

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Laísa Braga Kappler

ANÁLISE DOS IMPACTOS DE VEÍCULOS
AUTÔNOMOS EM UMA RODOVIA BRASILEIRA COM
SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Porto Alegre

2020

Laísa Braga Kappler

Análise dos impactos de veículos autônomos em uma rodovia brasileira com simulação de tráfego

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Transportes.

Orientadora: Professora Helena Beatriz Bettella Cybis, *P.hD.*

Porto Alegre

2020

Laísa Braga Kappler

Análise dos impactos de veículos autônomos em uma rodovia brasileira com simulação de tráfego

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Profª. Orientadora Helena Beatriz Bettella
Cybis, P.hD.**

Orientadora PPGEP/UFRGS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Christine Tessele Nodari, Drª. (PMPEP/UFRGS)

Professor Fernando Dutra Michel, Dr. (DEPROT/UFRGS)

Professor Felipe Caleffi, Dr. (LAMOT/UFSM)

RESUMO

Esta dissertação versa sobre a análise dos impactos de veículos autônomos (*autonomous vehicles*, AVs) em tráfego misto rodoviário no Brasil. Veículos autônomos prometem mudar a maneira como o fluxo de tráfego se comporta, em termos de melhoria da eficiência da corrente de tráfego, aumento da capacidade da via e redução de acidentes de trânsito. Por ser uma tecnologia nova no mercado, há muitas incertezas associadas ao comportamento e desempenho desses veículos nas vias. O contexto rodoviário brasileiro apresenta condições de tráfego não homogêneas e os motoristas comportam-se de maneira mais agressiva em relação a outros locais do mundo. Dessa forma, este trabalho busca avaliar os impactos de veículos autônomos, em tráfego misto, em uma rodovia brasileira de múltiplas faixas, usando simulação de tráfego. Também pretende: (i) analisar os impactos da inserção de veículos autônomos na frota convencional quanto ao desempenho operacional dos cenários estudados; (ii) avaliar a mudança no número de eventos que seriam considerados conflitos para veículos convencionais, que a inserção de veículos autônomos poderá gerar, com base em uma medida de desempenho de segurança substituta; e (iii) estimar a percentagem de penetração de veículos autônomos que é capaz de trazer benefícios significativos ao fluxo de tráfego da rodovia estudada. O estudo envolveu um projeto de experimentos para a definição dos cenários com diferentes taxas de penetração de veículos autônomos na frota, volumes de tráfego na rodovia e comportamentos do sistema autônomo. Os parâmetros comportamentais dos AVs foram baseados no projeto CoEXist. O VISSIM foi utilizado para avaliar tempo e atraso de viagem, velocidade, taxa de ocupação e número de mudanças de faixa na BR-290/RS. Realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para compreender os impactos dos veículos autônomos no desempenho operacional da rodovia. Por fim, foi realizada uma análise do número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional no SSAM (Surrogate Safety Assessment Model). Os resultados para uma frota composta por 100% AVs indicaram uma redução de 96,1% no atraso de viagem, um aumento de até 83,7% na velocidade e 132,7% no número de mudanças de faixa e uma redução de até 92% do número de eventos que seriam considerados conflitos totais e por colisão traseira. Quanto ao desempenho da corrente de tráfego da rodovia, foram observadas melhorias a partir da introdução de 60% de AVs na frota convencional, provocando uma diminuição dos períodos de congestionamento e um aumento da eficiência do fluxo de tráfego.

Palavras-chave: Veículos autônomos. VISSIM. SSAM. Projeto de experimentos.

