direção à pessoa. Caso se apresentem solicitações ao longo da rota, o veículo pode pegar qualquer passageiro e também estender a rota original, restrito ao limite de capacidade pessoas no veículo. Sendo assim o veículo continua a procurar novas pessoas solicitando viagem no sistema. Caso encontre outra pessoa, a rota é calculada novamente até os alvos e depois em direção à estação. Os veículos não saem da simulação, caso não tenha pessoas o solicitando, este para na localização atual após a entrega do último cliente, aguardando novas solicitações de viagem.

No processo de simulação no SUMO, quando uma pessoa é criada na simulação de Ceilândia, ela automaticamente solicita uma viagem em veículo compartilhado, e aguarda o veículo, tendo assim um tempo de espera. Quando um veículo combina com ela, e esta entra no veículo, se deve considerar o tempo de viagem. Quando a pessoa chega à estação, deve caminhar até o destino, e assim aguarda o metrô, tendo o tempo de caminhada e o tempo de espera do metrô. Todos esses tempos são considerados no processo de simulação.

#### **b) Condições da simulação na “última milha” - Estação Plano Piloto**

A simulação do Plano Piloto é bastante parecida com a de Ceilândia. O veículo compartilhado inicia desocupado estacionado na estação, aguardando solicitação de viagem dos passageiros que chegam na estação do Plano Piloto. Quando a pessoa chega à estação, uma viagem é solicitada, e se tiver veículo disponível, o passageiro é levado até o seu destino.

Na simulação do Plano Piloto, após a pessoa chegar à estação, ela caminha até o estacionamento dos veículos compartilhados e solicita uma viagem, tendo que considerar assim o tempo de caminhada e de espera da viagem. Após ser alocada a um veículo ela é levada até o seu destino, tendo assim o tempo de viagem. Todos esses tempos são considerados no processo de simulação.

### **4.7. ETAPA 6 – CÁLCULO DAS EMISSÕES E DOS CUSTOS DE VIAGEM**

#### **a) Cálculo das emissões**

Para o cálculo das emissões, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP) foi usada o arquivo de saída tripinfo, que informa a soma de todos os poluentes emitidos durante a viagem de um veículo durante toda a simulação. Para que essa saída registre as emissões de todas as viagens, deve-se usar o comando `device.emissions.probability value="1"`.

#### **b) Cálculo dos custos de viagem**

Já para o cálculo dos custos de viagens, nos cenários simulados foram considerados os tempos de espera, tempo de viagem, e os custos monetários, sendo os gastos com combustível (cenário base) e com passagem de metrô.

Nas simulações com veículos compartilhados existem 3 tipos de tempo de espera: o tempo de espera 1, ao esperar o veículo compartilhado buscar o passageiro na origem; tempo de espera 2, ao esperar a chegada do metrô; e tempo de espera 3, ao esperar na estação destino a chegada do veículo compartilhado. Em relação ao tempo de viagem também existem 3 tipos: o tempo de viagem dentro do veículo compartilhado da zona de origem à estação; o tempo de viagem de metrô; e, o tempo de viagem da estação do metrô do Plano Piloto ao destino final. Em relação aos custos monetários, foi considerado a passagem de metrô custando R\$ 5,50, e dependendo da integração tarifária o uso do veículo compartilhado pode estar incluso ou não. Para os cálculos dos custos de viagem foram consideradas duas hipóteses, a primeira com a integração entre metrô e veículo compartilhado custando R\$ 5,50, e a segunda tendo um aumento de 50%.

Na simulação do cenário base, para os cálculos dos custos de viagem foi considerado somente o tempo de viagem e os custos monetários de combustível. Para se obter o tempo de viagem entre as zonas, usou-se o *Google Maps*, estimando o tempo médio de viagem entre as zonas de origem e destino, partindo do centróide as 7 horas da manhã. Para o cálculo dos custos de combustível, foi considerado o consumo de 10km/L e o custo de combustível R\$7/L. Para o cálculo foram considerados somente os veículos com origem nas zonas de influência de Ceilândia que chegam no destino nas zonas do Plano Piloto dentro do tempo de simulação, ou seja, que partam entre as 6 e 8 horas, e chegam ao destino antes das 8 horas. Assim, para os cálculos dos custos de viagem do cenário base, dos veículos da Tabela 4.1, foram considerados da zona de 5 minutos 152 veículos, da zona de 10 minutos 1339 veículos e da zona de 15 minutos 1895 veículos. Para conversão de custo monetário em tempo foi considerando o valor do salário-mínimo a vigorar a partir de 1º de janeiro de 2021, em que o valor horário do salário-mínimo corresponde a R\$ 5,00 (cinco reais).

## **5. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **5.1. APRESENTAÇÃO**

Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados da aplicação do método proposto. As análises vêm atender os objetivos específicos da dissertação, isto é, estão focadas principalmente no cálculo das emissões e dos custos de viagem. Em seguida é analisado o aumento de número dos usuários de metrô após a aplicação do método. Lembra-se que o veículo compartilhado (VC), o veículo compartilhado elétrico (VCE), o veículo compartilhado autônomo (VCA) e o veículo compartilhado autônomo elétrico (VCAE) têm os mesmos dados de viagem e só diferem na emissão produzida.

### **5.2. DADOS DE VIAGEM DOS VEÍCULOS NOS CENÁRIOS**

Nesta análise será descrito o status e dados de viagem dos veículos após o final da simulação de cada cenário, na rede viária de Ceilândia (Tabela 5.1) e na rede viária do Plano Piloto (Tabela 5.2). Nas tabelas, os veículos carregados são aqueles que foram transportados na simulação na etapa de montagem da base de simulação; veículos inseridos são o quantitativo de veículos que entraram na simulação; veículos correndo são os veículos que ainda não chegaram ao destino quando a simulação finalizou após os 7200 segundos (2 horas de simulação); e veículos esperando são os veículos que ainda aguardam serem inseridos na simulação, que não puderam ser incluídos devido à falta de espaço viário.

Nos cenários simulados na rede viária de Ceilândia (Tabela 5.1), em relação ao quantitativo de veículos, ao comparar os veículos inseridos e esperando, é possível perceber que no cenário base 94,8% dos veículos carregados foram inseridos na simulação. Sendo que nos demais cenários simulados a porcentagem de veículos inseridos foi acima desta porcentagem. Porém ao comparar os veículos ainda correndo na simulação com os veículos inseridos, isto é, a porcentagem dos veículos inseridos que ainda não chegaram em seu destino, no cenário base 23,3% ainda estão correndo quando a simulação chegou no seu final. Observa-se também que vários outros cenários apresentaram uma porcentagem maior que esta, destacando-se os cenários com origem nas zonas de 5 minutos com frota de 20 veículos compartilhados (27%), e todos desta zona com veículos compartilhados autônomos, com frotas de 10 (26,2%), 25 (26,0%) e 30 veículos (26,1%).

Ao comparar a velocidade média nos cenários, alguns apresentaram velocidade abaixo do cenário base de 8,13 m/s (29,268 km/h), destacando-se o cenário com origem nas zonas de 5 minutos com frota de 20 veículos compartilhados (28,404 km/h) e frota de 10 veículos compartilhados autônomos (28,476 km/h). Cenários com valores bem acima do cenário base tem-se o cenário com origem na zona de 15 minutos com 200 veículos compartilhados (33,084 km/h) e a zona de 10 minutos com 250 veículos compartilhados autônomos (32,94 km/h). Em relação a duração média da viagem, percebe-se que 4 cenários apresentaram duração acima do cenário base, tendo como maior valor o cenário com as zonas de 5 minutos com 20 veículos compartilhados com duração de 1256,91 segundos (20,9485 minutos) e menor duração os cenários com as zonas de 15 minutos com 200 veículos compartilhados (16,26) e 300 veículos compartilhados autônomos (16,297167). Quando analisado o quesito segurança, em relação ao quantitativo de colisões, em que o cenário base apresentou 4 colisões, três cenários apresentaram valores superiores a este. Tendo ocorrido 5 colisões nas zonas de 5 minutos com 20 veículos compartilhados autônomos. Já na mesma zona e tipo de veículo, mas com uma frota de 10 veículos, ocorrem 6 colisões. Este mesmo número de colisões ocorre na zona de 15 minutos com 200 veículos compartilhados.

Assim, em relação a todos os parâmetros analisados dos dados de viagem (quantitativo de veículos, velocidade média, duração média da viagem e número de colisões), pode-se dizer que se destacaram positivamente os cenários (em cada zona): nas zonas de 5 minutos a frota com 25 veículos compartilhados, e nas zonas de 10 e 15 minutos as frotas com 250 veículos compartilhados autônomos. De todos os cenários o que mais apresentou aspectos negativos foi o cenário com as origens nas zonas de 5 minutos com frota de 10 veículos compartilhados autônomos, mostrando que uma implantação com uma pequena frota pode não apresentar os benefícios esperados.

Nos cenários simulados na rede viária do Plano Piloto (Tabela 5.2), em relação ao número de veículos, ao observar os veículos inseridos e veículos esperando, no cenário base 77,2% dos veículos carregados foram inseridos na simulação. Observa-se também que outros cenários apresentaram uma taxa menor que esta, destacando-se negativamente o cenário das zonas de 5 minutos com 30 veículos compartilhados autônomos (75,5%) e positivamente o cenário das zonas de 15 minutos com 500 veículos compartilhados (78,7%). Este cenário é o que apresenta maior velocidade média (36,36 km/h) e menor porcentagem de veículos inseridos dos

inseridos que ainda não chegaram em seu destino final (correndo) (33,3%), sendo um dos cenários com maior número de colisões.

Em relação a velocidade média, todos os cenários das zonas de 15 minutos com veículos compartilhados autônomos apresentaram velocidade acima do cenário base de 33,768 km/h. No que se refere a duração média de viagem, no cenário base tem-se 1055,85 segundos (17,5975 minutos), com somente 3 dos demais cenários com tempo superior. O maior valor foi de 18,899167 minutos das zonas de 10 minutos com 300 veículos compartilhados autônomos, tendo também a menor velocidade média entre todos os cenários (31,68 km/h) e maior porcentagem de veículos ainda correndo no final da simulação (41,3%).

Após analisar dos parâmetros dos dados de viagem (quantitativo de veículos, velocidade média, duração média da viagem e número de colisões), pode-se dizer que se destacaram positivamente os cenários, em cada zona: nas zonas de 5 minutos a frota com 40 veículos compartilhados; nas zonas de 10 minutos a frota com 150 veículos compartilhados autônomos; e, na de 15 minutos a frota de 200 veículos compartilhados autônomos. Pode-se dizer que os que apresentaram aspectos mais negativos foram os das zonas de 5 minutos com 60 veículos compartilhados e das zonas de 10 minutos com 300 veículos compartilhados autônomos.

Tabela 5.1 – Dados de viagem dos veículos nos cenários simulados na rede viária de Ceilândia

		Veículos Carregados	Veículos Inseridos	Veículos Correndo	Veículos Esperando	Colisões	Comprimento médio da rota (km)	Velocidade média (km/h)	Duração média de viagem (minutos)	
<b>Cenário Base - Ceilândia</b>		53003	50257	11703	2736	4	6,60807	29,268	20,064833	
<b>Zonas de 5 minutos</b>	<b>VC</b>	<b>10</b>	52804	50207	11415	2587	4	6,61965	29,916	19,123333
		<b>20</b>	52814	50112	13517	2692	2	6,37807	28,404	20,9485
		<b>25</b>	52819	50881	12110	1928	2	6,54225	30,06	19,541667
		<b>30</b>	52824	50469	12647	2345	3	6,46858	29,412	19,571667
	<b>VCA</b>	<b>10</b>	52804	50329	13177	2465	6	6,37338	28,476	20,403667
		<b>20</b>	52814	50305	12430	2499	5	6,43062	29,232	19,838333
		<b>25</b>	52819	50625	13174	2184	1	6,45094	29,016	20,2055
		<b>30</b>	52824	50298	13126	2516	3	6,60959	29,412	20,793167
<b>Zonas de 10 minutos</b>	<b>VC</b>	<b>150</b>	51127	48696	11644	2421	1	6,46966	31,14	18,181
		<b>200</b>	51177	49094	8551	2073	3	6,65102	32,724	16,503167
		<b>250</b>	51227	48982	9507	2235	2	6,71591	32,22	17,6805
	<b>VCA</b>	<b>150</b>	51127	48541	12018	2576	3	6,50111	31,068	18,420833
		<b>200</b>	51177	48778	12319	2389	3	6,54327	30,888	18,9595
		<b>250</b>	51227	48806	8531	2411	2	6,74344	32,94	16,828833
<b>Zonas de 15 minutos</b>	<b>VC</b>	<b>200</b>	50100	47882	8655	2209	6	6,5072	33,084	16,26
		<b>250</b>	50150	48293	9875	1848	3	6,40814	32,292	17,042333
		<b>300</b>	50200	47791	11278	2400	3	6,31894	31,788	17,555
	<b>VCA</b>	<b>200</b>	50100	48025	10268	2066	3	6,3492	32,4	16,861
		<b>250</b>	50150	48157	11041	1984	2	6,39523	31,716	17,151167
		<b>300</b>	50200	47936	8382	2255	2	6,55484	32,832	16,297167

Tabela 5.2 – Dados de viagem dos veículos nos cenários simulados na rede viária do Plano Piloto

		Veículos Carregados	Veículos Inseridos	Veículos Correndo	Veículos Esperando	Colisões	Parada de emergência	Comprimento médio da rota (km)	Velocidade média (km/h)	Duração média de viagem (min)	
<b>Cenário Base - Plano Piloto</b>		61210	47229	18236	13964	4	1	6,9622	33,768	17,5975	
<b>Zonas de 5 minutos</b>	<b>VC</b>	<b>20</b>	61021	47057	18861	13947	1	0	6,77326	32,616	18,264833
		<b>30</b>	61031	46772	17683	14242	5	0	6,868	33,192	17,986
		<b>40</b>	61041	46569	16345	14455	0	0	6,86177	34,056	16,855
		<b>60</b>	61061	47004	19287	14040	2	0	6,76413	32,292	18,757333
	<b>VCA</b>	<b>20</b>	61021	46812	17338	14192	2	0	6,7761	33,228	17,618833
		<b>30</b>	61031	46090	15782	14924	3	0	6,84957	34,092	16,664167
		<b>40</b>	61041	46772	18623	14252	4	0	6,72192	33,156	17,878333
		<b>60</b>	61061	46597	18111	14447	1	0	6,84751	32,472	18,3485
<b>Zonas de 10 minutos</b>	<b>VC</b>	<b>150</b>	59334	46094	15715	13223	2	0	6,83968	35,856	15,757167
		<b>200</b>	59384	45963	17071	13404	1	0	6,61238	33,372	17,4115
		<b>300</b>	59484	46739	18063	12728	0	0	6,85606	34,704	17,179167
		<b>400</b>	59584	46467	16844	13100	3	0	6,86964	33,084	18,012667
	<b>VCA</b>	<b>150</b>	59334	46314	15808	13003	2	0	6,93302	35,208	16,319
		<b>200</b>	59384	46488	19030	12879	2	0	6,62897	31,968	18,011833
		<b>300</b>	59484	46039	19030	13428	3	0	6,67587	31,68	18,899167
		<b>400</b>	59584	46147	17819	13420	1	0	6,70878	33,516	17,747333
<b>Zonas de 15 minutos</b>	<b>VC</b>	<b>200</b>	58307	45625	17579	12665	3	0	6,78692	34,776	16,383
		<b>250</b>	58357	45540	15849	12800	4	0	6,78909	34,956	16,434167
		<b>400</b>	58507	45651	16802	12839	2	0	6,58322	33,768	17,457
		<b>500</b>	58607	46122	15358	12468	5	0	6,82233	36,36	16,314667
	<b>VCA</b>	<b>200</b>	58307	45762	15934	12528	0	0	6,7416	35,712	16,229167
		<b>250</b>	58357	45429	15565	12911	4	0	6,80928	35,136	16,490833
		<b>400</b>	58507	45945	17063	12545	4	0	6,80762	35,388	17,034333
		<b>500</b>	58607	45825	16891	12765	4	0	6,78235	34,236	17,5505

### 5.3. CÁLCULO DAS EMISSÕES

Para o cálculo das emissões, foram considerados as emissões dos gases dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos (HC), e material particulado (MP). Estes dados foram obtidos do arquivo de saída *tripinfo*, após simulação no *software* SUMO, que informa a soma de todos os poluentes emitidos durante a viagem de um veículo durante toda a simulação.

Na Figura 5.1 é apresentado um comparativo das emissões acumuladas durante toda as simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia. Para o cálculo, considera-se a substituição de viagens de veículos convencionais do cenário base, com origem na zona de influência de 5 minutos de Ceilândia e destino a zona de influência de 5 minutos do Plano Piloto. Na simulação foram retirados 209 veículos convencionais e inseridos 287 pessoas e as respectivas frotas de veículos compartilhados.

É possível observar, nos gráficos (a) da Figura 5.1, referentes a rede viária de Ceilândia, que alguns cenários acabam por possuir maior emissão do que o cenário base, principalmente os cenários com VC e VCE com frota de 20 veículos. Os cenários com frota de 10 VC e VCE foram os que apresentaram menor número de emissões. Já na análise dos gráficos (b) da Figura 5.1, referente a rede viária do Plano Piloto, é perceptível também que alguns cenários possuem maior emissão que o cenário base, principalmente os cenários com VC e VCE com frota de 60 veículos. Já as menores emissões estão nos cenários com as frotas de 30 VCA e VCAE. Porém percebe-se que não há muita diferença nas emissões entre o cenário base e os demais cenários com veículos compartilhados.

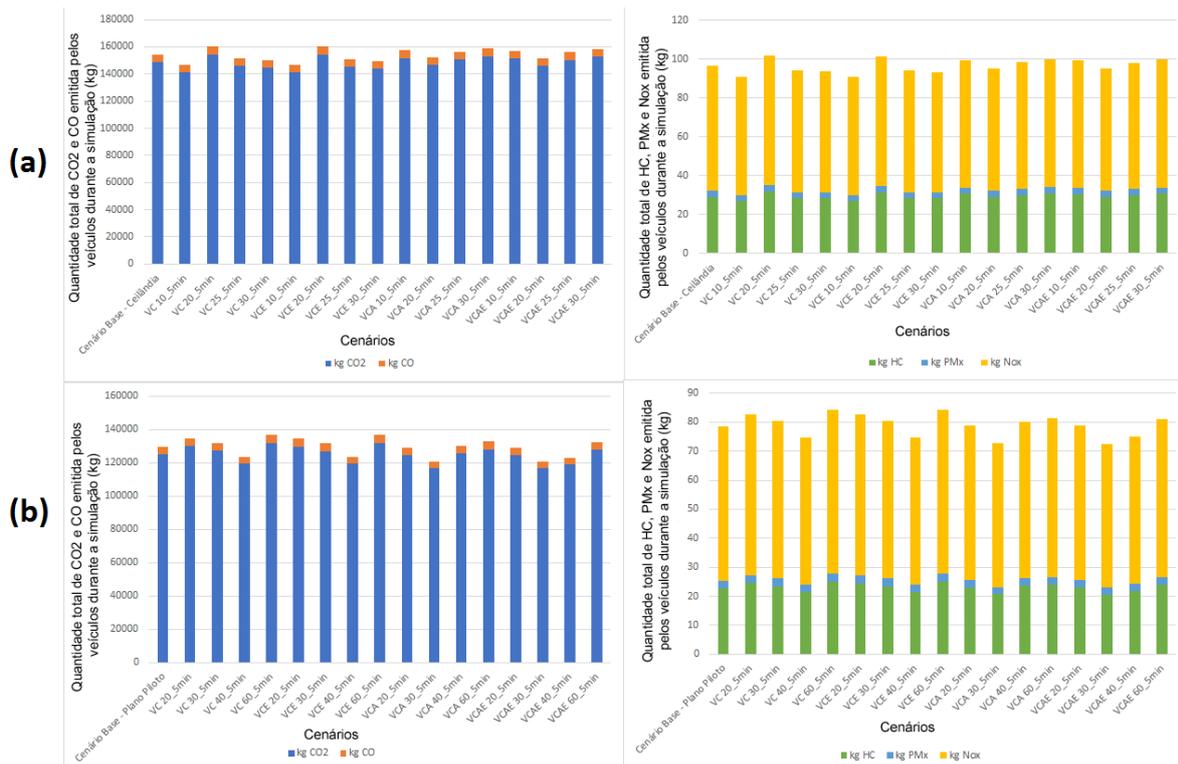


Figura 5.1 – Emissões nas redes viárias com viagens de Veículo Compartilhado com origem nas zonas de 5 minutos da estação Terminal

Na Figura 5.2 é apresentado um comparativo das emissões acumuladas durante toda as simulações com o uso de veículos compartilhados nas viagens com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia, sendo 2027 veículos particulares substituídos por 2803 pessoas e inseridas as frotas dos vários tipos de veículo compartilhados. Nos gráficos (a) da Figura 5.2, com as simulações na rede viária de Ceilândia, nota-se que as emissões dos cenários com veículos compartilhados são menores que as emissões no cenário base, destacando os cenários com frotas de 200 VCE e 250 VCAE. Nos gráficos (b) da Figura 5.2, com os gráficos das emissões na rede viária do Plano Piloto. Somente um cenário possui maior emissão do que o cenário base, que seria a frota com 300 VCA. Já o cenário com 150 VCE apresentou o menor quantidade de emissões.