ABSTRACT

This work is about the analysis of the impacts of autonomous vehicles (AVs) in mixed road traffic in Brazil. Autonomous vehicles promise to change the way traffic flow behave in terms of improving traffic stream efficiency, increasing capacity and reducing traffic accidents. By being a new technology in the industry, there are many uncertainties associated with their behavior and performance on the roads. In Brazil, the traffic conditions are not homogeneous and the drivers are more aggressive compared to other countries. Therefore, this work aims to evaluate the impacts of autonomous vehicles in mixed traffic on a Brazilian multilane highway, by using microsimulation. Other objectives are to (i) analyze the impacts of the inclusion of autonomous vehicles in the fleet for system performance measures; (ii) evaluate the changes in the number of events that would be considered conflicts for legacy fleet that autonomous vehicles could generate, based on a surrogate safety performance measure; and (iii) estimate the penetration rate of autonomous vehicles that can bring significant benefits to highway traffic flow. The study involved a design of experiments to create scenarios with different penetration rates of autonomous vehicles in the fleet, traffic flow and automated system behavior. The behavioral parameters of the autonomous vehicles were based on the CoEXist project. The VISSIM was used to evaluate travel time, delay, speed, occupancy and lane change on the BR-290/RS. An analysis of variance (ANOVA) was performed to understand the impacts of autonomous vehicles on highway performance. Finally, an analysis of the number of events that would be considered conflicts for legacy fleet in SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) was made. The results for 100% AVs indicated a 96,1% reduction in delay, 83,7% increase in speed and 132,7% lane change and a 92% reduction in the number of events that would be considered conflicts and conflicts of rear end for legacy fleet. Regarding the performance of the traffic stream, improvements were observed from a penetration rate equal to 60% of AVs in the fleet, causing a reduction of congestion periods and na increase in traffic flow efficiency.

Key words: Autonomous vehicles. VISSIM. SSAM. Design of experiments.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura da dissertação..... | 14 |
| Figura 2 – Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS) e funções de direção automatizadas..... | 20 |
| Figura 3 – Imagem de satélite da região de estudo..... | 29 |
| Figura 4 – Perfil horário de fluxo típico do km 94 da BR-290/RS (as cores representam dias distintos) | 30 |
| Figura 5 – Modelo do trecho em estudo codificado no VISSIM | 32 |
| Figura 6 – Projeto de experimentos do trabalho..... | 37 |
| Figura 7 – Localização dos gargalos 1 a 3 no segmento de estudo | 41 |
| Figura 8 – Representação do modelo de car following de Wiedemann-99..... | 42 |
| Figura 9 – Variação dos resultados para o número de trocas de faixa conforme o modo de condução dos AVs (percentagem em relação ao cenário base)..... | 53 |
| Figura 10 – Variação dos resultados para a taxa de ocupação conforme o modo de condução dos AVs (percentagem em relação ao cenário base) | 54 |
| Figura 11 – Variação dos resultados para a velocidade conforme o modo de condução dos AVs (percentagem em relação ao cenário base)..... | 54 |
| Figura 12 – Efeitos da interação entre o volume de tráfego na rodovia e a taxa de penetração de AVs na frota..... | 56 |
| Figura 13 – Influência da taxa de penetração de AVs na capacidade do trecho de estudo | 59 |
| Figura 14 – Perfis horários de fluxo, velocidade média, taxa de ocupação e trocas de faixas das seções de análise | 60 |
| Figura 15 – Relação entre a frequência de eventos que seriam considerados conflitos para os veículos convencionais e o TTC para a seção 1 | 62 |
| Figura 16 – Relação entre o número de eventos com TTC menor do que 3,6 e o período simulado para a seção 1 | 63 |
| Figura 17 – Relação entre a frequência de eventos que seriam considerados conflitos para os veículos convencionais e o TTC para a seção 2 | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 18 – Relação entre o número de eventos com TTC menor do que 3,6 e o período simulado para a seção 2 | 65 |
| Figura 19 – Relação entre a frequência de eventos que seriam considerados conflitos para os veículos convencionais e o TTC para a seção 3 | 66 |
| Figura 20 – Relação entre o número de eventos com TTC menor do que 3,6 e o período simulado para a seção 3 | 67 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Níveis de automação dos veículos, definidos pelo padrão SAE J3016..... | 18 |
| Tabela 2 – Comportamentos dos veículos autônomos propostos pelo projeto CoEXist | 20 |
| Tabela 3 – Seções definidas para a análise das condições de tráfego na rodovia em estudo ... | 31 |
| Tabela 4 – Fatores controláveis e fator constante..... | 35 |
| Tabela 5 – Variáveis de resposta (n representa o número da seção de análise) | 37 |
| Tabela 6 – Parâmetros comportamentais dos veículos no VISSIM | 46 |
| Tabela 7 – Análise de variância (resultados dos p-valores obtidos)..... | 51 |
| Tabela 8 – Diferenças nas medidas de desempenho entre o cenário base e o cenário com uma frota de 100% AVs | 57 |
| Tabela 9 – Síntese do número de eventos com TTC menor do que 3,6 registrados com o SSAM para a seção 1 | 62 |
| Tabela 10 – Síntese do número de eventos com TTC menor do que 3,6 registrados com o SSAM para a seção 2..... | 64 |
| Tabela 11 – Síntese do número de eventos com TTC menor do que 3,6 registrados com o SSAM para a seção 3..... | 66 |