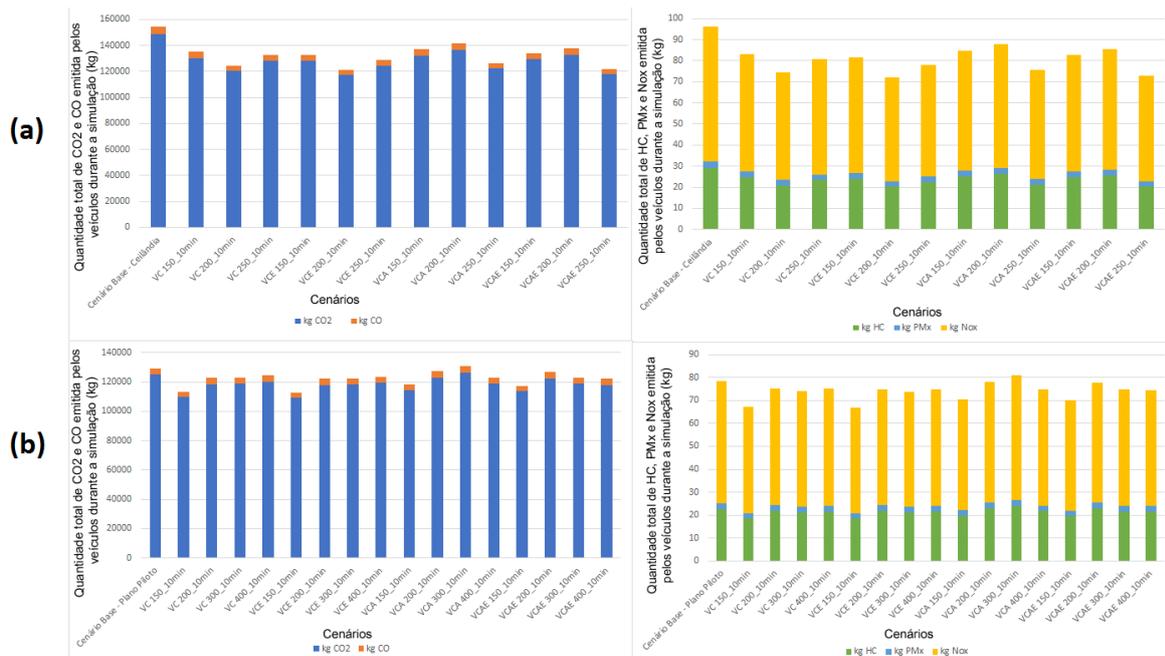


Figura 5.2 – Emissões das redes viárias com viagens de Veículo Compartilhado com origem nas zonas de 10 minutos da estação Terminal

Na Figura 5.3 é apresentado um comparativo das emissões acumuladas nos cenários com veículos compartilhados com origem nas zonas de 15 minutos, em que 2027 veículos particulares foram substituídos por 2803 pessoas e frotas de veículos compartilhados. É possível notar que todos os cenários apresentaram menores emissões ao se comparar com o cenário base, principalmente nos cenários em que foram implantados veículos elétricos. Sendo que, nos cenários da rede viária de Ceilândia (gráficos (a)) as menores emissões são com frotas de 300 VCAE e 200 VCE. Já na rede viária do Plano Piloto (gráficos (b)), as menores emissões ocorrem com frota de 500 VCE. Ao analisar as simulações com veículos autônomos, as menores emissões ocorrem nas frotas de 200 e 250 VCAE.

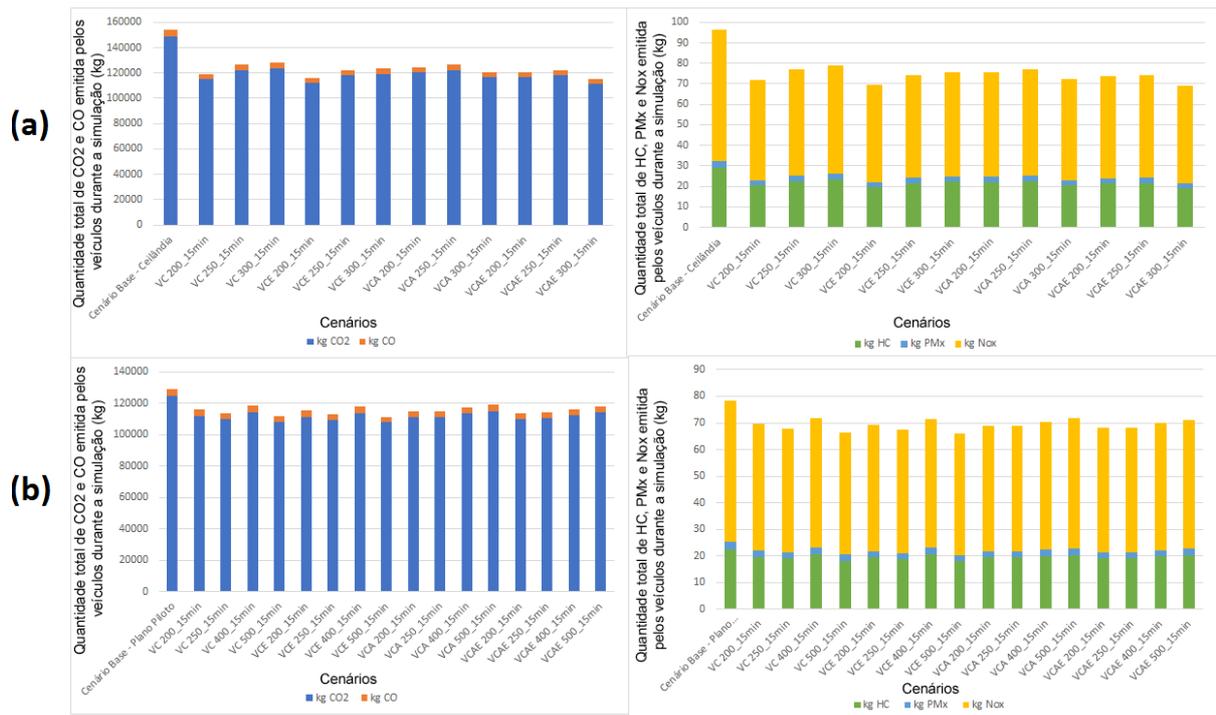


Figura 5.3 – Emissões das redes viárias com viagens de Veículo Compartilhado com origem nas zonas de 15 minutos da estação Terminal

#### 5.4. CÁLCULO DOS CUSTOS DE VIAGEM

Nesta etapa são considerados somente para a análise pessoas que chegaram ao destino antes do final da simulação, ou seja, que chegaram antes das 8 horas, como apresentado na Tabela 4.4. O mesmo será considerado para os cenários base, em que são considerados somente os veículos que chegaram no destino antes das 8 horas da manhã. Sendo assim, nos cenários com a origem nas zonas de Ceilândia de 10 min e destino as zonas do Plano Piloto de 5 min, dos 209 veículos particulares 152 serão considerados. Nos cenários com a origem nas zonas de Ceilândia de 10 min, dos 2027 veículos particulares são considerados 1337. Nos cenários com a origem nas zonas de Ceilândia de 15 min dos 3104 veículos são considerados 1895. O quantitativo de veículos foi estimado tomando em conta o tempo de viagem e a distância das viagens obtidos no *Google Maps*.

Para o cálculo dos custos de viagem são consideradas as equações (2) e (3). A equação (2) foi usada para o cálculo dos custos ( $C_1$ ) nas simulações com veículos compartilhados implantados, enquanto a equação (3) foi usada para o cálculo dos custos ( $C_2$ ) do cenário base.

$$C_1 = t_{E1} + t_{V1} + t_{C1} + t_{E2} + t_{V2} + t_{C2} + t_{E3} + t_{V3} + F_1 \quad (2)$$

$$C_2 = t_V + F_2 \quad (3)$$

Onde:

$t_{E1}$  é o primeiro tempo de espera, quando o passageiro aguarda na origem o veículo compartilhado;

$t_{V1}$  é o primeiro tempo de viagem, sendo o tempo da origem até a estação Terminal Ceilândia;

$t_{C1}$  é o primeiro tempo de caminhada, sendo a duração da caminhada do estacionamento da estação Terminal Ceilândia até entrar na estação;

$t_{E2}$  é o tempo de espera do metrô, em que foi usada a Tabela 4.1;

$t_{V2}$  é o tempo de viagem dentro do metrô, e foi usado também a Tabela 4.1;

$t_{C2}$  é o tempo de caminhada da estação do Plano Piloto até o estacionamento desta estação;

$t_{E3}$  é o tempo de espera de quando a pessoa aguarda o veículo compartilhado na estação do Plano Piloto;

$t_{V3}$  é o tempo de viagem da estação do Plano Piloto até o destino;

$F_1$  é o custo monetário da integração do metrô com o veículo compartilhado convertido em unidade de tempo;

$t_V$  é o tempo de viagem dos veículos convencionais nos cenários base;

$F_2$  é o custo monetário do combustível dos veículos convencionais nos cenários base convertido em unidade de tempo.

Para todas as análises de custo de viagem e tempo de espera foi utilizada da estatística descritiva (gráficos descritivos violino e boxplot) a fim de avaliar a distribuição dos dados e na identificação de *outliers* e na concentração ou dispersão dos dados da simulação.

#### 5.4.1. Tempo de espera - Ceilândia

Inicialmente é analisado os tempos de espera  $t_{E1}$  dos veículos compartilhados nos cenários realizados na rede viária de Ceilândia, ou seja, quanto tempo a pessoa na origem espera o veículo compartilhado. Para essa análise é usado o gráfico violino, sendo ideal a parte inferior do gráfico mais amplo e a parte superior delgada, apresentando assim menores tempo de espera.

Na Figura 5.4 é apresentado os tempos de espera 1 nas simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia. É possível perceber que as frotas com 10 VC e VCA apresentam uma distribuição muito ampla de valores, mostrando que enquanto existem pessoas que esperam pouco outras esperam muito. Ao analisar somente os gráficos dos VC nota-se boas distribuições nas frotas de 25 e 30 veículos, porém a primeira apresenta uma presença considerável de *outliers*, sendo assim para VC a melhor distribuição de tempo de espera 1 se encontra na frota de 30 veículos. Já os VCA, o tempo de espera 1 nas frotas de 20 e 30 veículos possuem boas distribuições, sendo que na frota de 20 veículos observa-se mais valores se concentrando na parte inferior do gráfico violino e menos *outliers*.

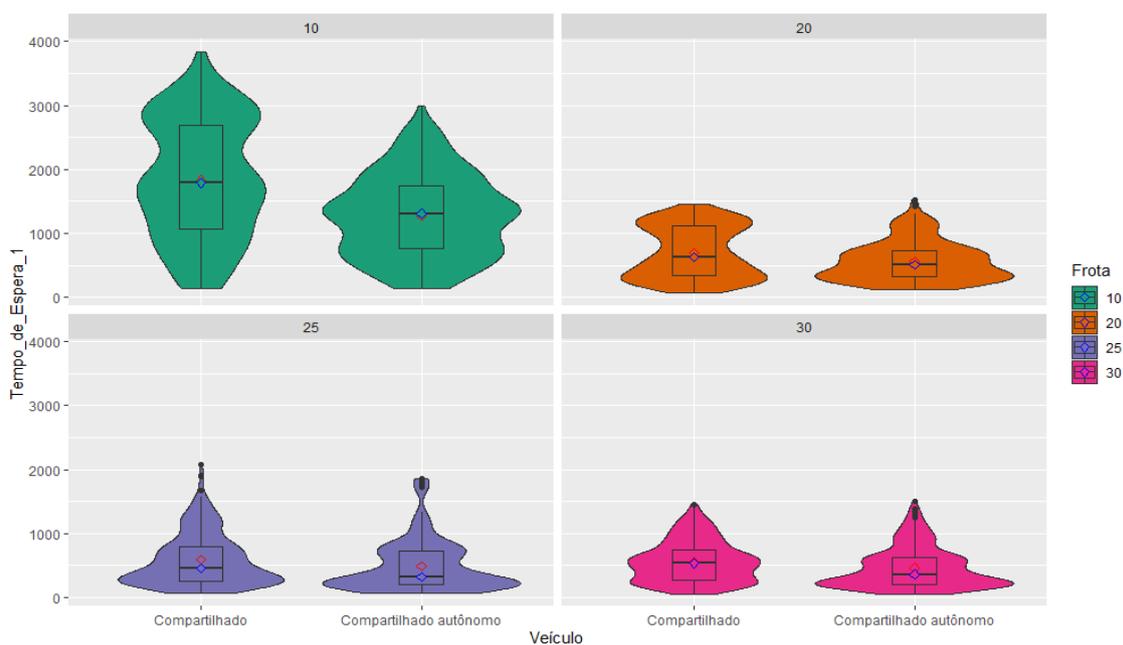


Figura 5.4 – Tempo de espera 1 nas simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia

Os gráficos com os dados de tempo de espera 1 nas simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia são mostrados na Figura 5.5. As distribuições dos tempos de espera 1 não apresentam resultados satisfatórios como na análise anterior. Em todas as frotas de VC e VCA é observado uma média próxima de 2000 segundos (33,33 minutos) de espera e com muitas pessoas esperando mais de 4000 segundos (66,67 minutos), o que acarretaria em usuários desistindo da viagem na vida real. Mas é possível notar que os VCA apresentam melhores distribuições de tempo de espera que os VC, em que o formato do gráfico está mais amplo na parte inferior, isto é, existem menores tempos de espera com os VCA do que com os VC.

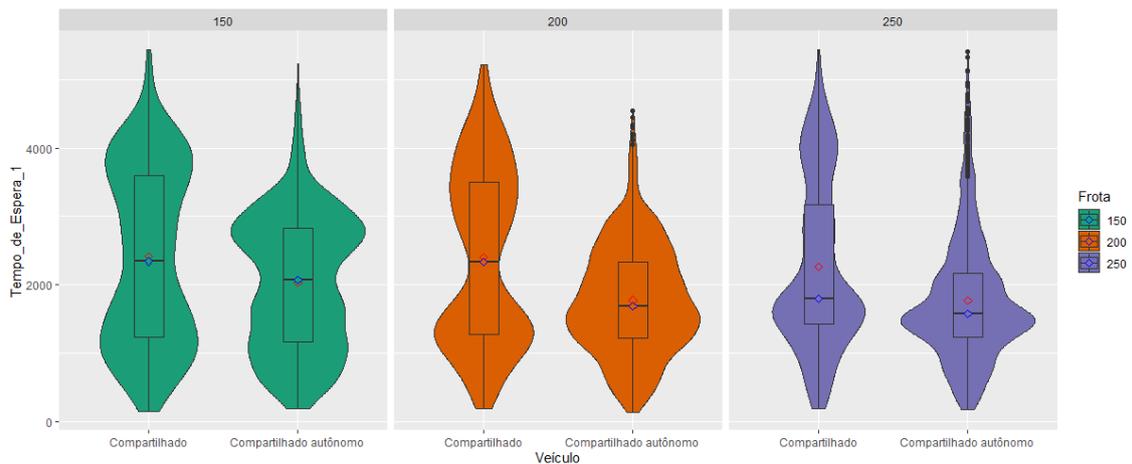


Figura 5.5 – Tempo de espera 1 nas simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia

Na análise do tempo de espera 1 nas simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia (Figura 5.6) mostra resultados com pessoas esperando muito e outras esperando pouco, com média próxima dos 2000 segundos (33,33 minutos) e muitos valores de tempo de espera superior a 4000 segundos (66,67 minutos). Para os VC, nota-se que a pior distribuição é para a frota de 250 veículos, sendo que a parte superior do violino chega nos 6000 segundos (100 minutos), quase o tempo de simulação total de 7200 segundos (120 minutos). Novamente percebe-se que as distribuições nos VCA apresentam menores tempo de espera 1. As simulações com frota de 200 e 250 VCA são as que apresentaram melhor distribuição.

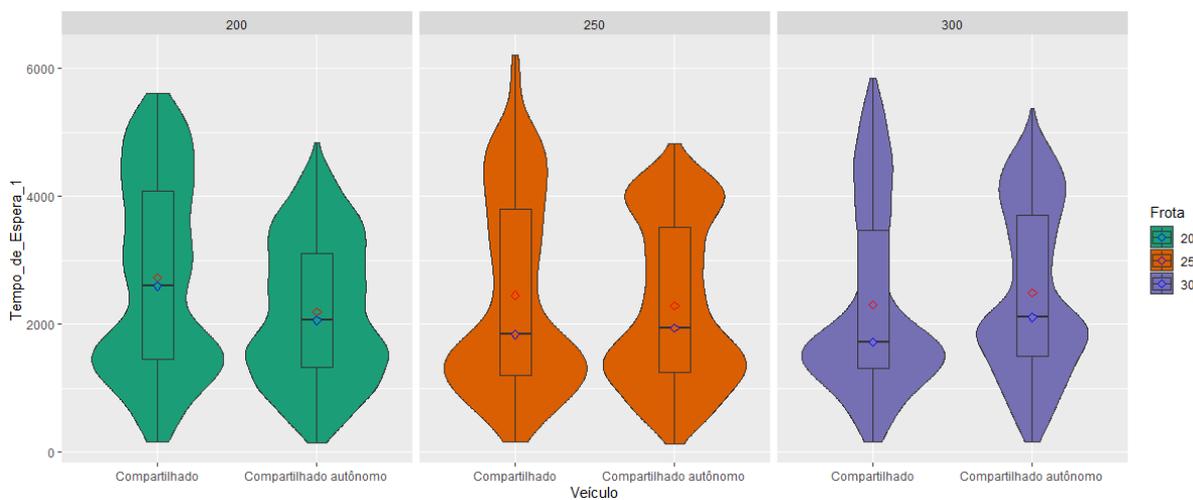


Figura 5.6 – Tempo de espera 1 nas simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia

### 5.4.2. Tempo de espera – Plano Piloto

Já nesta etapa é analisado os tempos de espera  $t_{E3}$  dos veículos compartilhados nos cenários realizados na rede viária do Plano Piloto, ou seja, quanto tempo a pessoa na estação do Plano Piloto espera o veículo compartilhado.

Na Figura 5.7 é apresentado o tempo de espera 3 nas simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia realizados na rede viária do Plano Piloto. Nesta análise, tanto para os VC quanto para os VCA, nota-se que os menores tempos de espera estão na distribuição com frota de 60 veículos. Mesmo esta análise apresentando valores consideráveis de *outliers*, a grande parte dos dados se concentram na parte inferior do violino, com tempos de espera bem próximos de 0 segundos.

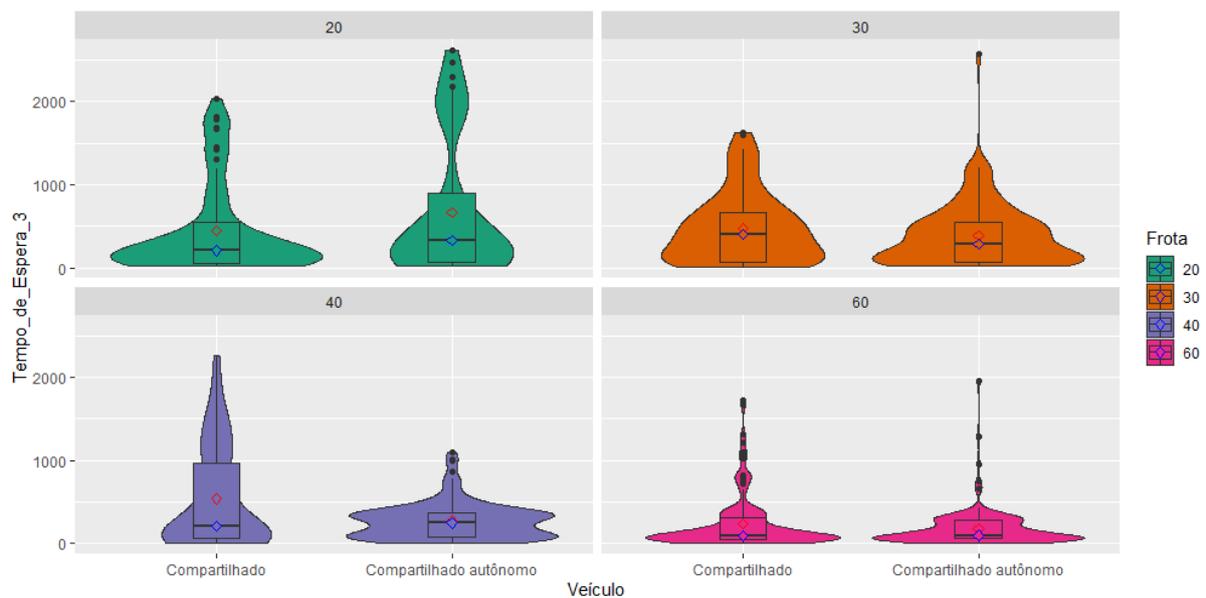


Figura 5.7 – Tempo de espera 3 nas simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia

Já a análise do tempo de espera 3 nas simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia (Figura 5.8), percebe-se que para os VC com frota 400 veículos e VCA com frota de 200 veículos existem muitos *outliers*, ou seja, apesar da maioria das pessoas estarem esperando pouco pelos veículos, existem alguns esperando muito. Na análise dos gráficos dos VC, as frota de 200 e 300 possuem valores de tempo de espera bem distribuídos em torno da média com alguns *outliers*, mostrando que não há grandes diferenças de tempo de espera entre os usuários. Já nas frota de 150 e 400, a parte inferior do gráfico está mais ampla próxima da

média, com mais *outliers*, mas com a maioria das pessoas esperando pouco. Já em relação ao VCA, a frota de 300 veículos tem uma distribuição achatada, com a maioria dos valores abaixo de 250 segundos (4,17 minutos), com praticamente todos os valores próximos da média com poucos *outliers*.

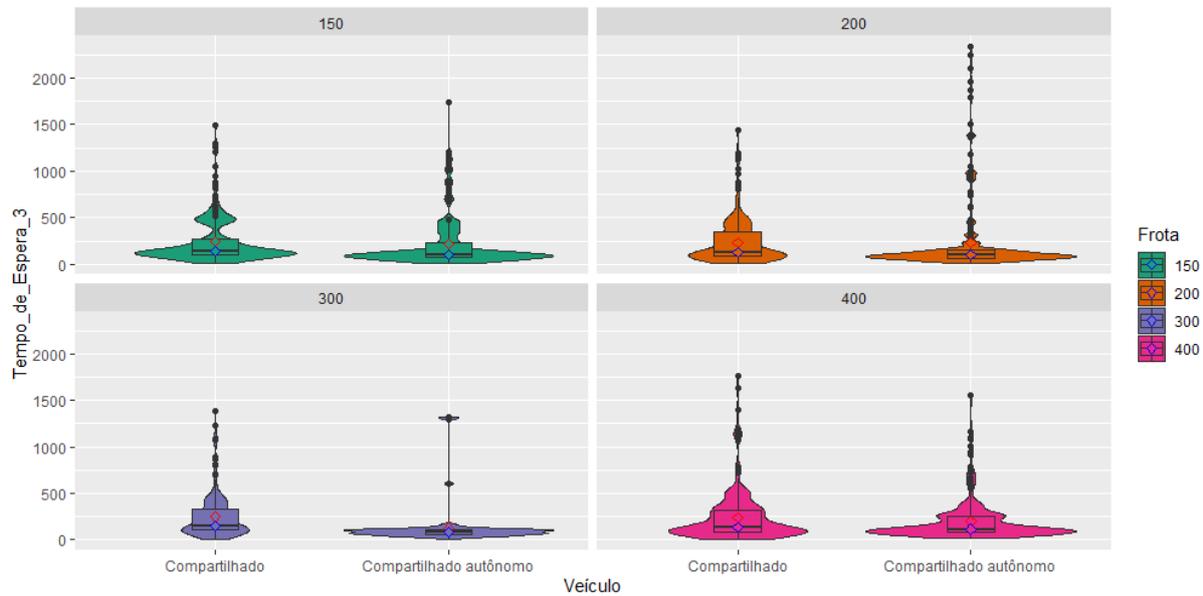


Figura 5.8 – Tempo de espera 3 nas simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia

Para análise do tempo de espera 3 nas simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia (Figura 5.9) para os tempos de espera dos VC, nota-se que a frota com 250 veículos apresenta os menores tempo, e que mesmo com *outliers*, estes não ultrapassam 1000 segundos (16,67 minutos). Já para os VCA, desconsiderando os *outliers*, a distribuição nas frotas de 250, 400 e 500 veículos são bem semelhantes, em que a parte inferior do violino é mais ampla próximo da média, porém ao analisar os *outliers*, a melhor distribuição é da frota de 250 veículos, já que não há valores superiores a 1750 segundos (29,17 minutos).

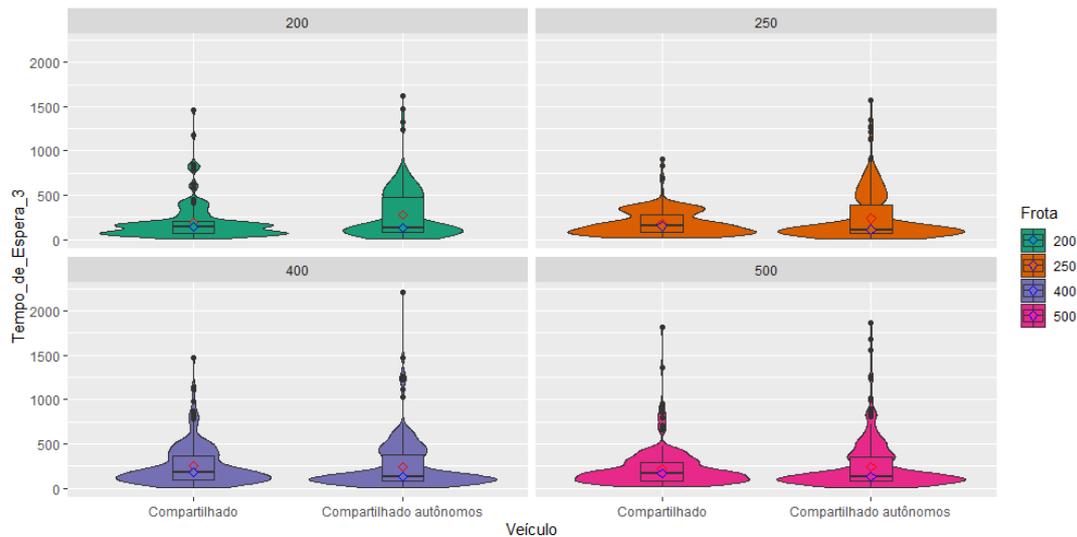


Figura 5.9 – Tempo de espera 3 nas simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia

### 5.4.3. Cálculo dos custos de viagem

Nesta etapa serão analisados os custos de viagem das simulações de cenário base e os cenários com implantação de veículos compartilhados. Para esta análise serão usadas as equações (2) e (3). O Custo Total 1 considera a integração entre metrô e veículo compartilhado custando R\$ 5,50, isto é, a viagem por veículo compartilhado não aumenta o valor da passagem. Já o Custo Total 2 a viagem por veículo compartilhado causa um aumento de 50% na passagem. No Apêndice A é apresentado, a fins de exemplo, o cálculo dos custos de viagem da frota na primeira milha com 30 VC e última milha 20 VC, com 74 usuários do sistema no tempo de simulação. A frota de veículo mencionada nos gráficos é a usada nas simulações da rede viária do Plano Piloto, ou seja, a frota usada nas viagens entre as estações do Plano Piloto e o destino finalizando a última milha.

A Figura 5.10 apresenta a comparação do Custo Total 1 entre as simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia e o cenário base. Observa-se que os custos dos cenários com veículos compartilhados possuem no máximo custo próximo dos 11000 segundos (183,33 minutos ou 3,05 horas), enquanto no cenário base os custos estão próximos dos 13000 (216,67 minutos ou 3,61 horas). Isto mostra que a substituição de viagens com veículos particulares com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia com destino as zonas do Plano por veículos compartilhados acarreta em menores custos de viagem para o usuário, considerando que o valor

da passagem do metrô esteja incluso os deslocamentos por veículos compartilhados. Para os VC a melhor distribuição dos custos de viagem está na frota de 60 veículos, enquanto para os VCA tanto a frota de 40 quanto a de 60 veículos possuem uma distribuição com custos de viagens baixos.

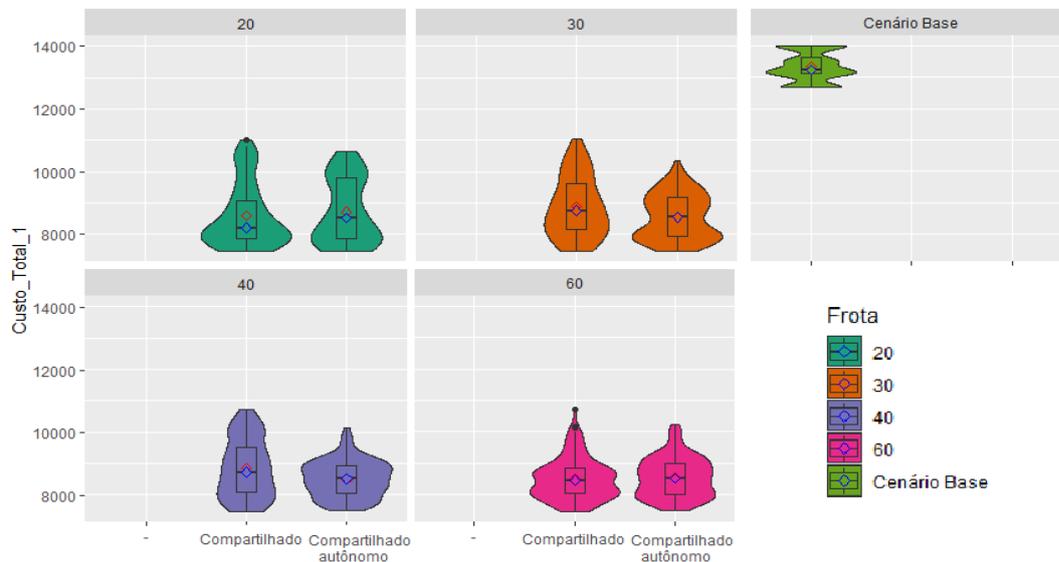


Figura 5.10 – Comparação do Custo Total 1 entre as simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia e o cenário base

Na Figura 5.11 foi considerado que o custo monetário da integração entre veículo compartilhado e metrô aumenta o valor da passagem de metrô em 50%. Os custos máximos, isto é, a ponta do violino, se aproxima do custo de 11000 segundos (183,33 minutos ou 3,05 horas), porém ainda são bem menores que os custos do cenário base.

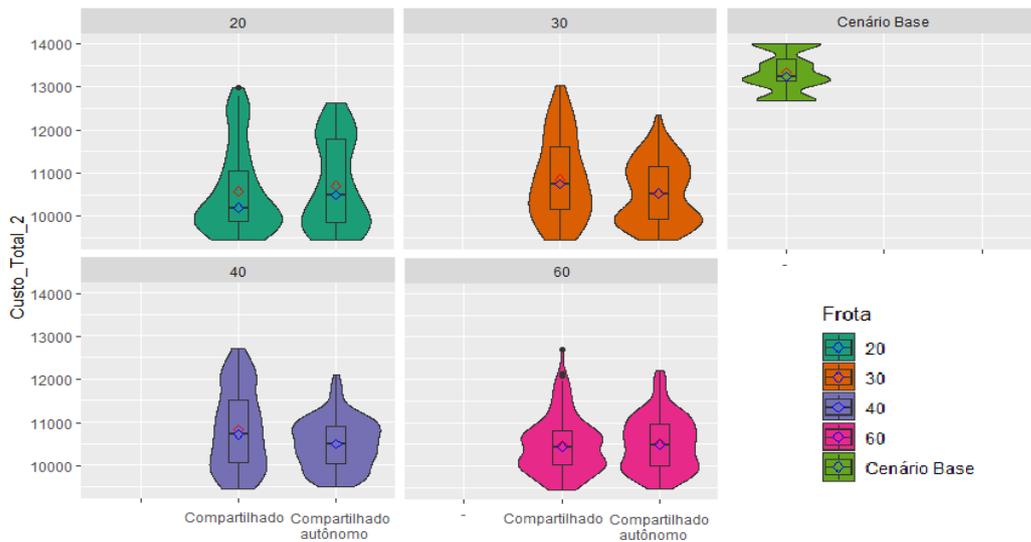


Figura 5.11 – Comparação do Custo Total 2 entre as simulações com origem nas zonas de 5 minutos de Ceilândia e o cenário base

Ao comparar o Custo Total 1 entre as simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia e o cenário base (Figura 5.12), nota-se que com o aumento de veículos que chegam ao destino no cenário base, há uma maior variação nos dados de custos, podendo chegar próximo de 17500 segundos (291,67 minutos ou 4,86 horas). Já os custos dos cenários com veículos compartilhados, os valores máximos se aproximam de 11250 segundos (187,5 minutos ou 3,125 horas). Nota-se que os cenários com VCA apresentam menores custos, com a maioria dos dados na parte inferior do violino, principalmente nos cenários com frota de 200, 300 e 400 veículos.

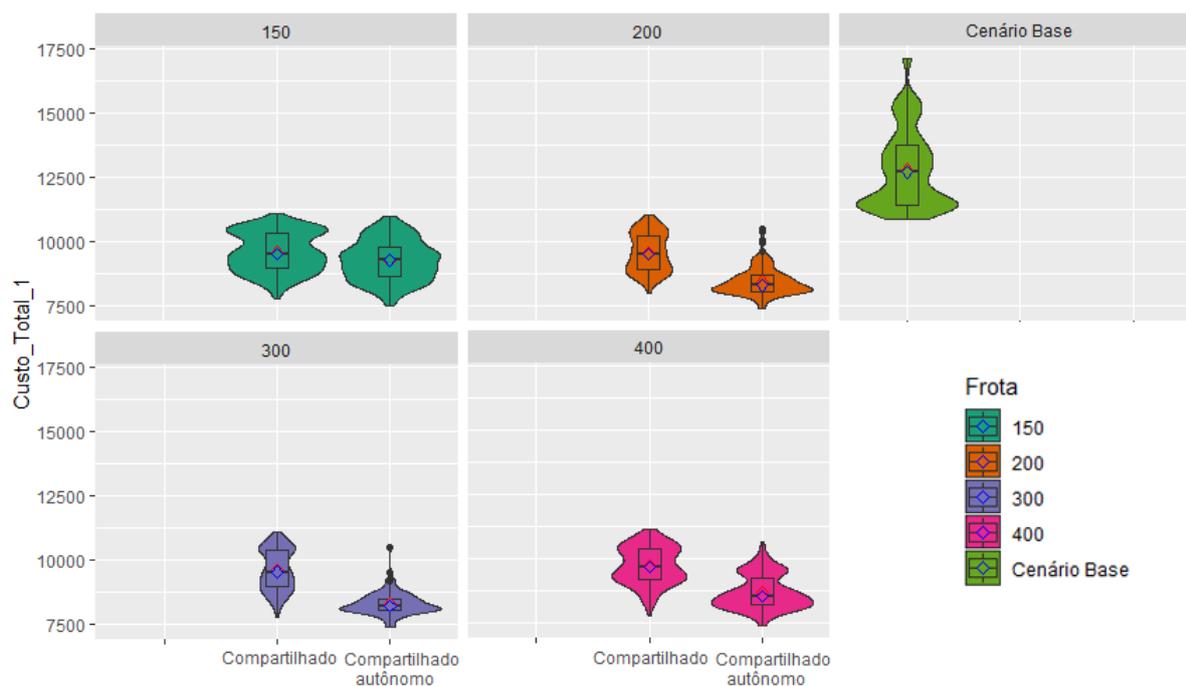


Figura 5.12 – Comparação do Custo Total 1 entre as simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia e o cenário base

Já na análise do Custo Total 2 nas simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia e o cenário base (Figura 5.13), os custos na extremidade superior do violino nos cenários com veículos compartilhados começa a se aproximar da média dos custos do cenário base, porém ainda apresentam valores menores, principalmente nas simulações com VCA.

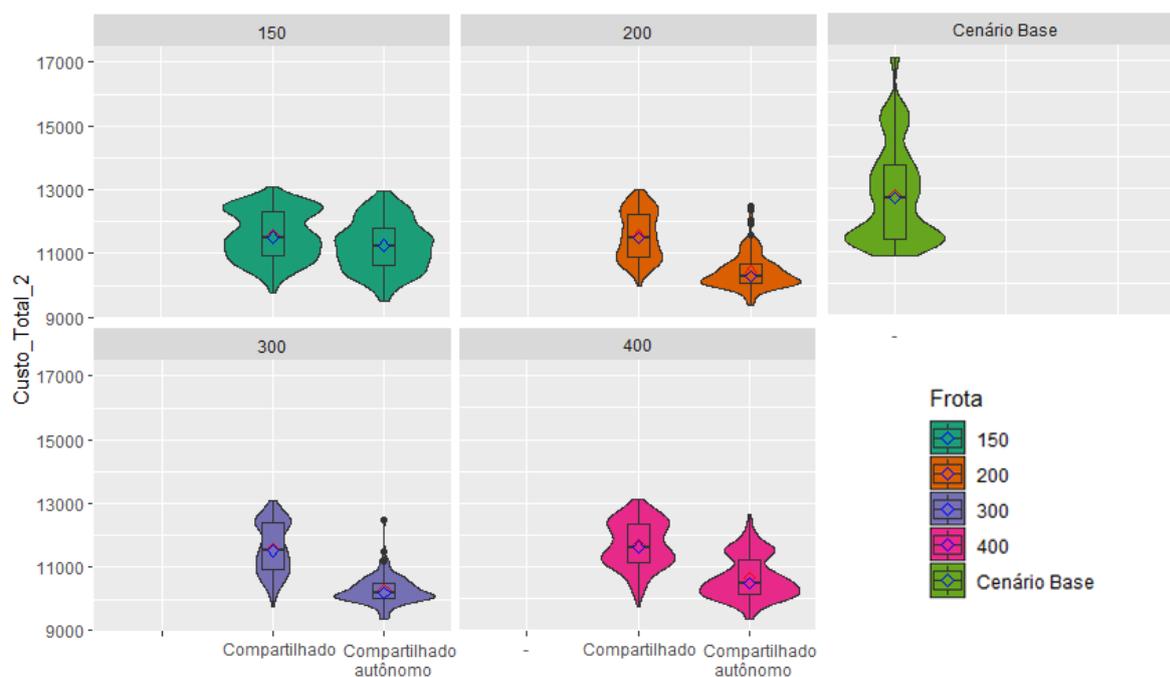


Figura 5.13 – Comparação do Custo Total 2 entre as simulações com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia e o cenário base

E por fim, a análise dos custos totais 1 e 2 das simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia e o cenário base pode ser observado na Figura 5.14 e Figura 5.15, respectivamente.

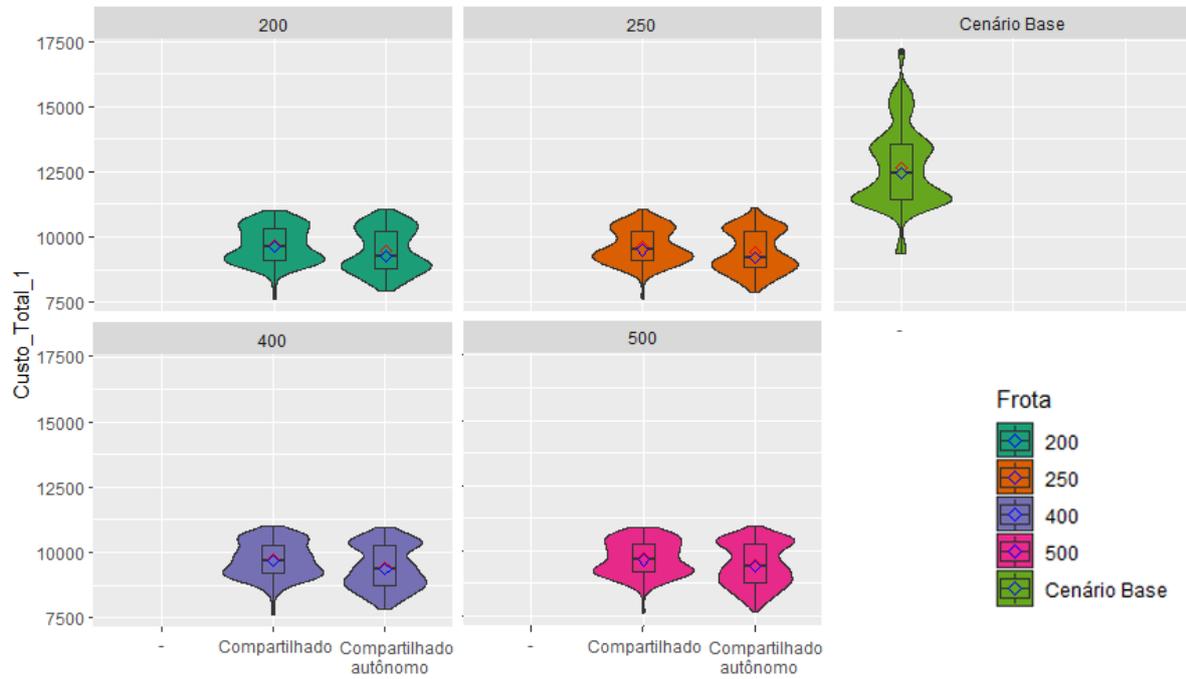


Figura 5.14 – Comparação do Custo Total 1 entre as simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia e o cenário base

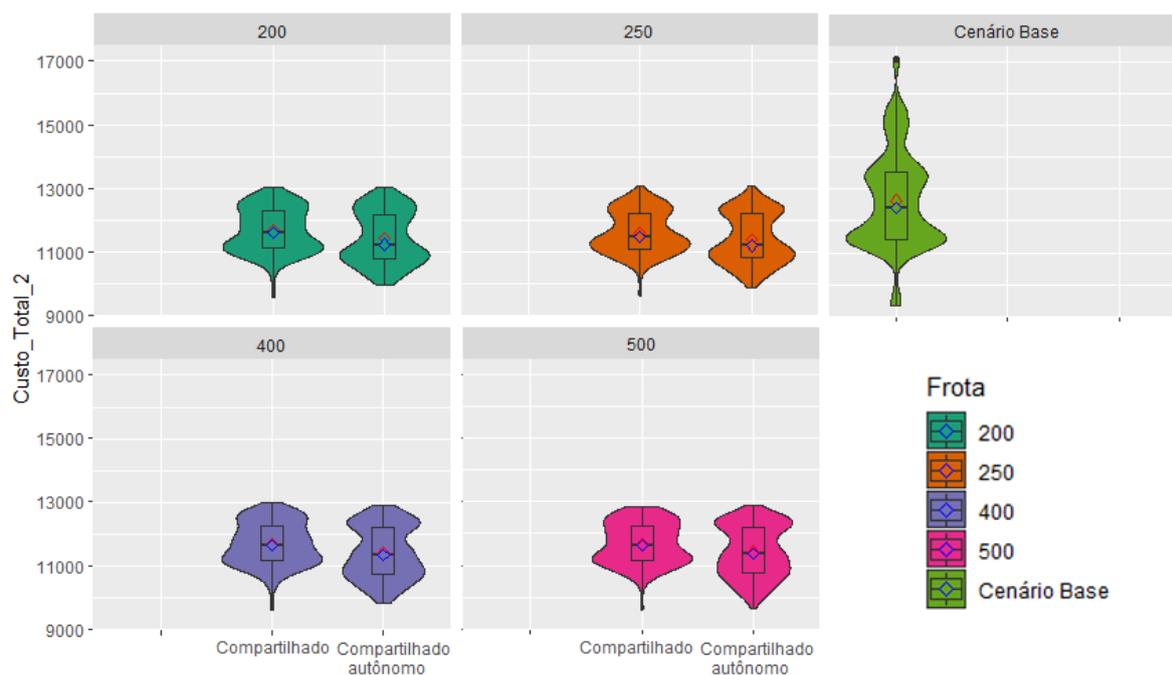


Figura 5.15 – Comparação do Custo Total 2 entre as simulações com origem nas zonas de 15 minutos de Ceilândia e o cenário base

Mesmo com o aumento do número de veículos chegando ao destino no cenário base, os custos de viagem não se alteraram muito ao se comparar com a análise anterior. Já os custos dos VC e VCA são bastantes semelhantes em cada frota, e os custos não superam o valor de 11250 segundos (187,5 minutos ou 3,125 horas), tendo ainda custos inferiores aos do cenário base. Ao incrementar o valor da passagem de metrô em 50% devido ao uso dos veículos compartilhados, no Custo Total 2 os custos das viagens por veículos compartilhados começam a se aproximar do custo do cenário base, porém ainda possui valores médios menores.

## 5.5. CÁLCULO DO NÚMERO DE VIAGENS POR METRÔ

Com a aplicação do método proposto é necessário analisar se ao direcionar essas novas viagens para o sistema metroviário pode-se sobrecarregar o sistema, aumentando o quantitativo de viagens. Na Tabela 5.3 é apresentado a matriz O/D das viagens que ocorrem entre as 6 e 8 horas da manhã com destino às estações do Plano Piloto. Já na Tabela 5.4 é apresentado o aumento de viagens com implantação da integração de veículos compartilhados no sistema de transporte público por metrô em Brasília, com o quantitativo de pessoas que chegam na estação destino antes das 8 horas, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 5.3 – Matriz Origem/Destino das viagens com destino às estações do Plano Piloto das 6 às 8 horas da manhã

Origem/Destino	Zonas de 5 minutos	Zonas de 10 minutos	Zonas de 15 minutos	Outra RA	Plano Piloto	Cenário Atual
Estação 2 (114 Sul)	0	0	56	609	0	665
Estação 3 (112 Sul)	50	119	0	349	0	518
Estação 4 (108 Sul)	169	126	394	1080	54	1823
Estação 5 (102 Sul)	168	278	243	1919	54	2661
Estação 6 (Galeria)	174	533	896	4351	171	6125
Estação 7 (Central)	291	337	806	3639	76	5150

Tabela 5.4 – Aumento do número de viagens por metrô nos cenários

	Zonas de 5 minutos		Zonas de 10 minutos		Zonas de 15 minutos	
	VC 30	VCA 20	VC 200	VCA 150	VC 200	VCA 250
Frota 1 (primeira milha)	VC 30	VCA 20	VC 200	VCA 150	VC 200	VCA 250
Frota 2 (última milha)	VC 60	VCA 60	VC 200	VCA 400	VC 400	VCA 500
Estação 2	710	697	665	665	670	665
Estação 3	540	559	519	518	518	518
Estação 4	1885	1885	1836	1823	1844	1833
Estação 5	2661	2661	2685	2700	2671	2743
Estação 6	6125	6125	6172	6176	6189	6178
Estação 7	5150	5150	5375	5389	5359	5423
Aumento (%)	0,76%	0,80%	1,83%	1,94%	1,82%	2,47%

Na Tabela 5.4 a frota 1 corresponde o número de veículos compartilhados escolhido nas simulações que ocorrem na rede viária de Ceilândia, na primeira milha, conforme Tabela 4.3, sendo escolhida frota de veículo com maior número de pessoas chegando à estação Terminal Ceilândia. A frota 2 corresponde às simulações com veículos compartilhados escolhidas na Tabela 4.4, usados na última milha, sendo escolhida as frotas com maior número de pessoas que chegam ao destino. O cenário base corresponde às viagens totais por metrô apresentadas na PMU (METRÔ-DF, 2018a) (conforme os dados de 2016). Como pode ser observado o maior incremento no número de viagens de metrô ocorrem no cenário com VCA, tendo um aumento de 2,47% das viagens totais do cenário base.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1. CONCLUSÕES

Os sistemas de transporte público de passageiros metroviário necessitam de soluções para o aumento de sua eficiência, sendo que estes sistemas têm um papel crítico na redução do congestionamento do tráfego, do consumo de combustível e das emissões de carbono, especialmente nas grandes cidades. O uso de Mobilidade como um serviço (MaaS – *Mobility as a Service*) pode ser usado para fornecer mobilidade porta a porta a partir da integração do transporte urbano de passageiro com diferentes modos de transporte.

A implantação de uma frota de veículos compartilhados, que melhor se adequa à demanda pelo serviço, podendo ser autônomos e/ou elétricos, pode fornecer um transporte de primeira e última milha de um sistema de transporte público por metrô. No futuro, a implantação de veículos autônomos com objetivo de formar cidades sustentáveis, recuperando espaço urbano, podem ser introduzidos no sistema de transporte em frotas de diferentes tamanhos, reforçando uma rede de transporte público. Assim, com o objetivo dessa dissertação em avaliar os impactos econômicos e ambientais da implantação de transporte público com veículo compartilhado na primeira e última milha no sistema de transporte por metrô em Brasília, foi aplicado o método proposto.

Com o objetivo específico de desenvolver cenários de comparação que considerem as condições de integração dos veículos compartilhados com o sistema de metrô, os dados para construção, aplicação e avaliação do modelo são provenientes do *OpenStreetMap* (rede viária) e PMU/DF (matriz O/D). Para a simulação foi usado o software SUMO (*Simulation of Urban MObility*). Para a delimitação da área de estudo foi escolhida como origem das viagens as zonas que se encontram na área de influência da estação Terminal Ceilândia (isócronas de tempo de 5, 10 e 15 minutos da estação) e como destino a área de influência de cada estação do Plano Piloto (isócrona de tempo de 5 minutos das estações). Foram criados dois tipos de cenários, o primeiro é o cenário base com os veículos convencionais, já o segundo tipo de cenário é com veículos compartilhados inseridos na simulação, substituindo viagens de veículos particulares, do cenário base, por viagens, com veículos compartilhados, integradas com o sistema público por metrô na primeira e última milha até um determinado destino, fornecendo um serviço de transporte porta a porta.

Para analisar os benefícios da integração de frotas de veículos compartilhados elétricos com o metrô em função das emissões, foi calculado as emissões em cada cenário. Foram considerados as emissões acumuladas durante toda os cenários dos gases dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos (HC), e material particulado (MP). Alguns cenários, tendo como origem nas zonas de 5 minutos da estação Terminal Ceilândia, apresentaram uma maior emissão do que o cenário base, mas é notável que não há muita diferença nas emissões entre o cenário base e os demais cenários das viagens nas zonas de 5 minutos. A redução de emissões foi possível notar principalmente nos cenários simulados com viagens com a origem nas zonas de 15 minutos. Sendo que, nos cenários na rede viária de Ceilândia as menores emissões são com as frotas de 300 VCAE e 200 VCE. Já na rede viária do Plano Piloto, as menores emissões ocorrem com a frota de 500 VCE, e ao analisar as simulações com veículos autônomos, as menores emissões ocorrem nas frotas de 200 e 250 VCAE. Sendo assim, a redução de emissões ocorre sobretudo com a implantação de veículo elétrico.

Por fim, para a análise dos benefícios da integração de frotas de veículos compartilhados com o metrô em função dos custos de viagem dos usuários, foram calculados os custos das viagens, considerando os tempos de espera, tempo de viagem, tempo de caminhada e custos monetários envolvendo a viagem. Nos cálculos dos custos de viagens, notou-se que estes custos nos cenários com veículos compartilhados são menores que os custos do cenário base, porém com o aumento de usuários no sistema integrado, percebeu-se um aumento considerável dos custos. Ao se comparar os custos das viagens com origem nas zonas de 5 minutos com as zonas de 15 minutos, percebe-se que aumentam muito nos cenários deste último, e acredita-se que isso ocorre devido ao aumento do tempo de espera pelo veículo compartilhado no primeiro trecho de viagem, sendo da origem até a estação Terminal Ceilândia. Assim, quanto mais pessoas solicitando viagens de veículos compartilhados com destino a estação origem, mais o sistema é sobrecarregado, podendo gerar congestionamentos e consequentemente aumento no tempo de espera.

Assim, ao considerar os pilares ambiental e econômico abordados no estudo, é notável que o primeiro é melhor atendido pelos cenários gerados nas zonas de 15 minutos enquanto o segundo nas zonas de 5 minutos, sendo necessário buscar um cenário que melhor atenda esses dois critérios. Nos cenários gerados com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia notou-

se que quase todos cenários possuem emissões em todos cenários compartilhados menores que as emissões no cenário base. Já em relação ao tempo de espera na primeira milha, apesar das simulações com origem nas zonas de 10 minutos não apresentarem resultados tão satisfatórios como na análise das zonas de 5 minutos, alguns cenários, principalmente com VCA apresentaram resultados relevantes. E já no tempo de espera na última milha, as viagens com origem na zona de 10 minutos apresentando resultado satisfatório, principalmente com a frota de 300 VCA, com a maioria dos valores abaixo de 250 segundos (4,17 minutos). Sendo assim, as simulações com origem nas zonas de 10 minutos, ao se comparar os custos de viagem com o cenário base, notou-se que, principalmente, os cenários com VCA apresentam menores custos. Assim, de forma a buscar um melhor cenário analisando as emissões e custos de viagem, os cenários com origem nas zonas de 10 minutos de Ceilândia apresenta resultados satisfatórios, principalmente com o uso VCAE.

## **6.2 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

Considera-se os resultados obtidos do método aplicado como válidos, podendo servir como ponto de partida para desenvolvimento de novos estudos. Assim, como sugestão de trabalhos futuros é proposta que seja feita a calibração do modelo de simulação aplicado.

O presente estudo foi aplicado em regiões administrativas da cidade de Brasília, que é considerada uma das cidades mais atípica e diversificada do Brasil, sendo assim é recomendado a aplicação deste método em outras cidades, tanto brasileiras quanto em outros países.

Recomenda-se em futuros estudos a aplicação considerando mais estações como origem, de forma a distribuir os veículos compartilhados e não sobrecarregar o estacionamento da estação origem, podendo possibilitar na diminuição dos tempos de espera por veículo compartilhado. Durante as simulações foram observados congestionamentos sendo formados na estação origem quando se aumentava a frota de veículos, o que pode ser uma das principais causas do tempo de espera na primeira milha aumentar nas simulações com as viagens com origem nas zonas de 10 e 15 minutos.

Estudos com o objetivo de analisar a densidade e desempenho das vias, as velocidades médias, comprimento médio da rota, duração média de viagem e colisões de forma mais aprofundada são adequadas.

Indica-se ainda limitar o tempo que o usuário está disposto a esperar por um veículo compartilhado, na primeira e última milha, analisar os impactos considerando a possibilidade de desistência da viagem a partir de um tempo máximo de espera de tolerância. Além disso, um estudo para analisar quanto tempo este sistema de integração de veículo compartilhado com metrô demoraria para buscar o último usuário, ampliando o tempo de simulação.

Recomenda-se, também, usar pesos atribuídos nos elementos de custo no cálculo dos custos de viagem. Por exemplo, ao se comparar tempos como o gasto dentro de um veículo e o tempo gasto esperando este veículo, sabe-se que o segundo possui um maior peso para o passageiro, já que estes não gostam de gastar tempo que não seja viajando dentro do veículo.

O estudo proposto considerou dois dos três pilares do desenvolvimento sustentável, sendo a proteção ambiental e desenvolvimento econômico, porém não analisou questões envolvendo o pilar do desenvolvimento social, que estaria relacionado com pesquisa de opinião e aceitabilidade social dos VAs e da plataforma MaaS, sendo assim se recomenda em futuros estudos inserir este pilar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, S. R. (2005). Motorization and urban mobility in developing countries exploring policy options through dynamic simulation. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 4113–4128. <https://doi.org/10.11175/easts.6.4113>
- ALAZZAWI, S., HUMMEL, M., KORDT, P., SICKENBERGER, T., WIESEOTTE, C., & WOHAKE, O. (2018). *Simulating the Impact of Shared, Autonomous Vehicles on Urban Mobility – a Case Study of Milan*. 94–76. <https://doi.org/10.29007/2n4h>
- AMOOZADEH, M., DENG, H., CHUAH, C. N., ZHANG, H. M., & GHOSAL, D. (2015). Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET. *Vehicular Communications*, 2(2), 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2015.03.004>
- ANDERSON, J. M., KALRA, N., STANLEY, K. D., SORENSEN, P., SAMARAS, C., & OLUWATOLA, O. A. (2014). Autonomous vehicle technology a guide for policymakers. In *RAND Corporation*.
- ANDERSON, J. M., KALRA, N., STANLEY, K. D., SORENSEN, P., SAMARAS, C., & OLUWATOLA, O. A. (2016). Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers. In *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*. RAND Corporation. <https://doi.org/10.7249/RR443-2>
- BAGLOEE, S. A., TAVANA, M., ASADI, M., & OLIVER, T. (2016). Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. *Journal of Modern Transportation*, 24(4), 284–303. <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0117-3>
- BITTENCOURT, R., ALMEIDA, S., & ARAUJO, C. (2019). Adoption of Technological Products and Services for Different Consumer Profiles: An analysis using the Technology Adoption Propensity Scale. *Review of business management*, 21(1), 86–102. <https://doi.org/10.7819/rbgn.v0i0.3955>
- BRASIL, L. G. (2019). *Análise do desempenho do transporte público responsivo à demanda por meio de simulação multiagente baseada em atividades*. Dissertação de Mestrado em Transportes. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
- CARLINO, D., BOYLES, S. D., & STONE, P. (2013). Auction-based autonomous intersection management. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, Itsc*, 529–534. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728285>
- CERVERO, R. (2013). Linking urban transport and land use in developing countries. *Journal of Transport and Land Use*, 6(1), 7–24. <https://doi.org/10.5198/jtlu.v1.425>
- CHEN, T. D., KOCKELMAN, K. M., & HANNA, J. P. (2016). Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, 94, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.08.020>
- CHONG, Z. J., QIN, B., BANDYOPADHYAY, T., WONGPIROMSARN, T., RANKIN, E. S., ANG, M. H., FRAZZOLI, E., RUS, D., HSU, D., & LOW, K. H. (2011). Autonomous personal vehicle for the first- and last-mile transportation services. *2011 IEEE 5th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS)*, 253–260.

<https://doi.org/10.1109/ICCIS.2011.6070337>

CODEPLAN (2020). *Atlas do Distrito Federal 2020*. <https://www.codeplan.df.gov.br/atlas-do-distrito-federal-2020/>

DE LARA, F. F., & MARX, R. (2018). Comparative positioning between Brazilian subsidiaries and European matrices on Electromobility and carsharing technologies. *Research in Transportation Business & Management*, 27, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2018.08.001>

DRESNER, K., & STONE, P. (2004). Multiagent Traffic Management: An Improved Intersection Control Mechanism. *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems - AAMAS '05*. <https://doi.org/10.1145/1082473.1082545>

DRESNER, K., & STONE, P. (2008). A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 31, 591–656. <https://doi.org/10.1613/jair.2502>

ECLIPSE (2021). SUMO (*Simulation of Urban MObility*). <https://www.eclipse.org/sumo/>

FAGNANT, D. J., & KOCKELMAN, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>

FAGNANT, D. J., & KOCKELMAN, K. M. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.12.001>

FAGNANT, D. J., & KOCKELMAN, K. M. (2018). Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation*, 45(1), 143–158. <https://doi.org/10.1007/s11116-016-9729-z>

FAGNANT, D. J., KOCKELMAN, K. M., & BANSAL, P. (2016). Operations of Shared Autonomous Vehicle Fleet for Austin, Texas, Market. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2563(1), 98–106. <https://doi.org/10.3141/2536-12>

FAJARDO, D., AU, T.-C., WALLER, S. T., STONE, P., & YANG, D. (2011). Automated Intersection Control: Performance of Future Innovation Versus Current Traffic Signal Control. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2259(1), 223–232. <https://doi.org/10.3141/2259-21>

FERNANDES, P., & NUNES, U. (2012). Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1), 91–106. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2179936>

FURTADO, D. C. (2017). *Transporte coletivo responsivo à demanda: uma análise de requisitos de aceitabilidade para potenciais usuários no Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado em Transportes. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

- GAKENHEIMER, R. (1999). Urban mobility in the developing world. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(7–8), 671–689. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00005-1)
- GOGOLL, J., & MÜLLER, J. F. (2017). Autonomous Cars: In Favor of a Mandatory Ethics Setting. *Science and Engineering Ethics*, 23(3), 681–700. <https://doi.org/10.1007/s11948-016-9806-x>
- GWILLIAM, K. (2003). Urban transport in developing countries. *Transport Reviews*, 197–216. <https://doi.org/10.1080/0144164032000068939>
- HAUSBERGER, S., REXEIS, M., ZALLINGER, M., LUZ, R (2009). Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3. [https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA\\_31\\_Docu\\_hot\\_emissionfactors\\_PC\\_LCV\\_HDV.pdf](https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA_31_Docu_hot_emissionfactors_PC_LCV_HDV.pdf)
- HENSHER, D. A. (2017). Future bus transport contracts under a mobility as a service (MaaS) regime in the digital age: Are they likely to change? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 98, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.02.006>
- HEVELKE, A., & NIDA-RÜMELIN, J. (2015). Responsibility for Crashes of Autonomous Vehicles: An Ethical Analysis. *Science and Engineering Ethics*, 21(3), 619–630. <https://doi.org/10.1007/s11948-014-9565-5>
- ILGIN GULER, S., MENENDEZ, M., & MEIER, L. (2014). Using connected vehicle technology to improve the efficiency of intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.05.008>
- KAMARGIANNI, M., LI, W., MATYAS, M., & SCHÄFER, A. (2016). A Critical Review of New Mobility Services for Urban Transport. *Transportation Research Procedia*, 14, 3294–3303. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.277>
- KAMARGIANNI, M., MATYAS, M., LI, W., & SCHÄFER, A. (2015). *Feasibility Study for “Mobility as a Service” concept in London*.
- KATSUKI, H., & TANIGUCHI, M. (2017). *Introducing mobility sharing with automated driving: reducing time and space for parking*. 319–325. <https://doi.org/10.2495/UT170271>
- KESSLER, M. M. (1963). Bibliographic coupling between scientific papers. *American Documentation*, 14(1), 10–25. <https://doi.org/10.1002/asi.5090140103>
- KPMG INTERNATIONAL. (2018). *2018 Autonomous Vehicles Readiness Index*. <http://asirt.org/initiatives/informing-road-users/road-safety-facts/road-crash-statistic>
- KPMG INTERNATIONAL. (2019). *2019 Autonomous Vehicles Readiness Index*. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/02/2019-autonomous-vehicles-readiness-index.pdf>
- KPMG INTERNATIONAL. (2020). *2020 Autonomous Vehicles Readiness Index*. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2020/07/2020-autonomous-vehicles-readiness-index.pdf>

- LE VINE, S., ZOLFAGHARI, A., & POLAK, J. (2015). Autonomous cars: The tension between occupant experience and intersection capacity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.01.002>
- LEE, J., & PARK, B. (2012). Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm Under the Connected Vehicles Environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1), 81–90. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2178836>
- LEVIN, M. W., & BOYLES, S. D. (2016). A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 62, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.10.005>
- LI, Y., WANG, Y., RUI, X., LI, Y., LI, Y., WANG, H., ZUO, J., & TONG, Y. (2017). Sources of atmospheric pollution: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, 112(2), 1025–1045. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2421-z>
- LI, Z., CHITTURI, M., ZHENG, D., BILL, A., & NOYCE, D. (2013). Modeling reservation-based autonomous intersection control in VISSIM. *Transportation Research Record*, 2381, 81–90. <https://doi.org/10.3141/2381-10>
- LIANG, X., CORREIA, G. H. DE A., & VAN AREM, B. (2016). Optimizing the service area and trip selection of an electric automated taxi system used for the last mile of train trips. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.05.006>
- LIU, T., CEDER, A. (AVI), & RAU, A. (2020). Using Deficit Function to Determine the Minimum Fleet Size of an Autonomous Modular Public Transit System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674(11), 532–541. <https://doi.org/10.1177/0361198120945981>
- MAHMASSANI, H. S. (2016). 50th Anniversary invited article autonomous vehicles and connected vehicle systems: Flow and operations considerations. *Transportation Science*, 50(4), 1140–1162. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0712>
- METRÔ-DF. (2018a). *Dados da Pesquisa de Mobilidade Urbana – PMU/DF 2016*. [http://www.metro.df.gov.br/?page\\_id=40044](http://www.metro.df.gov.br/?page_id=40044)
- METRÔ-DF. (2018b). *Plano de Desenvolvimento do Transporte Público sobre Trilhos do Distrito Federal – PDTT/DF – Relatório Final*. [http://www.metro.df.gov.br/?page\\_id=40044](http://www.metro.df.gov.br/?page_id=40044)
- METRÔ-DF. (2020). *Expansão/Obras e serviços - Estações em serviço*. Consultado em 17 de dezembro de 2020, disponível em [http://www.metro.df.gov.br/?page\\_id=8768](http://www.metro.df.gov.br/?page_id=8768)
- MILAKIS, D., VAN AREM, B., & VAN WEE, B. (2017). Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 21(4), 324–348. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1291351>
- MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. (2020). *Frota de Veículos - 2020 (Frota Nacional (outubro 2020))*. <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2020>

- MOODY, J., BAILEY, N., & ZHAO, J. (2020). Public perceptions of autonomous vehicle safety: An international comparison. *Safety Science*, 121(October 2018), 634–650. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.07.022>
- ORTÚZAR, J. DE D., & WILLUMSEN, L. G. (2011). *Modelling Transport*. John Wiley & Sons, Ltd, New Delhi, India, 608 p. <https://doi.org/10.1002/9781119993308>
- PERKINS, R., & NEUMAYER, E. (2005). The International Diffusion of New Technologies: A Multitechnology Analysis of Latecomer Advantage and Global Economic Integration. *Annals of the Association of American Geographers*, 95(4), 789–808. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2005.00487.x>
- PETIT, J., & SHLADOVER, S. E. (2015). Potential Cyberattacks on Automated Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 546–556. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2342271>
- PUCHER, J., KORATTYSWAROPAM, N., MITTAL, N., & ITTYERAH, N. (2005). Urban transport crisis in India. *Transport Policy*, 12(3), 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.02.008>
- RAJAMANI, R., HAN-SHUE TAN, BOON KAIT LAW, & WEI-BIN ZHANG. (2000). Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(4), 695–708. <https://doi.org/10.1109/87.852914>
- SAE INTERNATIONAL. (2018). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles J3016\_201806*. [https://saemobilus.sae.org/content/J3016\\_201806/](https://saemobilus.sae.org/content/J3016_201806/)
- SANTONI DE SIO, F. (2017). Killing by Autonomous Vehicles and the Legal Doctrine of Necessity. *Ethical Theory and Moral Practice*, 20(2), 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10677-017-9780-7>
- SMALL, H. (1973). Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents. *Journal of the American Society for Information Science*, 24(4), 265–269. <https://doi.org/10.1002/asi.4630240406>
- STERN, R. E., CUI, S., DELLE MONACHE, M. L., BHADANI, R., BUNTING, M., CHURCHILL, M., HAMILTON, N., HAULCY, R., POHLMANN, H., WU, F., PICCOLI, B., SEIBOLD, B., SPRINKLE, J., & WORK, D. B. (2018). Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89(April 2017), 205–221. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.005>
- TAEIHAGH, A., & LIM, H. S. M. (2019). Governing autonomous vehicles: emerging responses for safety, liability, privacy, cybersecurity, and industry risks. *Transport Reviews*, 39(1), 103–128. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1494640>
- TALEBPOUR, A., & MAHMASSANI, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 143–163. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.07.007>
- UITP (2017). The International Association of Public Transport. *Policy brief - Autonomous*

*vehicles: a potential game changer for urban mobility.*  
<https://www.uitp.org/publications/autonomous-vehicles-a-potential-game-changer-for-urban-mobility/>

VAN ECK, N. J., & WALTMAN, L. (2014). Visualizing Bibliometric Networks. In *Measuring Scholarly Impact* (p. 285–320). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13)

WANG, M., HOOGENDOORN, S. P., DAAMEN, W., VAN AREM, B., & HAPPEE, R. (2015). Game theoretic approach for predictive lane-changing and car-following control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 73–92. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.07.009>

YANG, K., GULER, S. I., & MENENDEZ, M. (2016). Isolated intersection control for various levels of vehicle technology: Conventional, connected, and automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 72, 109–129. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.08.009>

YAP, M. D., CORREIA, G., & VAN AREM, B. (2016). Preferences of travellers for using automated vehicles as last mile public transport of multimodal train trips. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.003>

ZHANG, W., GUHATHAKURTA, S., FANG, J., & ZHANG, G. (2015). Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. *Sustainable Cities and Society*, 19, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.006>

ZHENG, Y., LI, S. E., WANG, J., CAO, D., & LI, K. (2016). Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: Study on the influence of information flow topologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 14–26. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2402153>

ZHU, F., & UKKUSURI, S. V. (2015). A linear programming formulation for autonomous intersection control within a dynamic traffic assignment and connected vehicle environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55(2015), 363–378. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.01.006>

**APÊNDICE A - CÁLCULO DOS CUSTOS DE VIAGEM DA FROTA NA  
PRIMEIRA MILHA COM 30 VC E ÚLTIMA MILHA 20 VC**

Tabela A.1 – Cálculo dos custos de viagem sendo a primeira milha com 30 VC e a última milha 20 VC

<b>ID</b>	<b>Tempo de Espera 1 (s)</b>	<b>Duração da viagem 1 (s)</b>	<b>Duração da caminhada 1 (s)</b>	<b>Tempo de Espera 2 (metrô) (s)</b>	<b>Duração da viagem 2 (metrô) (s)</b>	<b>Duração da caminhada 2 (s)</b>	<b>Tempo de Espera 3 (s)</b>	<b>Duração da viagem 2 (s)</b>	<b>Custo monetário 1 (s)</b>	<b>Custo monetário 2 (s)</b>	<b>Custo Total 1 (s)</b>	<b>Custo Total 2 (s)</b>
<b>18</b>	281	239	52	20	2760	15	50	116	3960	5940	7493	9473
<b>25</b>	228	194	50	77	2760	17	55	131	3960	5940	7472	9452
<b>10</b>	348	184	43	64	2880	7	50	33	3960	5940	7569	9549
<b>3</b>	199	145	46	284	2760	19	65	137	3960	5940	7615	9595
<b>15</b>	177	171	40	212	2760	15	42	165	3960	5940	7542	9522
<b>28</b>	252	237	44	10	2760	18	39	165	3960	5940	7485	9465
<b>27</b>	207	221	62	55	2760	18	74	142	3960	5940	7499	9479
<b>2</b>	254	180	61	179	2880	8	52	91	3960	5940	7665	9645
<b>31</b>	213	194	50	77	2760	19	25	250	3960	5940	7548	9528
<b>5</b>	135	187	53	289	2760	20	37	271	3960	5940	7712	9692
<b>20</b>	309	180	46	45	2880	10	44	168	3960	5940	7642	9622
<b>26</b>	177	197	50	123	2760	14	30	320	3960	5940	7631	9611
<b>34</b>	201	196	50	67	2760	21	36	356	3960	5940	7647	9627
<b>1</b>	188	177	40	270	2880	6	51	364	3960	5940	7936	9916
<b>24</b>	315	219	54	306	2760	19	45	158	3960	5940	7836	9816
<b>6</b>	251	128	47	236	3000	21	43	274	3960	5940	7960	9940
<b>17</b>	202	296	49	51	3000	17	41	313	3960	5940	7929	9909
<b>12</b>	173	150	45	246	2880	8	377	122	3960	5940	7961	9941
<b>50</b>	295	200	50	223	2760	20	144	145	3960	5940	7797	9777
<b>35</b>	293	159	45	17	3000	20	41	367	3960	5940	7902	9882

<b>37</b>	343	218	42	245	2760	17	188	134	3960	5940	7907	9887
<b>40</b>	392	176	42	231	2760	19	199	152	3960	5940	7931	9911
<b>19</b>	260	282	47	333	2760	16	148	229	3960	5940	8035	10015
<b>16</b>	649	212	45	34	2880	8	177	93	3960	5940	8058	10038
<b>21</b>	529	145	55	187	2880	9	215	76	3960	5940	8056	10036
<b>38</b>	420	189	42	192	2760	19	242	167	3960	5940	7991	9971
<b>8</b>	536	133	50	273	2880	14	207	134	3960	5940	8187	10167
<b>4</b>	517	169	48	275	2880	10	175	179	3960	5940	8213	10193
<b>14</b>	629	257	52	4	2880	7	220	203	3960	5940	8212	10192
<b>42</b>	508	241	44	20	2880	11	207	223	3960	5940	8094	10074
<b>52</b>	533	179	46	1	2760	19	257	336	3960	5940	8091	10071
<b>103</b>	359	153	47	232	2760	14	100	171	3960	5940	7796	9776
<b>104</b>	342	164	47	232	2760	16	154	152	3960	5940	7827	9807
<b>76</b>	429	228	44	263	2760	24	199	133	3960	5940	8040	10020
<b>121</b>	189	188	53	273	2760	16	189	156	3960	5940	7784	9764
<b>66</b>	353	251	48	25	3000	20	54	410	3960	5940	8121	10101
<b>116</b>	337	185	62	145	2760	17	206	209	3960	5940	7881	9861
<b>60</b>	598	175	51	228	2760	20	203	209	3960	5940	8204	10184
<b>39</b>	380	155	50	258	3000	18	53	522	3960	5940	8396	10376
<b>53</b>	573	207	46	261	2760	18	234	260	3960	5940	8319	10299
<b>65</b>	631	199	62	145	2760	21	341	186	3960	5940	8305	10285
<b>74</b>	169	155	49	259	3000	22	49	602	3960	5940	8265	10245
<b>95</b>	462	185	43	164	2760	24	338	285	3960	5940	8221	10201
<b>44</b>	485	243	47	26	3000	19	52	685	3960	5940	8517	10497
<b>9</b>	324	271	51	337	2760	21	588	429	3960	5940	8741	10721
<b>45</b>	573	213	51	292	2880	10	362	325	3960	5940	8666	10646
<b>47</b>	855	213	48	12	2880	11	361	325	3960	5940	8665	10645
<b>57</b>	847	151	46	14	2880	11	361	325	3960	5940	8595	10575
<b>101</b>	595	151	41	19	3000	18	300	327	3960	5940	8411	10391

<b>30</b>	264	255	54	306	2760	15	49	1177	3960	5940	8840	10820
<b>41</b>	437	410	54	280	3000	20	295	430	3960	5940	8886	10866
<b>36</b>	944	163	49	38	2880	9	160	760	3960	5940	8963	10943
<b>62</b>	627	218	43	156	2760	20	459	579	3960	5940	8822	10802
<b>49</b>	593	166	58	293	3000	22	584	315	3960	5940	8991	10971
<b>46</b>	587	245	58	238	3000	25	581	396	3960	5940	9090	11070
<b>23</b>	990	206	44	2	2880	7	958	209	3960	5940	9256	11236
<b>93</b>	455	218	44	155	2760	26	453	888	3960	5940	8959	10939
<b>33</b>	990	417	52	83	3000	21	448	408	3960	5940	9379	11359
<b>13</b>	278	729	43	244	3000	23	787	503	3960	5940	9567	11547
<b>63</b>	1455	200	49	22	2880	16	837	42	3960	5940	9461	11441
<b>22</b>	732	152	56	315	2880	5	219	1354	3960	5940	9673	11653
<b>85</b>	859	228	58	121	2880	9	1102	484	3960	5940	9701	11681
<b>134</b>	593	177	50	129	3000	19	1312	352	3960	5940	9592	11572
<b>70</b>	906	307	46	82	2880	8	1416	482	3960	5940	10087	12067
<b>56</b>	857	315	44	183	3000	20	1820	289	3960	5940	10488	12468
<b>123</b>	1090	183	56	44	3000	21	1448	390	3960	5940	10192	12172
<b>69</b>	927	245	57	122	2880	8	1186	1192	3960	5940	10577	12557
<b>32</b>	884	343	53	273	3000	20	1790	487	3960	5940	10810	12790
<b>119</b>	1106	127	44	114	3000	20	1692	281	3960	5940	10344	12324
<b>77</b>	1224	223	48	151	2880	18	1665	444	3960	5940	10613	12593
<b>7</b>	526	1057	46	50	3000	23	1787	556	3960	5940	11005	12985
<b>91</b>	858	183	52	135	3000	23	2030	357	3960	5940	10598	12578
<b>124</b>	1062	108	52	138	2880	11	842	1348	3960	5940	10401	12381
<b>114</b>	1054	163	59	146	3000	19	1450	653	3960	5940	10504	12484

# Veículo Autônomo: Uma Visão Geral da Produção Científica baseada na Análise Bibliométrica

Vehículo Autónomo: Una Visión General de la Producción Científica basada  
en el Análisis Bibliométrico

Autonomous Vehicle: An Overview of Scientific Production based on  
Bibliometric Analysis

Amanda Basilio Romano.  
Ingeniera Civil, M.Sc(c) Transportes Urbanos.  
Universidade de Brasília (UnB), Brasilia, Brasil.  
amandaromano27@gmail.com  
 <http://orcid.org/0000-0002-6524-8328>

Pastor Willy Gonzales Taco.  
Ingeniero Civil, M.Sc. Transportes Urbanos. Dr. en Ingeniería de Transportes.  
Universidade de Brasília (UnB), Brasilia, Brasil.  
pwgtaco@gmail.com  
 <https://orcid.org/0000-0002-2055-9114>

Recibido: diciembre 1 de 2020  
Aceptado: enero 5 de 2021  
Publicado: enero 10 de 2021

## RESUMO

Este artigo tem como objetivo identificar o estado da arte dos estudos sobre Veículos Autônomos (AV), considerando o desenvolvimento do assunto e suas linhas de pesquisa, utilizando uma Revisão Bibliométrica nas bases de dados Web of Science e Scopus. Nos *clusters*, gerados pelo acoplamento bibliográfico, destacam-se duas linhas de pesquisa, focadas nos aspectos tecnológicos e nos aspectos sociais e comportamentais da aceitabilidade da AV. Em relação aos países, Estados Unidos, Alemanha e China lideram o número de publicações referentes a VA nas duas bases.

**Palavras-chave:** Autonomous Vehicle; Análise Bibliométrica; VOSviewer.

## RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo identificar el estado del arte de los estudios sobre Vehículos Autónomos (VA), considerando el desarrollo del tema y sus líneas de investigación, utilizando una Revisión Bibliométrica en las bases de datos de Web of Science y Scopus. En los *clusters*, generados por el acoplamiento bibliográfico, se destacan dos líneas de investigación, centradas en los aspectos tecnológicos y en los aspectos sociales y comportamentales de la aceptabilidad de AV. En cuanto a los países, Estados Unidos, Alemania y China lideran el número de publicaciones referidas a AV en las dos bases de datos.

**Palabras clave:** Vehículo Autónomo; Análisis Bibliométrico; VOSviewer.

Cómo citar (APA)

Romano, A. B. & Taco, P. W. G. (2021). Veículo Autônomo: Uma Visão Geral da Produção Científica baseada na Análise Bibliométrica. *Procesos Urbanos*. 8(1):e516. <https://doi.org/10.21892/2422085X.516>



©2021 Los Autor(es). Publicado por [CECAR](#)  
Revista Procesos Urbanos está distribuido bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0](#) Internacional.

## ABSTRACT

This article aims to identify the state of the art of studies on Autonomous Vehicles (AV), considering the development of the subject and its lines of research, using a Bibliometric Review in the Web of Science and Scopus databases. In the clusters, generated by the bibliographic coupling, two lines of research stand out, focused on the technological aspects and on the social and behavioral aspects of the acceptability of VA. Regarding the countries, the United States, Germany and China lead the number of publications referring to VA in the two databases.

**Keywords:** Autonomous Vehicle; Bibliometric Analysis; VOSviewer.

## INTRODUÇÃO

Na última década o desenvolvimento tecnológico tem apresentado uma série de soluções para os vários problemas da mobilidade urbana e dos transportes, utilizando-se da Inteligência Artificial. O desenvolvimento tecnológico dos Veículos Autônomos (VAs), é uma dessas soluções que por apresentarem diversos benefícios, desvantagens, barreiras, e mudanças comportamentais, são necessários estudos para avaliar os requisitos da sua implantação nos centros urbanos.

Dentre os benefícios, tem-se a redução de acidentes, o aumento da mobilidade, a redução de congestionamentos, uma menor necessidade de estacionamentos, o incentivo a programas de compartilhamento, a melhoria na economia de combustível proporcionando a redução de emissões, o aumento da capacidade das vias, e uma operação mais eficiente dos veículos com melhor tempo de viagem (Anderson *et al.*, 2014; Fagnant e Kockelman, 2015).

Como desvantagens estima-se que sua adoção gerará um aumento de milhas percorridas por veículos (VMT) (Anderson *et al.*, 2014; Fagnant e Kockelman, 2015; Milakis *et al.*, 2017) the potential effects of automated driving that are relevant to policy and society are explored, findings discussed in literature about those effects are reviewed and areas for future research are identified. The structure of our review is based on the ripple effect concept, which represents the implications of automated vehicles at three different stages: first-order (traffic, travel cost, and travel choices, o que pode causar congestionamentos (Anderson *et al.*, 2014), aumento de consumo de combustível (Anderson *et al.*, 2014; Fagnant e Kockelman, 2015) e consequentemente de emissões, com o aumento do número de viagens (Fagnant e Kockelman, 2015).

As barreiras da implantação estão relacionadas com a tecnologia, tais como os ciberataques em potencial (Petit e Shladover, 2015), questões éticas sobre quem se responsabilizaria em caso de acidente envolvendo VA (Hevelke e Nida-Rümelin, 2015), e como devem ser configurados o ambiente de ética e programação dos VA para se comportarem no caso de um acidente inevitável (Gogoll e Müller, 2017; Santoni de Sio, 2017). Ainda a incorporação dos VAs causaria mudanças comportamentais que afetaria a maneira como os usuários interagiriam com os sistemas de transporte, pois os seus deslocamentos seriam feitos sem nenhuma intervenção humana na condução.

Como observado, a implantação de VAs no ambiente urbano, pode-se gerar diversos resultados, podendo contribuir na formação de cidades sustentáveis, recuperando espaço urbano, com menos veículos nas vias, como também reforçando uma rede de transporte público eficiente (The International Association of Public Transport, 2017).

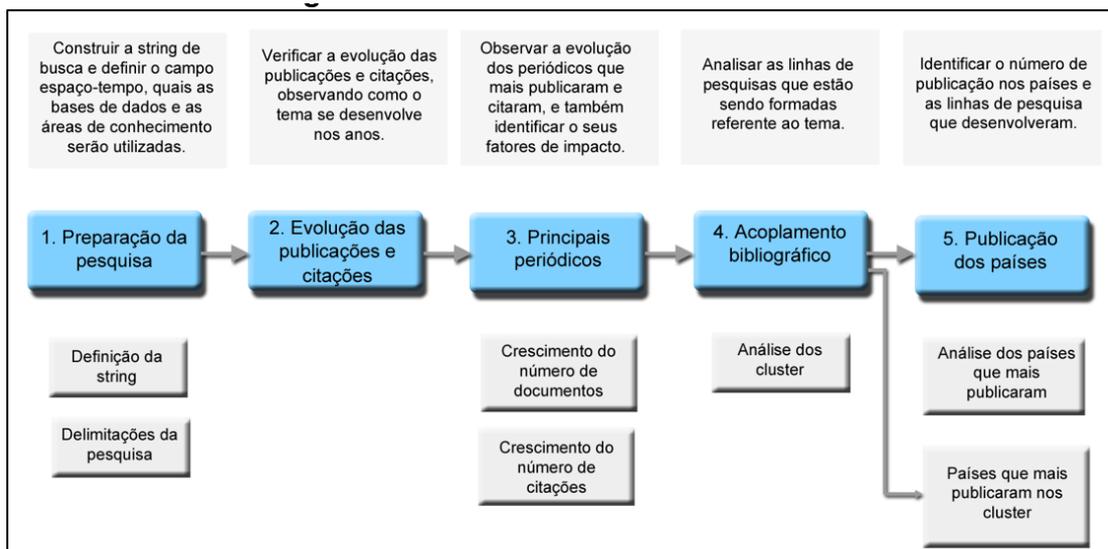
Nesse contexto em que incorporação dos VAs vem precedido de um processo tecnológico dinâmico, é essencial conhecer o desenvolvimento do tema e identificar sua evolução e as potenciais tendências futuras. Assim, o artigo teve como objetivo identificar o estado da arte dos estudos sobre VAs, considerando o desenvolvimento do tema e suas linhas de pesquisa utilizando-se de uma Revisão Bibliométrica. Para isto, o artigo foi estruturado em quatro seções, após esta introdução tem-se a seção do método adotado de Revisão Bibliométrica. Na terceira seção foram apresentados os resultados obtidos da revisão bibliométrica sobre VA dos artigos indexados nas bases de dados da *Web of Science* e *Scopus* e na quarta seção, foram feitas as considerações finais.

## Método da Revisão Bibliométrica

A Revisão Bibliométrica (RB) é um método de análise quantitativa que possibilita a medição da contribuição do conhecimento científico das publicações, em artigos indexados em bases de dados ou eventos de áreas específicas de conhecimento. A RB pode contribuir para analisar a visão geral e perspectiva quantitativa de um tema específico, identificando os principais pontos e ideias emergentes de um campo de pesquisa, avaliando o desempenho e a influência de diferentes países ou periódicos, e observando a evolução e a tendência de desenvolvimento (Li *et al.*, 2017).

A RB se foca em análise de redes tanto em documentos, palavras-chave, bem como em autores ou periódicos, usando técnicas de mapeamento e agrupamento, que são complementares entre si, com o objetivo de fornecer informações sobre a estrutura de uma rede, observando quais os tópicos ou campos de pesquisa, como se relacionam e como o domínio científico se desenvolveu ao longo do tempo (Waltman *et al.*, 2010).

Diversas aplicações podem ser vistas em estudos de RB na área de transporte e mobilidade urbana. Romano *et al.* (2018), utilizando a RB identificaram artigos relevantes para o uso da bicicleta, e assim levantaram os fatores que influenciam o uso da bicicleta em áreas urbanas; Modak *et al.* (2019) analisaram o estado da arte do conhecimento em transportes perante a RB das publicações da revista *Transportation Research* num período de 50 anos; Gandia *et al.* (2019) fizeram uma revisão cienciométrica e bibliométrica sobre o tema de VA. A estrutura do método de RB (Figura 1), inicia-se com a primeira etapa da preparação da pesquisa, definindo a *string* de pesquisa e suas delimitações. Na segunda etapa, a partir dos dados extraídos da pesquisa, foi possível observar a evolução das publicações e citações referente ao tema. Na terceira etapa foram apresentados os periódicos que mais publicaram e citaram sobre o tema. Na quarta etapa foram desenvolvidos mapas de acoplamento bibliográfico, para identificar as linhas de pesquisas sobre VAs, analisando-se os clusters. E na quinta etapa foi gerada a distribuição das publicações por países.



**Figura 1.** Método da Revisão Bibliométrica

Fonte: Os próprios autores.

**Revisão Bibliométrica sobre Veículos Autônomos.** Na RB o tempo da pesquisa foi limitado até dezembro de 2019, utilizando-se as bases de dados da *Web of Science* e *Scopus*, sendo que as buscas foram realizadas no dia 24 de março de 2020 e somente documentos em inglês. A pesquisa na *Web of Science* foi limitada pelas áreas *Transportation Science Technology* e *Transportation*, na *Scopus* foi pela área *Social Sciences*.

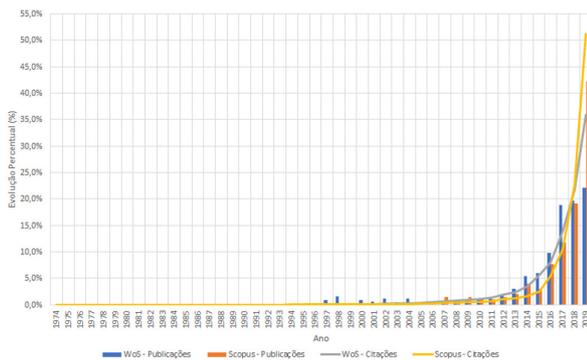
A *string* de pesquisa na *Web of Science* foi: ((“autonomous” OR “automated” OR “self-driving” OR “driverless”) NEAR/0 (“vehicle\$” OR “car\$” OR “driving” OR “automobile\$” OR “bus\*” OR “taxi\$” OR “truck\$” OR “electric vehicle\$” OR “road vehicle\$”)) OR ((“connected”) NEAR/1 (“automated” OR “autonomous”) AND (“vehicle\$” OR “car\$” OR “driving” OR “transportation”)) OR “cooperative intelligent transport

system\$” OR “cooperative-ITS”, sendo encontrados 3.926 resultados com 29.409 citações ao todo.

Já a *string* de pesquisa na *Scopus* foi semelhante, somente alterando operadores de pesquisa próprios da base: (“autonomous” OR “automated” OR “self-driving” OR “driverless”) w/0 (“vehicle\$” OR “car\$” OR “driving” OR “automobile\$” OR “bus\*” OR “taxi\$” OR “truck\$” OR “electric vehicle\$” OR “road vehicle\$”) OR (“connected”) w/1 (“automated” OR “autonomous”) AND (“vehicle\$” OR “car\$” OR “driving” OR “transportation”) OR “cooperative intelligent transport system\$” OR “cooperative-ITS”, sendo encontrados 3.047 resultados com 19.707 citações.

### Evolução das publicações e citações até 2019.

Na Figura 2 apresenta-se a evolução porcentual do tema, em que em ambas as bases às publicações e citações vêm crescendo consideravelmente ano a ano, com maior intensidade a partir de 2014.



**Figura 2.** Evolução do número de publicações e citações na *Web of Science* e *Scopus*

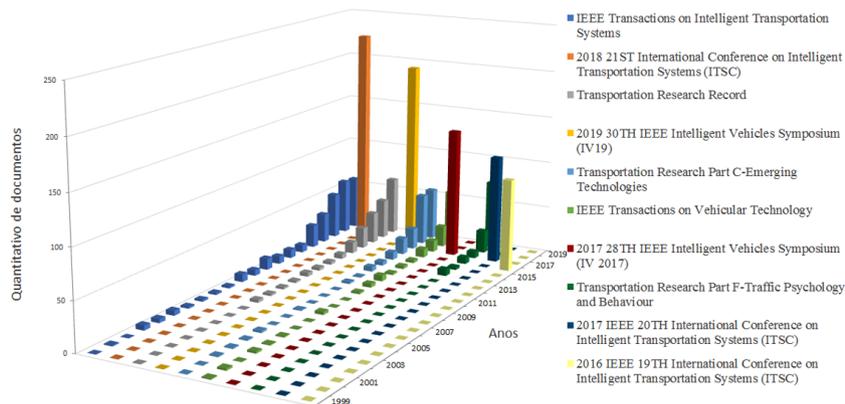
Fonte: Os próprios autores, baseado nos dados extraídos da *Web of Science* e *Scopus*.

Na *Web of Science* as publicações iniciam-se em 1979 e na *Scopus* em 1974, e vão até dezembro de 2019. Na evolução das publicações observa-se que na *Web of Science* cerca de 60% ocorreram de 2017 a 2019, enquanto que na *Scopus* somente 2019 é responsável por mais de 40% de suas publicações. Já em relação a evolução das citações, na *Web of Science* quase 60% das suas citações foram em 2018 e 2019, enquanto na *Scopus* mais de 50% foram somente em 2019.

### Principais periódicos dos documentos publicados.

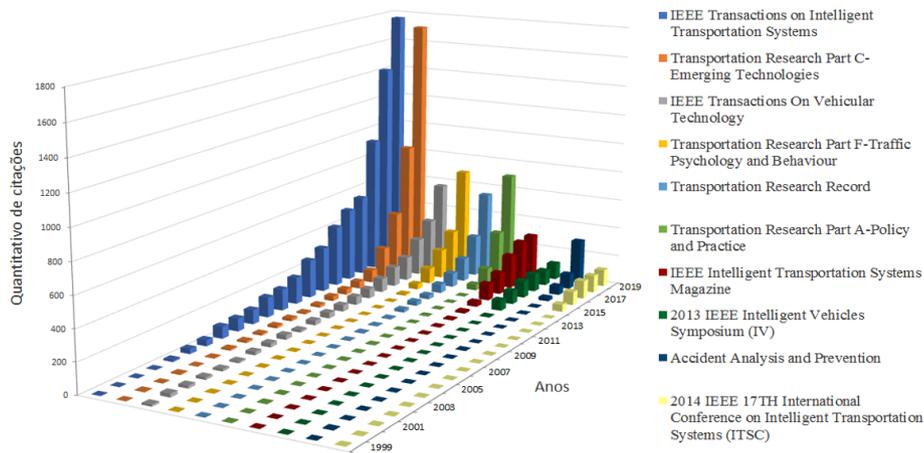
Ao se analisar os dados da pesquisa na *Web of Science*, existem 3.926 documentos com 29.409 citações ao todo, publicados em 343 periódicos no período de 1979 a dezembro de 2019. Neste período os 10 periódicos que mais publicaram sobre o tema de VAs representam 43% de todas as publicações nesta base de dados (1.688 documentos). Já os 10 periódicos que mais possuem citações sobre o tema representam 64,3% das citações (18.898 citações).

Na Figura 3, observa-se o crescimento do número de documentos nos últimos 20 anos (1999 a 2019) nos 10 periódicos que mais publicaram sobre VAs, representando 99,3% (1.677 documentos). E na Figura 4 está o crescimento do número de citações nos 10 periódicos que mais possuem citações sobre o tema nos últimos 20 anos (1999 a 2019), representando 99,7% das citações destes periódicos (18.844 citações).



**Figura 3.** Crescimento do número de documentos nos periódicos que mais publicaram sobre o tema de 1999 a 2019 na *Web of Science*.

Fonte: Os próprios autores, baseado nos dados extraídos da *Web of Science*.



**Figura 4.** Crescimento do número de citações nos periódicos que mais possuem citações sobre o tema no período de 1999 a 2019 na *Web of Science*

Fonte: os próprios autores, baseado nos dados extraídos da *Web of Science*.

A revista *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, além de ser a que mais publicou sobre o tema, também é aquela que apresentou o maior número de citações. E a revista *Transportation Research Record* apesar de ser a terceira em número de publicações, é a quinta no número de citações.

Em relação as revistas que mais publicam e/ou citam sobre o tema de VAs, na *Web of Science*, é também pertinente analisar sua posição no ranque do *Journal Citation Reports*, os seus fatores de impacto (*Journal Impact Factor - JIF*) e o quartil do fator de impacto (*Journal Impact Factor Quartile*). Este ranque possui 73 revistas nas categorias de *Transportation Science Technology* e *Transportation* (Clarivate Analytics, 2020). Assim, na Tabela 1, percebe-se que a revista *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* além de ser a que mais publicou e possuiu citações sobre o tema, apresenta o maior fator de impacto entre as revistas apresentadas, ocupando o quartil Q1, sendo a quinta no ranque. E a revista *Transportation Research Record* apesar de ser uma das que mais publicou e citou sobre o tema, não apresenta um bom fator de impacto, com a 64ª posição no ranque, estando no quartil Q4.

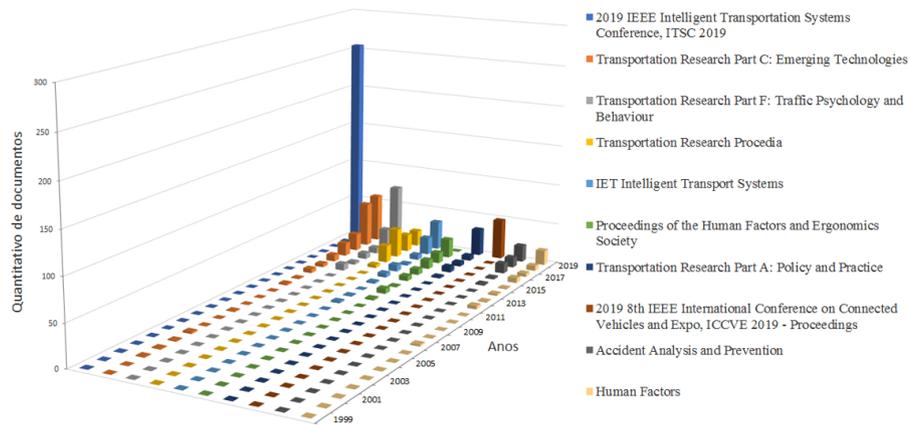
Já ao se analisar os dados da pesquisa na *Scopus*, existem 3.047 documentos com 19.707 citações ao todo, publicados em 629 periódicos no período de 1974 a dezembro de 2019. Sendo que os 10 periódicos que mais publicaram representam 32,8% de todas as publicações (1.000 documentos) e os 10 periódicos que mais possuem citações representam 61,6% (12.136 citações).

**Tabela 1.** Classificação no JCR das revistas que mais publicaram e citaram sobre o tema na *Web of Science*.

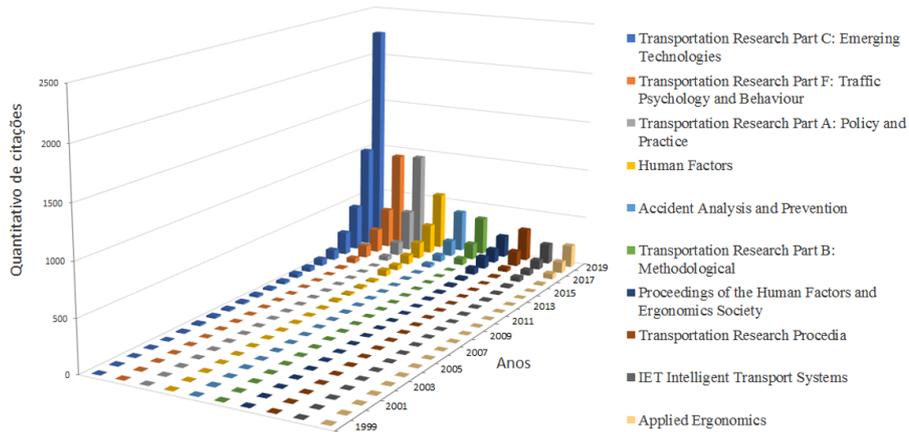
Nome do periódico	Publicações	Citações	Ranque (JCR)	Fator de Impacto (JCR)	Quartil (JCR)
IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	291	6929	5º	6,319	Q1
Transportation Research Part C - Emerging Technologies	175	3504	6º	6,077	Q1
IEEE Transactions on Vehicular Technology	139	2013	8º	5,379	Q1
Transportation Research Part A - Policy and Practice	53	1189	18º	3,992	Q1
Accident Analysis and Prevention	49	498	21º	3,655	Q1
IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine	50	1116	25º	3,363	Q2
Transportation Research Part F - Traffic Psychology and Behaviour	121	1325	33º	2,518	Q2
Transportation Research Record	194	1226	64º	1,029	Q4

Fonte: Os próprios autores, baseado nos dados extraídos da *Web of Science* e classificação de Clarivate Analytics (2020).

Na Figura 5, mostra-se o crescimento do número de documentos nos últimos 20 anos (1999 a 2019) publicados nos 10 periódicos que mais publicaram na *Scopus* sobre VAs, representando 99,8% de suas publicações (998 documentos). A Figura 6, contém o crescimento do número de citações nos 10 periódicos que mais possuem citações sobre o tema nos últimos 20 anos (1999 a 2019), referente aos dados da *Scopus*, representando 100% das citações destes periódicos (12.136 citações).



**Figura 5.** Crescimento do número de documentos nos periódicos que mais publicam sobre o tema no período de 1999 a 2019 na *Scopus*.  
 Fonte: Os próprios autores, baseado nos dados extraídos da *Scopus*.



**Figura 6.** Crescimento do número de citações nos periódicos que mais possuem citações sobre o tema de 1999 a 2019 na *Scopus*.  
 Fonte: Os próprios autores, baseado nos dados extraídos da *Scopus*.

A revista *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* é a segunda que mais publicou sobre o tema e está em primeiro no número de citações. E a *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* é a terceira em número de publicações e segunda em citações, configurando-se nas duas revistas que mais publicaram e citaram sobre este tema.

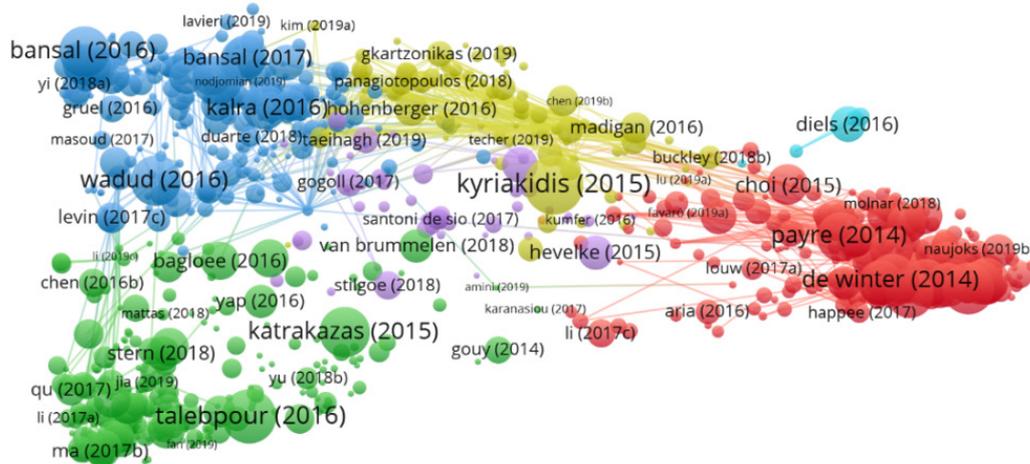
Além de identificar o número de publicações e citações nas revistas, também foi avaliada a sua posição no ranque da *SCImago Journal (SJR)*, o fator de impacto e o quartil a que pertence. Na subárea

*Transportation* da área *Social Sciences* existem 149 periódicos entre *journals*, *book series*, *conferences and proceedings* e *trade journals* (Scimago Institutions Rankings, 2019). Como apresentado na Tabela 2, a revista *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* possui o melhor fator de impacto, ficando em segundo lugar no ranque, e situada no quartil Q1. Já a *IET Intelligent Transport Systems*, terceira em número de publicações e nona em citações, o seu fator de impacto fica na 46ª posição, estando no quartil Q2.



O acoplamento bibliográfico dos dados da pesquisa na *Scopus*, com seis clusters, apresenta-se na Figura 8. O cluster 1 Sco (vermelho) possui semelhança com o cluster 4 WoS, voltado para simuladores de direção. Já o cluster 2 Sco (verde) assemelha-se ao cluster 2 WoS, com estudos sobre tráfego misto, veículos movidos por humanos e

autônomos. Os clusters 3 Sco (azul escuro) e 4 Sco (amarelo) possuem semelhanças com o cluster 1 WoS, focados na adoção e aceitabilidade de VAs. Já o cluster 5 Sco (roxo) aborda sobre questões éticas e sociais, e o cluster 6 Sco (azul claro) com 8 documentos, focados no enjoo de movimento causado pelo uso dos VA.



**Figura 8.** Acoplamento bibliográfico com os 1000 documentos com maior força total de link com os demais documentos – *Scopus*.

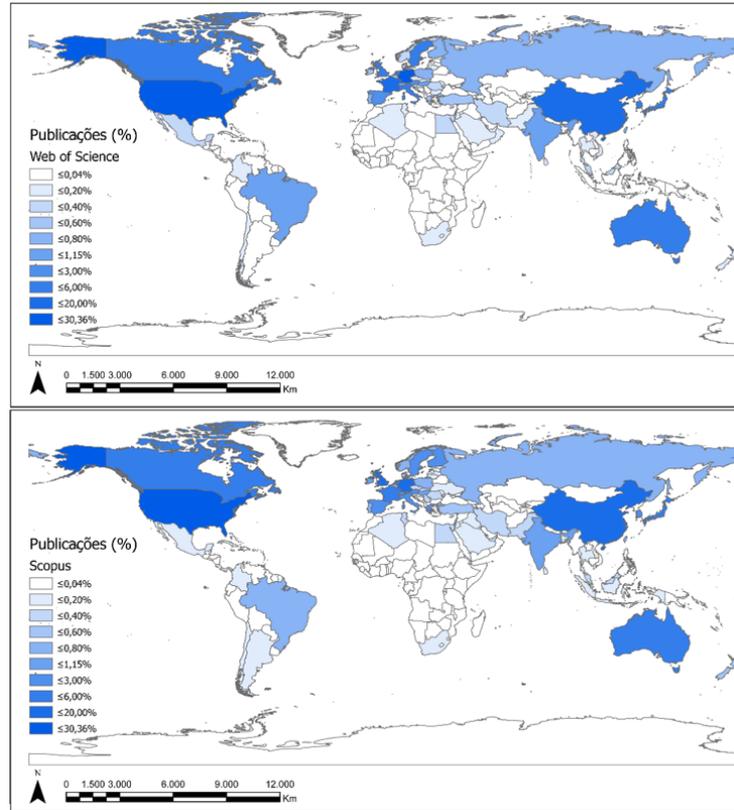
Fonte: Os próprios autores, baseado nos dados extraídos da *Scopus*.

**Publicações por países.** Conforme mostrado na Figura 9, nos documentos da *Web of Science*, o primeiro lugar ficou com os Estados Unidos (29,1%), seguido da Alemanha (20,1%), China (13,5%), França (6,1%) e Reino Unido (5,1%). No caso da *Scopus* tem-se novamente os Estados Unidos (30,4%) em primeiro lugar, seguido novamente da Alemanha (15,6%) e China (10,5%), e logo o Reino Unido (7,5%) e Países Baixos (5,8%). Com relação aos países em desenvolvimento, destacam-se em número de publicações, a China, Brasil (0,91% na *Web of Science* e 0,65% na *Scopus*), Rússia (0,66 e 0,68%) e Índia (0,86 e 1,05%).

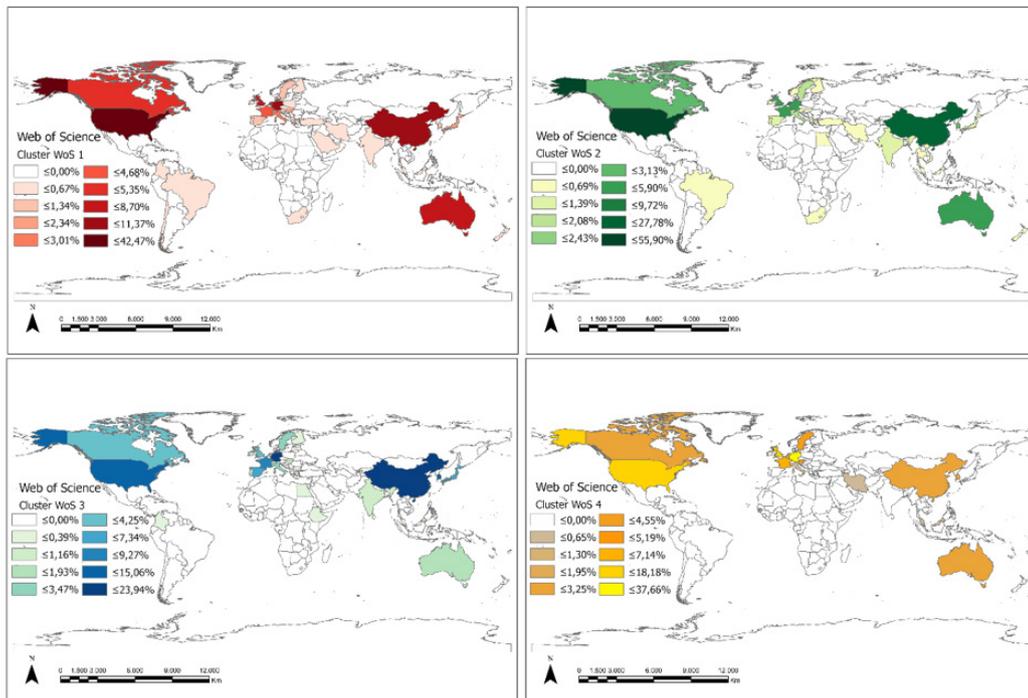
aos países em desenvolvimento, a China aparece nos quatro clusters, principalmente nos clusters 1 WoS, 2 WoS e 3 WoS, ocupando o segundo lugar (11,37; 27,78 e 21,62% respectivamente). A Rússia apesar de apresentar 26 publicações na análise da *Web of Science*, seus documentos não foram categorizados nos clusters. A Índia aparece nos clusters 1 WoS, 2 WoS e 3 WoS (0,67; 1,04 e 1,16%), o Brasil nos clusters 1 WoS e 2 WoS (0,67 e 0,35%). O cluster 4 WoS, voltado para simuladores de direção, contempla unicamente a China com 2,60% das publicações.

Considerando os clusters do acoplamento bibliográfico, na Figura 10 são apresentados os resultados da *Web of Science*, com as linhas de pesquisas que estão sendo desenvolvidas em cada país. Os Estados Unidos lideram nos cluster 1 WoS e 2 WoS (42,47 e 55,90%, respectivamente), e está em terceiro lugar no 3 WoS (15,06%) e segundo no 4 WoS (18,18%). Já a Alemanha lidera os clusters 3 WoS e 4 WoS (23,94 e 37,66%), e está em terceiro no cluster 1 WoS (10,37%) e em sexto lugar no cluster 2 WoS (4,86%). Em relação

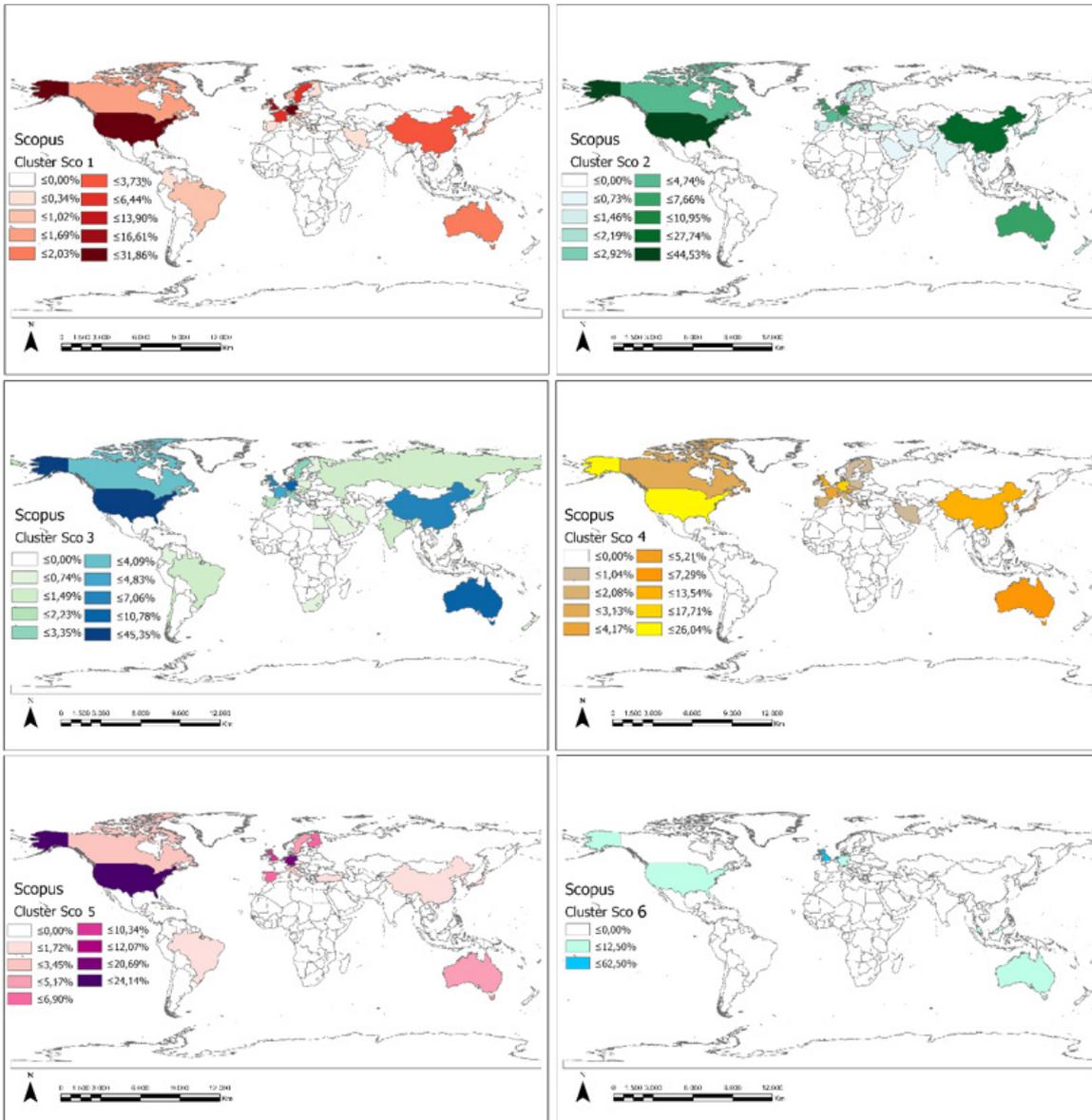
Para o caso dos clusters de acoplamento bibliográfico da *Scopus* nos países, na Figura 11, observa-se a distribuição percentual dos documentos publicados. O cluster 6 Sco, possui apenas seis países, sendo que somente os Países Baixos e Reino Unido (representando 62,5% cada país), têm a maior percentagem, e os demais países (Austrália, Alemanha, Malásia e Estados Unidos) possuem somente uma publicação neste cluster (12,5%), considerando as possíveis co-autoria.



**Figura 9.** Países que mais publicaram na *Web of Science* (acima) e *Scopus* (abaixo).  
 Fonte: Os próprios autores, baseado nos dados extraídos da *Web of Science* e *Scopus*.



**Figura 10.** Países que mais publicaram em cada cluster do acoplamento bibliográfico da *Web of Science*.  
 Fonte: Os próprios autores, baseado nos dados extraídos da *Web of Science*.



**Figura 11.** Países que mais publicaram em cada cluster do acoplamento bibliográfico da Scopus.  
 Fonte: Os próprios autores, baseado nos dados extraídos da Scopus.

Com exceção do cluster 6 Sco, os Estados Unidos lideram todos os clusters em número de documentos publicados, 1 Sco, 2 Sco, 3 Sco, 4 Sco e 5 Sco (31,86; 44,53; 45,35; 26,04 e 24,14%, respectivamente). E a Alemanha se encontra em segundo lugar nos clusters 1 Sco, 4 Sco e 5 Sco (25,76; 17,71 e 20,69%), e em terceiro nos 2 Sco e 3 Sco (10,95 e 10,41%). Em relação aos países em desenvolvimento, a China tem uma boa representatividade nos clusters 1 Sco, 2 Sco, 3 Sco e 4 Sco (3,73, 27,74, 7,06 e 9,38%), e com uma publicação no cluster 5 Sco (1,72%). O cluster 3 Sco congrega três documentos da Índia, Brasil e Rússia, representado 1,12% cada país. Já o

cluster 2 Sco possui publicações da Índia (0,36%), e os clusters 1 Sco (0,67%) e 5 Sco (1,72%) contêm documentos brasileiros.

### Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo levantar o estado da arte referente a VA, observando o desenvolvimento do tema e analisando os periódicos que mais publicaram e citaram sobre o tema, as linhas de pesquisa e a distribuição de publicação nos países.

Com este levantamento, foi notado que o tema de VAs teve um crescimento considerável ano a ano nas duas bases de dados, principalmente na *Scopus*, com maior intensidade a partir de 2014, refletindo o aumento do interesse pelo assunto no decorrer dos anos.

Nos documentos da *Web of Science* a revista *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* foi a que mais publicou e citou sobre os VAs. Além disso, este periódico apresenta o maior fator de impacto entre todos nos dados da *Web of Science*, estando em quinto lugar no JCR. Já nos dados da *Scopus*, o periódico que apresentou maior relevância foi a revista *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, que é o segundo que mais publicou e o primeiro em número de citações, apresentando o maior fator de impacto entre os analisados, estando em segundo lugar no SJR.

Nas análises de acoplamento bibliográfico foram identificadas duas grandes linhas de pesquisa de VAs, uma voltada aos aspectos tecnológicos, focando na direção automatizada no sistema de transporte e operação dos VAs (2 WoS, 3 WoS e 2 Sco), e a outra para a questão social, relacionada aos aspectos comportamentais e de aceitabilidade dos VA (1 WoS, 4 WoS, 1 Sco, 3 Sco, 4 Sco e 5 Sco e 6 Sco).

Na distribuição de publicações por países é perceptível que os Estados Unidos, Alemanha e China lideram o número de publicações nas duas bases de dados. Ao se considerar a representatividade dos países em desenvolvimento aparecem a China, Brasil, Rússia e Índia. Desses, a China que se encontra em segundo lugar em número de publicações, compete com os países desenvolvidos. Quanto as linhas de pesquisa voltada para os aspectos tecnológicos, os países que lideram são principalmente os Estados Unidos e a China. Na linha referente às questões sociais se

destacam os Estados Unidos e Alemanha.

Visto os resultados obtidos, foi gerado um melhor entendimento sobre as pesquisas envolvendo os VAs, que podem ser resumidas em duas áreas de conhecimento dos transportes, da oferta e da demanda. Do lado da oferta, as linhas de pesquisa focam-se nos aspectos técnicos e tecnológicos, enquanto do lado da demanda estão sendo estudadas questões sociais e comportamentais do usuário perante a implantação dos VAs.

Dessa forma, constata-se a vantagem dos países desenvolvidos em implantar os VAs, pois são detentores da tecnologia necessária para a produção de veículos totalmente autônomos, que não precisem de nenhuma condução humana. No caso dos países em desenvolvimento, como o Brasil, um processo de interação com os países líderes identificados poderá auxiliar na implantação dos VAs no contexto nacional.

Em relação as questões sociais e comportamentais, seja nos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, as barreiras de implantação sempre estarão presentes, principalmente em relação a segurança e privacidade. Isto mostra que são necessários estudos focando na aceitabilidade do usuário e comportamento do motorista.

### **Agradecimentos**

Um agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos ao primeiro autor para o desenvolvimento da dissertação que deu origem a este trabalho. Também agradecemos ao nosso Grupo de Pesquisa Comportamento em Transportes e Novas Tecnologias (CTNT) do Programa de Pós-Graduação em Transportes (PPGT) da Universidade de Brasília (UnB).

## **REFERENCIAS**

- Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, O. A. (2014). Autonomous vehicle technology a guide for policymakers. In *RAND Corporation*.
- Clarivate Analytics. (2020). *InCites Journal Citation Reports*. dataset updated Jun 29, 2020. Recuperado em 5 de setembro, 2020, de <https://jcr.clarivate.com/JCRJournalHomeAction.action>

- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
- Gandia, R. M., Antonialli, F., Cavazza, B. H., Neto, A. M., Lima, D. A. de, Sugano, J. Y., Nicolai, I., & Zambalde, A. L. (2019). Autonomous vehicles: scientometric and bibliometric review. *Transport Reviews*, 39(1), 9–28. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1518937>
- Gogoll, J., e Müller, J. F. (2017) Autonomous Cars: In Favor of a Mandatory Ethics Setting. *Science and Engineering Ethics*, 23(3), 681–700. doi:10.1007/s11948-016-9806-x
- Hevelke, A., e Nida-Rümelin, J. (2015) Responsibility for Crashes of Autonomous Vehicles: An Ethical Analysis. *Science and Engineering Ethics*, 21(3), 619–630. doi:10.1007/s11948-014-9565-5
- Kessler, M. M. (1963). Bibliographic coupling between scientific papers. *American Documentation*, 14(1), 10–25. <https://doi.org/10.1002/asi.5090140103>
- Li, Y., Wang, Y., Rui, X., Li, Y., Li, Y., Wang, H., Zuo, J., & Tong, Y. (2017). Sources of atmospheric pollution: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, 112(2), 1025–1045. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2421-z>
- Milakis, D., Van Arem, B., & Van Wee, B. (2017). Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 21(4), 324–348. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1291351>
- Modak, N. M., Merigó, J. M., Weber, R., Manzor, F., & Ortúzar, J. de D. (2019). Fifty years of Transportation Research journals: A bibliometric overview. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 120, 188–223. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.11.015>
- Petit, J., e Shladover, S. E. (2015) Potential Cyberattacks on Automated Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 546–556. doi:10.1109/TITS.2014.2342271
- Romano, A. B., Taco, P. W. G., Mariano, A. M., & Feitosa, Z. O. (2018). Revisão Bibliométrica Dos Fatores Que Influenciam O Uso De Bicicleta Fazendo Uso Da Teoria Do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC). *32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, 2726–2737.
- Santoni de Sio, F. (2017) Killing by Autonomous Vehicles and the Legal Doctrine of Necessity. *Ethical Theory and Moral Practice*, 20(2), 411–429. doi:10.1007/s10677-017-9780-7
- Scimago Institutions Rankings. (2019). *Scimago Journal & Country Rank*. Recuperado em 5 de setembro, 2020, de <https://www.scimagojr.com/journalrank.php?category=3313&area=3300&year=2019>
- The International Association of Public Transport. (2017). Policy brief - Autonomous vehicles: a potential game changer for urban mobility. The International Association of Public Transport - UITP. Recuperado de <https://www.uitp.org/publications/autonomous-vehicles-a-potential-game-changer-for-urban-mobility/>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2014). Visualizing Bibliometric Networks. In *Measuring Scholarly Impact* (p. 285–320). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13)
- Waltman, L., van Eck, N. J., & Noyons, E. C. M. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629–635. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.07.002>

## Revisão bibliométrica dos estudos referentes a veículos autônomos em revistas indexadas das bases de dados Web of Science e Scopus

### RESUMO

Amanda Basilio Romano  
[amandaromano27@gmail.com](mailto:amandaromano27@gmail.com)  
Mestranda em Transportes pelo Programa de Pós-graduação em Transportes (PPGT) da Universidade de Brasília (UnB).

Pastor Willy Gonzales Taco  
[pwgtaco@gmail.com](mailto:pwgtaco@gmail.com)  
Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC) e do Programa de Pós-graduação em Transportes (PPGT) da Universidade de Brasília (UnB).

O surgimento de novas tecnologias nos transportes tais como os Veículos Autônomos (VA) tem gerado uma série de estudos sobre seus efeitos na sociedade. Assim, o artigo apresenta uma revisão da literatura sobre VA das publicações das bases de dados *Web of Science* e *Scopus*. Foi aplicada uma análise bibliométrica considerando co-ocorrência de palavras-chaves, acoplamento bibliográfico, co-citação e co-autoria. De forma geral os resultados mostram que duas grandes áreas se destacam nas pesquisas: a componente tecnológica relacionada com o desenvolvimento e aprimoramento dos VA e a componente social relacionada a aspectos comportamentais de aceitabilidade dos VA.

**PALAVRAS-CHAVE:** Veículos autônomos. Revisão bibliométrica. *VOSviewer*. Redes bibliométricas.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o surgimento de novas tecnologias, tais como os Veículos Autônomos (VA) tem gerado diversos estudos a respeito dos seus benefícios e impactos na sociedade. Para os pesquisadores Anderson et al. (2016) e Fagnant e Kockelman (2015), a implantação da tecnologia de VA facilitará, entre outros, a diminuição dos acidentes de trânsito, incrementará a mobilidade daqueles que não desejam dirigir ou tem alguma restrição, possibilitará a diminuição dos congestionamentos e um uso mais eficiente dos estacionamentos, permitirá o compartilhamento de veículos, dará suporte as ações de sustentabilidade com economia de combustível e diminuição das emissões, e ocorrerá um uso mais eficiente das rodovias.

Porém há também as desvantagens na adoção de VA, relativos principalmente ao incremento quilômetros viajados por veículo (*vehicle kilometres travelled* - VKT). Para os autores Anderson et al. (2016), Fagnant e Kockelman (2015) e Milakis et al. (2017), entre as desvantagens, citam os congestionamentos, incremento de consumo de combustível, de emissões e do número de viagens. Ainda devem ser considerados os prejuízos na redução da receita de estacionamentos, aumentando o desemprego, com a profissão de motorista se tornando desnecessária, a possibilidade de mudança de usuários do transporte público para os VAs, e com a redução de acidentes acaba afetando companhias de seguros, funilaria, entre outros (ANDERSON et al., 2016; FAGNANT; KOCKELMAN, 2015).

E considerando as barreiras da implantação de VA, relacionados com a tecnologia, destacam-se os prováveis ciberataques, a responsabilidade em caso de acidentes, e questões éticas na configuração computacional de decisão do VA perante um sinistro inevitável (GOGOLL; MÜLLER, 2017; HEVELKE; NIDA-RÜMELIN, 2015; PETIT; SHLADOVER, 2015; SANTONI DE SIO, 2017).

Sejam os impactos positivos ou negativos e as prováveis barreiras, vários países já estão testando protótipos de VA e em alguns casos adequando sua legislação para adaptar-se perante essa tecnologia (TAEIHAGH; LIM, 2019). Ainda, empresas estão investindo recursos em modelos de VA e previsões são feitas da sua comercialmente dentro de um período de vinte anos (entre 2025 e 2045) (MILAKIS et al., 2017). Já no caso do Brasil, estudos sobre os benefícios e condicionantes da implantação de VA seguindo uma abordagem comportamental foram realizados por Santos (2017) e Silva (2018). Embora os estudos anteriores apresentem uma visão comportamental da implantação de VA são ainda um recorte específico, precisando se avaliar os efeitos sociais e suas implicações perante as várias condições tecnológicas e abordagens de aplicações em muitos países, motivando se conhecer o estado atual dos estudos sobre VA no mundo.

Uma técnica que possibilita o levantamento do estado atual de uma área de conhecimento é a Revisão Bibliométrica (RB), que cada vez mais está sendo utilizada em diversos campos de estudo. Por exemplo Romano et al. (2018), a partir da RB identificaram fatores que influenciam o uso da bicicleta. Modak et al. (2019) realizaram estudo bibliométrico das publicações da revista *Transportation Research* entre 1967 e 2016. Li et al. (2017) fizeram uma análise bibliométrica para identificar fontes de poluição atmosférica durante o período de 2006-2015. Já Mora, Bolici e Deakin (2017) fazem uma análise bibliométrica, entre 1992 e 2012, sobre cidades inteligentes. E na área de VA, Gandia et al. (2019) fizeram

uma revisão cienciométrica e bibliométrica. Assim, este tipo de revisão baseado na utilização de índices bibliométricos aplicados em estudos de VA pode possibilitar a identificação das suas principais características, sua evolução e as potenciais tendências para estudos futuros.

Nesse sentido, o presente artigo, tem como objetivo realizar uma Revisão Bibliométrica, nos artigos indexados das bases de dados da *Web of Science (WoS)* e *Scopus* sobre os estudos de VA. Assim, o presente artigo, seguido da introdução tem-se a seção em que é abordado o método adotado de Revisão Bibliométrica. Já na seção 3 são apresentados os resultados obtidos da revisão bibliométrica sobre VA e na seção 4, são feitas as considerações finais.

### REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

A Revisão Bibliométrica pode oferecer uma visão geral e perspectiva quantitativa de um campo de pesquisa específico, contribuindo para analisar a evolução dos estudos e indicar a tendência de desenvolvimento de uma disciplina científica, entendendo o estado atual e identificando as futuras direções de pesquisas (LI et al., 2017). A revisão bibliométrica se utiliza de indicadores bibliométricos baseados em análise de redes. Segundo Waltman, van Eck e Noyons (2010), para subsidiar com informações da estrutura de uma rede bibliométrica, são utilizadas técnicas de agrupamento e mapeamento, que se complementam, possibilitando a identificação de temas ou áreas de pesquisa, a relação entre estes e o processo de desenvolvimento científico no tempo.

Cobo et al. (2011) apresentam diversas técnicas que dão suporte à Revisão Bibliométrica, tais como técnicas de redução de dimensionalidade, como análise de componente principal ou escalonamento multidimensional (*Multidimensional Scaling - MDS*), algoritmos de agrupamento e redes *Pathfinder* (PFNETs). Ainda, existem técnicas de visualização utilizadas para representar as redes de relacionamento bibliográfico, que podem ser mostradas usando mapas heliocêntricos, modelos geométricos, redes temáticas, ou mapas em que a proximidade entre os itens representa sua similaridade. Neste caso podem ser utilizadas ferramentas específicas de representação visual tais como *Bibexcel*, *CiteSpace II*, *CoPalRed*, *IN-SPIRE*, *Leydesdorff's Software*, *Network Workbench Tool*, *Science of Science (Sci2) Tool*, *VantagePoint* ou *VOSviewer*.

Pela necessidade de construir mapas bibliométricos para melhor visualização dos dados bibliométricos, o software *VOSviewer* (VAN ECK; WALTMAN, 2010, 2014) foi desenvolvido e está disponível gratuitamente ([www.vosviewer.com](http://www.vosviewer.com)), oferecendo suporte a mapas baseados em distância (VAN ECK; WALTMAN, 2010), sendo possível construir e visualizar mapas bibliométricos com uso da técnica de mapeamento VOS (VAN ECK; WALTMAN, 2007). Assim, neste estudo foi utilizado o software *VOSviewer* para criação de mapas baseados em dados de rede, facilitando a visualização da análise sobre o rumo da pesquisa sobre os VA. Nos mapas gerados quanto maior o tamanho do rótulo e do círculo do item no mapa significa o peso deste, normalmente o quão citado é o documento ou o número de documentos pertencente aquele item, por exemplo. A cor é para representar em que *cluster* o item pertence, que é um conjunto de elementos com algo em comum. Neste estudo este software será usado para quatro tipos de análises: co-

ocorrência de palavras-chaves, acoplamento bibliográfico, co-citação e co-autoria de países. Assim será possível analisar as linhas de pesquisas sobre o tema de VAs que estão em desenvolvimento no mundo, e a rede de pesquisadores formada entre os países que publicaram sobre o tema.

## MÉTODO DA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE VEÍCULOS AUTÔNOMOS

### Definição da *string* e delimitações da pesquisa

O campo espaço-tempo da pesquisa foi limitado até dezembro de 2019, utilizando-se as bases de dados consolidadas e de reconhecida qualidade da *Web of Science (WoS)* e *Scopus*, acessados pelo Portal de Periódicos da CAPES. As buscas nas duas bases de dados foram conduzidas no dia 24 de março de 2020. A pesquisa na *WoS* foi limitada pelas áreas *Transportation Science Technology* e *Transportation*, na *Scopus* foi pela área *Social Sciences*, já que a subárea de transporte se encontra dentro desta área. Em ambas as bases foram selecionados somente documentos em inglês, sendo elaboradas as *strings* apresentadas a seguir:

#### a) *WoS*:

`("autonomous" OR "automated" OR "self-driving" OR "driverless") NEAR/0 ("vehicle$" OR "car$" OR "driving" OR "automobile$" OR "bus*" OR "taxi$" OR "truck$" OR "electric vehicle$" OR "road vehicle$") OR ("connected") NEAR/1 ("automated" OR "autonomous") AND ("vehicle$" OR "car$" OR "driving" OR "transportation")) OR "cooperative intelligent transport system$" OR "cooperative-ITS".`

#### b) *Scopus*:

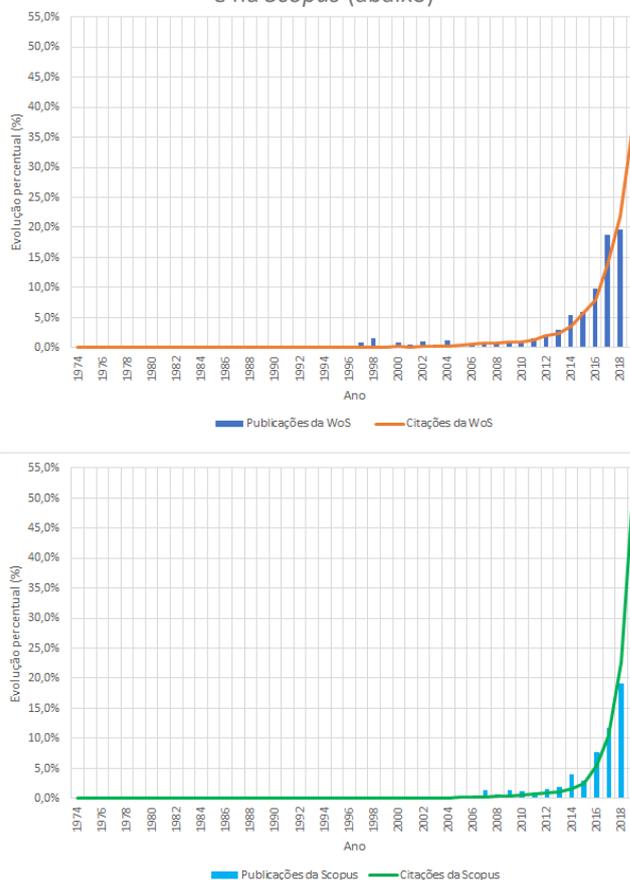
`("autonomous" OR "automated" OR "self-driving" OR "driverless") w/0 ("vehicle$" OR "car$" OR "driving" OR "automobile$" OR "bus*" OR "taxi$" OR "truck$" OR "electric vehicle$" OR "road vehicle$") OR ("connected") w/1 ("automated" OR "autonomous") AND ("vehicle$" OR "car$" OR "driving" OR "transportation")) OR "cooperative intelligent transport system$" OR "cooperative-ITS".`

### Evolução das citações e publicações durante os anos

A evolução porcentual do tema mostra que em ambas as bases, ano a ano, as citações e publicações vêm aumentando significativamente, especialmente a partir de 2014 (Figura 1). Na *WoS* as publicações iniciam-se desde 1979 e na *Scopus* desde 1974, até o momento da pesquisa, dezembro de 2019. Assim, ao se analisar os dados da pesquisa na *WoS*, existem 3.926 documentos com 29.409 citações, já nos dados da pesquisa na *Scopus*, existem 3.047 documentos com 19.707 citações. Em relação as citações na *WoS* quase 60% ocorreram em 2018 e 2019. Na *Scopus* mais de 50% ocorreram somente em 2019. Quanto as publicações, observa-se que na *WoS*, cerca de 60% ocorreram de 2017 a 2019, e

mais de 40%, na *Scopus*, somente em 2019. Isso mostra que o tema está em fase de crescimento a partir do ano de 2017, nas publicações das bases utilizadas.

Figura 1 - Evolução percentual das publicações e citações na *Web of Science* (acima) e na *Scopus* (abaixo)



Fonte: Autoria própria (2021).

### Análise dos documentos mais citados

Nesta seção são analisados os documentos mais citados na *WoS* e na *Scopus*, sendo que o documento mais citado nas duas bases de dados foi Fagnant e Kockelman (2015). Este artigo explora os aspectos viáveis dos VAs e discute seus possíveis impactos no sistema de transporte, abordando sobre potenciais benefícios de veículos autônomos, barreiras a sua implementação e recomendações de políticas. Além disso, os artigos de Fagnant e Kockelman (2014), Kyriakidis, Happee e De Winter (2015) e de De Winter et al. (2014) também aparecem nas duas bases de dados entre os dez mais citados. O primeiro aborda sobre veículos autônomos compartilhados (SAVs), já o segundo investiga sobre a aceitação, preocupações e disposição dos usuários de comprar veículos parcialmente, altamente e totalmente automatizados. E o terceiro realiza uma revisão referente aos efeitos do Controle de Cruzeiro Adaptativo (*Adaptive Cruise Control - ACC*) e Direção Altamente Automatizada (*Highly Automated Driving - HAD*) em dois dos mais importantes construtos de Fatores Humanos que são preditivos de desempenho e segurança. O primeiro constructo refere-se a carga de trabalho dos motoristas, que seria o resultado de questionários ou testes que avaliam o custo ou a dificuldade experimentada pelo motorista. O segundo é sobre a conscientização da situação (*Situation Awareness*

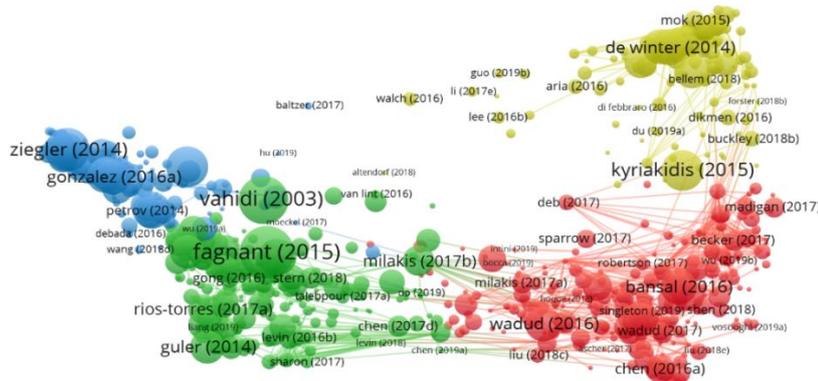




foram selecionados os 1000 documentos com maior força total do *link*. Este atributo indica a força total dos *links* de um item com outros itens.

A análise de acoplamento bibliográfico dos dados da pesquisa na *WoS*, derivou no agrupamento de 4 cluster (Figura 4). Ao se analisar os 10 documentos mais citados de cada um destes clusters, é possível determinar a área de estudo de cada cluster. Observa-se que os clusters mais à esquerda (azul e verde) possuem áreas voltadas para o desenvolvimento de VA e sua influência no tráfego, enquanto os clusters à direita (vermelho e amarelo) são focados na área comportamental e a aceitabilidade referente ao VA.

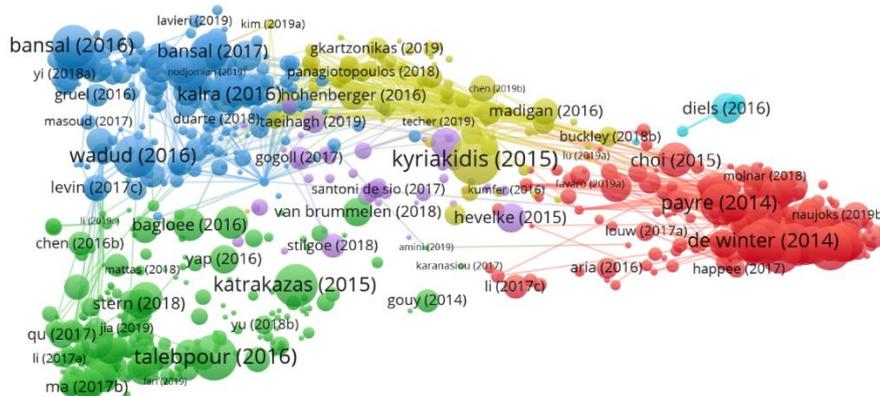
Figura 4 - Acoplamento bibliográfico com os 1000 documentos com maior força total de *link* com os demais documentos – Web of Science



Fonte: Autoria própria (2021), com auxílio do *software VOSviewer*.

Na Figura 5 apresenta-se o acoplamento bibliográfico dos dados da pesquisa na Scopus, com 6 clusters, tendo sido analisados os 10 documentos mais citados de cada um dos cluster, para assim entender sobre sua área de estudo. Percebe-se linhas de pesquisas centradas no comportamento e aceitabilidade do usuário, com exceção do cluster verde, sendo que este aborda questões de operação do tráfego relacionadas com o uso dos VAs. O fato dos clusters desta análise serem mais focados no comportamento e aceitabilidade do usuário, possivelmente se deve aos resultados da Scopus terem sido filtrados pela área *Social Science*.

Figura 5 - Acoplamento bibliográfico com os 1000 documentos com maior força total de *link* com os demais documentos – Scopus



Fonte: Autoria própria (2021), com auxílio do *software VOSviewer*.

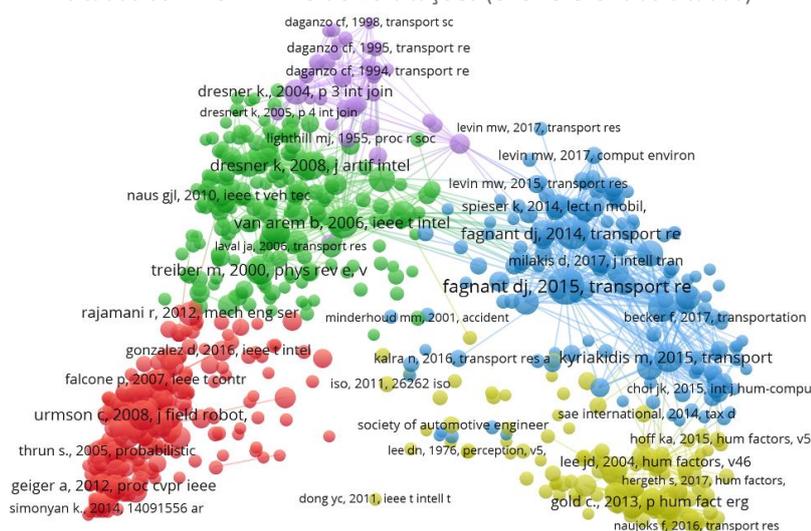
## Co-citação

A co-citação é a frequência em que dois documentos são citados juntos, e quanto maior número de publicações em que estas duas publicações são co-citadas, mais forte será a relação de co-citação entre a elas. Diferentemente do acoplamento bibliográfico, que mapeia os documentos encontrados na pesquisa, a co-citação vincula os documentos citados, sendo uma relação estabelecida pelos autores citadores (SMALL, 1973; VAN ECK; WALTMAN, 2014).

A análise só foi possível ser realizada nos dados da pesquisa da *Web of Science*. Já os dados da *Scopus* precisariam de um tratamento maior, pois a análise estaria propensa a erros devido ao fato de o banco de dados apresentar diferenças na ortografia de uma mesma referência, sendo que uma mesma referência aparecia mais de uma vez no mapa, mas com nomes diferentes.

No mapa de co-citações da pesquisa na *WoS* observa-se 5 *clusters* obtidos (Figura 6), e foi utilizado o método de contagem completa, em que cada *link* de co-citação tem o mesmo peso. Foram selecionados somente as referências com no mínimo 10 citações, obtendo-se 843 referências citadas dos documentos. As 10 referências que mais foram citadas pelos documentos da pesquisa em cada *cluster* foram analisadas para se definir a área temática deste. Por se tratar de referências, alguns destes documentos não estão relacionados diretamente com VA, como os *clusters* verde e roxo que abordam sobre análise e modelos de fluxo de tráfego. O *cluster* vermelho está mais focado na robótica móvel, com temas que abordam sobre VAs desenvolvidos e sistemas para condução autônoma, enquanto os *cluster* azul e amarelo são voltados para a área social e comportamental de VA.

Figura 6 - Co-citação com os documentos da web of Science, com as referências citadas com no mínimo de 10 citações (843 referências citadas)



Fonte: Autoria própria (2021), com auxílio do *software VOSviewer*.

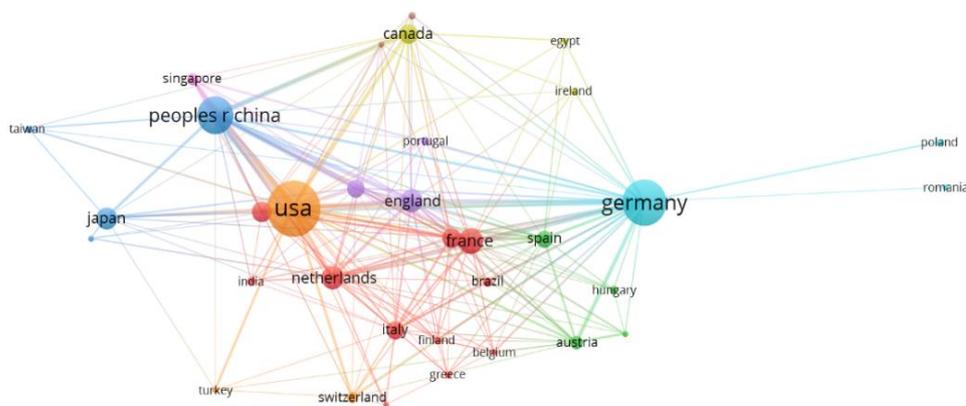
## Co-autoria de países

As redes bibliométricas baseadas em co-autoria podem analisar redes de pesquisadores, instituições de pesquisa ou países com base no número de

documentos que publicaram em conjunto (VAN ECK; WALTMAN, 2014). Esta análise de co-autoria revela os países que mais publicam em parceria, representando a colaboração entre países com a formação de redes de pesquisadores. O método de contagem selecionado foi de contagem total, significando que cada *link* de co-autoria tem o mesmo peso, selecionando-se os países que apresentavam no mínimo 10 documentos contidos na pesquisa.

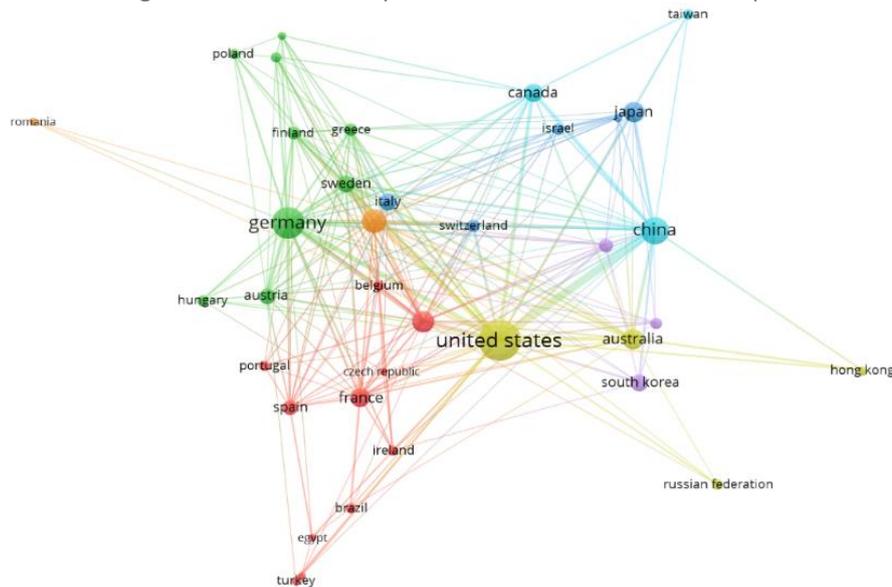
Na Figura 7, para os dados da *WoS*, observa-se ao todo 34 países divididos em 9 *clusters*. Da análise, percebe-se que o Brasil se encontra no maior *cluster*, com 36 documentos publicados e 8 *links* entre outros países (EUA, Países Baixos, Austrália, França, Espanha, Alemanha, Itália e Suécia), sendo que a maior força de *link* é o com França.

Figura 7 - Co-autoria de países com os documentos da Web of Science



Fonte: Autoria própria (2021), com auxílio do software VOSviewer.

Figura 8 - Co-autoria de países com os documentos da Scopus



Fonte: Autoria própria (2021), com auxílio do software VOSviewer.

Na análise de co-autoria dos dados da pesquisa da *Scopus* (Figura 8), também foram selecionados os países com no mínimo 10 documentos, obtendo-se 37 países agrupados em 7 *clusters*. Já o Brasil nesta análise possui apenas 20 documentos com 5 *links* com outros países (Estados Unidos, Canadá, França, Austrália e Egito). A maior força de *link* novamente é com a França, mostrando que o Brasil e a França possuem uma rede de pesquisadores bem estabelecida, tornando-se num parceiro estratégico. Nas duas análises (Figura 7 e Figura 8) observa-se aproximação do Brasil com EUA, Austrália e França.

Quanto aos países que mais publicam sobre VAs na *WoS* e na *Scopus* na área de transportes, na Tabela 1 é apresentado o *ranking* com 15 países que mais publicam, sendo os Estados Unidos, Alemanha e China os países que mais publicam nas duas bases de dados. Para uma análise comparativa o Brasil foi adicionado, tendo a posição 17° do país que mais publica na *WoS* (0,9% dos registros) e o 28° na *Scopus* (0,7% dos registros).

Tabela 1 - Países que mais publicam na Web of Science e na Scopus

Países	Web of Science			Scopus		
	Ranking	Nº de publicações	% de 3926	Ranking	Nº de publicações	% de 3047
Estados Unidos	1º	1144	29,1%	1º	925	30,4%
Alemanha	2º	788	20,1%	2º	474	15,6%
China	3º	531	13,5%	3º	320	10,5%
França	4º	239	6,1%	8º	122	4,0%
Reino Unido	5º	202	5,1%	4º	230	7,5%
Países Baixos	6º	194	4,9%	5º	176	5,8%
Japão	7º	187	4,8%	7º	135	4,4%
Coreia do Sul	8º	157	4,0%	12º	80	2,6%
Canadá	9º	152	3,9%	9º	99	3,2%
Suécia	10º	143	3,6%	10º	89	2,9%
Austrália	11º	137	3,5%	6º	141	4,6%
Itália	12º	132	3,4%	11º	88	2,9%
Espanha	13º	113	2,9%	14º	65	2,1%
Áustria	14º	75	1,9%	13º	67	2,2%
Singapura	15º	62	1,6%	15º	43	1,4%
Brasil	17º	36	0,9%	28º	20	0,7%

Fonte: Autoria própria (2021).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo realizar uma revisão bibliométrica sobre os estudos de veículos autônomos na área de transportes, obtendo-se as linhas de pesquisa que estão sendo desenvolvidas sobre o tema. Para esta análise se usou

duas bases de dados consolidadas e de reconhecida qualidade, a *WoS* e a *Scopus*, obtendo 3.926 e 3.047 resultados respectivamente, sendo o campo espaço-tempo da pesquisa limitado até dezembro de 2019. Assim se deve considerar que as análises apresentadas neste artigo estão limitadas aos resultados fornecidos nestas duas bases, e pelo campo espaço-tempo da pesquisa definido. O tema de VA apresentou estar crescendo consideravelmente ano a ano nas duas bases de dados, principalmente na *Scopus*, com maior intensidade a partir de 2014.

Pelas redes de co-ocorrências de palavras do título e do resumo percebe-se que a área de VA se foca em duas grandes linhas de pesquisa, sendo uma voltada nos aspectos técnicos e tecnológicos para operação e desenvolvimento dos VA, enquanto a outra considera as questões sociais e comportamentais associadas aos VAs. E estas linhas de pesquisas foram confirmadas pelas análises de acoplamento bibliográfico e co-citação. No mapa de acoplamento da *WoS*, formado por quatro *clusters*, possui dois *clusters* em cada uma dessas grandes linhas, sendo na linha focado em aspectos tecnológicos, um *cluster* foca na direção automatizada no sistema de transporte, e fluxo e operação do tráfego, e outro sobre sistemas desenvolvidos para condução autônoma. Já na grande linha relacionada com questões sociais e comportamentais, um *cluster* foca no impacto e aceitabilidade pública dos VAs, e o outro aborda sobre simuladores de direção, isto é, o comportamento do motorista nos VAs. Já no mapa de acoplamento da *Scopus*, somente um *cluster* foca na área de operação dos VA no sistema de transporte, enquanto os demais cinco *clusters* são focados na linha social e comportamental. Nestes cinco *clusters*, dois *clusters* são voltados para o comportamento do motorista em relação aos VA, dois são voltados principalmente para a aceitabilidade pública, e último voltado para as questões éticas e sociais. Já na análise de co-citação da *WoS*, dois *clusters* não são focados diretamente nos VA, abordando sobre análise e modelos de fluxo de tráfego. Já os demais *clusters*, dois são focados na linha social e comportamental, e um em desenvolvimento de VA.

Ao se analisar as redes bibliométricas baseadas em co-autoria de países, ao se observar o Brasil, é notável que este apresenta uma parceria considerável com a França. Porém ao se analisar os países que mais publicam sobre VA, o Brasil não apresenta um quantitativo relevante de documentos, estando em 17° no *ranking* de países que mais publicaram na *WoS* (0,9% dos registros) e o 28° na *Scopus* (0,7% dos registros), sendo que, por exemplo, a sua parceira, a França, se encontra em 4° na *WoS* e em 8° na *Scopus*. Assim, se ver a necessidade de descobrir quais as linhas de pesquisa o Brasil vem desenvolvendo, para começar estabelecer as prioridades de pesquisas brasileiras tanto em nível acadêmico quanto em questões de políticas públicas, para assim buscar alcançar patamares maiores. Assim, sugere-se uma análise mais aprofundada das pesquisas que estão sendo desenvolvidas no Brasil, observando como se encontra a sua rede de pesquisadores e quais suas linhas de pesquisa, para assim entender o estado atual de pesquisa, e em seguida definir as futuras direções de pesquisas.

# Bibliometric review of studies related to automated vehicles in indexed journals from the Web of Science and Scopus databases

## ABSTRACT

The emergence of new technologies in transport such as Automated Vehicles (AV) has generated a series of studies about their effects on the society. Therefore, this article presents a literature review on AV from the publications of the Web of Science and Scopus databases. A bibliometric analysis was applied, considering the co-occurrence of keywords, bibliographic coupling, co-citation and co-authorship. In general, the results show that two major areas stand out in the research, they are: the technological component related to the development and improvement of AV and the social component related to behavioral aspects of AV acceptability.

**KEYWORDS:** Automated Vehicle. Bibliometric review. VOSviewer. Bibliometric Network.

---

## AGRADECIMENTOS

Um agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos ao primeiro autor para o desenvolvimento da dissertação que deu origem a este trabalho.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON, J. M. et al. **Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers**. Santa Mônica, California: RAND Corporation, 2016.

COBO, M. J. et al. Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 62, n. 7, p. 1382–1402, jul. 2011.

DE WINTER, J. C. F. et al. Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v. 27, n. PB, p. 196–217, 2014.

FAGNANT, D. J.; KOCKELMAN, K. Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 77, p. 167–181, 2015.

FAGNANT, D. J.; KOCKELMAN, K. M. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 40, p. 1–13, mar. 2014.

GANDIA, R. M. et al. Autonomous vehicles: scientometric and bibliometric review. **Transport Reviews**, v. 39, n. 1, p. 9–28, 2 jan. 2019.

GOGOLL, J.; MÜLLER, J. F. Autonomous Cars: In Favor of a Mandatory Ethics Setting. **Science and Engineering Ethics**, v. 23, n. 3, p. 681–700, 2017.

HEVELKE, A.; NIDA-RÜMELIN, J. Responsibility for Crashes of Autonomous Vehicles: An Ethical Analysis. **Science and Engineering Ethics**, v. 21, n. 3, p. 619–630, 2015.

KESSLER, M. M. Bibliographic coupling between scientific papers. **American Documentation**, v. 14, n. 1, p. 10–25, jan. 1963.

KYRIAKIDIS, M.; HAPPEE, R.; DE WINTER, J. C. F. Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents.

---

**Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v. 32, p. 127–140, 2015.

LI, Y. et al. Sources of atmospheric pollution: a bibliometric analysis. **Scientometrics**, v. 112, n. 2, p. 1025–1045, 29 ago. 2017.

MILAKIS, D. et al. Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands Scenarios for 2030 and 2050. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, v. 17, n. 1, p. 63–85, 2017.

MODAK, N. M. et al. Fifty years of Transportation Research journals: A bibliometric overview. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 120, p. 188–223, fev. 2019.

MORA, L.; BOLICI, R.; DEAKIN, M. The First Two Decades of Smart-City Research: A Bibliometric Analysis. **Journal of Urban Technology**, v. 24, n. 1, p. 3–27, 2 jan. 2017.

PETIT, J.; SHLADOVER, S. E. Potential Cyberattacks on Automated Vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n. 2, p. 546–556, 2015.

ROMANO, A. B. et al. Revisão Bibliométrica Dos Fatores Que Influenciam O Uso De Bicicleta Fazendo Uso Da Teoria Do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC). In 32° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2018, Gramado, Rio Grande do Sul. **Anais [...]**. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), 2018. p. 2726–2737.

SANTONI DE SIO, F. Killing by Autonomous Vehicles and the Legal Doctrine of Necessity. **Ethical Theory and Moral Practice**, v. 20, n. 2, p. 411–429, 2017.

SANTOS, L. C. B. DOS. **Implantação de veículos autônomos no contexto brasileiro: avaliação dos fatores que influenciam no interesse de uso com equações estruturais**. 2017. Monografia (Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

SILVA, Y. R. M. DA. **Aceitabilidade de uso de veículos autônomos de passeio utilizando modelo comportamental adaptado à realidade brasileira**. 2018. Monografia (Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

SMALL, H. Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents. **Journal of the American Society for Information Science**, v. 24, n. 4, p. 265–269, jul. 1973.

TAEIHAGH, A.; LIM, H. S. M. Governing autonomous vehicles: emerging responses for safety, liability, privacy, cybersecurity, and industry risks. **Transport Reviews**, v. 39, n. 1, p. 103–128, 2 jan. 2019.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. VOS: A New Method for Visualizing Similarities Between Objects. In: Decker R., Lenz H.J. (eds) **Advances in Data Analysis. Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p. 299–306.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 31 ago. 2010.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Visualizing Bibliometric Networks. In: Ding Y., Rousseau R., Wolfram D. (eds) **Measuring Scholarly Impact**. Springer, Cham, 2014. p. 285–320.

WALTMAN, L.; VAN ECK, N. J.; NOYONS, E. C. M. A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. **Journal of Informetrics**, v. 4, n. 4, p. 629–635, 2010.

**Recebido:** 12/11/2020

**Aprovado:** 15/07/2021

**DOI:** 10.3895/rts.v17n49.13429

**Como citar:** ROMANO, A. B.; TACO, P. W. G. Revisão bibliométrica dos estudos referentes a Veículos Autônomos em revistas indexadas das bases de dados Web of Science e Scopus. **Rev. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 17, n. 49, p. 172-187, out./dez. 2021. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/13429>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