LISTA DE ABREVIATURAS

AVs – Veículos autônomos (*autonomous vehicles*)

CVs – Veículos conectados (*connected vehicles*)

CAVs – Veículos conectados e autônomos (*connected and autonomous vehicles*)

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

PE – Projeto de experimentos

RMPA – Região Metropolitana de Porto Alegre

RS – Rio Grande do Sul

SAE – Sociedade de Engenheiros Automotivos

SSAM – Surrogate Safety Assessment Model

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1 TEMA E OBJETIVOS | 11 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 11 |
| 1.3 MÉTODO | 12 |
| 1.4 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO | 13 |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO | 14 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1 VEÍCULOS AUTÔNOMOS | 16 |
| 2.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO COM VEÍCULOS AUTÔNOMOS..... | 23 |
| 3 METODOLOGIA | 28 |
| 3.1 REGIÃO DE ESTUDO | 28 |
| 3.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS..... | 33 |
| 3.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO NO VISSIM | 40 |
| 3.4 ANÁLISE DOS EVENTOS QUE SERIAM CONSIDERADOS CONFLITOS PARA A FROTA CONVENCIONAL NO SSAM..... | 47 |
| 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS | 50 |
| 4.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA..... | 50 |
| 4.2 ANÁLISE DOS EFEITOS PRINCIPAIS..... | 52 |
| 4.3 ANÁLISE DOS EFEITOS DE INTERAÇÃO | 55 |
| 4.4. INFLUÊNCIA NA CAPACIDADE | 58 |
| 4.5 NÚMERO DE EVENTOS EM QUE O TTC É MENOR DO QUE 3,6 | 61 |
| 4.5.1 Análise da seção 1..... | 62 |
| 4.5.2 Análise da seção 2..... | 63 |
| 4.5.3 Análise da seção 3..... | 65 |
| 5 COMENTÁRIOS FINAIS..... | 70 |
| REFERÊNCIAS | 73 |

1 INTRODUÇÃO

Economias e estilos de vida modernos propõem mudanças nos sistemas de transportes existentes no mundo com o uso de novas tecnologias. Veículos autônomos, também chamados de AVs (do inglês, *autonomous vehicles*), estão entre os principais desafios para a inovação no setor de transportes do século XXI (COPPOLA; SILVESTRI, 2019; PTV, 2018). Avanços tecnológicos associados à conectividade e à autonomia são capazes de mudar a maneira como os veículos se comportam, gerando potenciais benefícios ao fluxo de tráfego e à capacidade das rodovias (ATKINS, 2016). Fagnant e Kockelman (2015) e Bhavsar *et al.* (2017) completam que as características dos AVs visam a reduzir a quantidade e a severidade de acidentes, aumentar a mobilidade de pessoas com deficiência e idosos, reduzir as emissões e utilizar a infraestrutura de maneira mais eficiente.

A ascensão desses veículos demanda a avaliação do seu impacto na segurança viária e no desempenho da corrente de tráfego em rodovias e vias urbanas, uma vez que, inicialmente, a inserção de novas tecnologias tende a prejudicar a operação do tráfego, em geral. No entanto, acredita-se que essa tecnologia seja introduzida aos poucos na indústria e no mercado automobilísticos, primeiramente com veículos com menores níveis de automação até veículos totalmente autônomos (ZHU; ZHANG, 2018).

Além disso, espera-se que o índice de penetração dos AVs tenha um aumento gradativo na corrente de tráfego. Nesse período de transição, as vias estarão operando com tráfego composto por veículos convencionais e autônomos. O tráfego misto corresponde a prováveis cenários de implantação da tecnologia, na longa transição para 100% da frota de AVs (MAHMASSANI, 2016; BHAVSAR *et al.*, 2017). Dessa forma, é importante avaliar o comportamento da inserção de veículos autônomos no tráfego.

Como a maioria das tecnologias e regulamentações operacionais dos veículos autônomos ainda está em desenvolvimento, há poucos dados empíricos publicamente disponíveis sobre como eles se comportarão no fluxo de tráfego. Modelos de simulação microscópica utilizam o tempo de reação e outros comportamentos do motorista, bem como parâmetros de desempenho do veículo. Como resultado, eles fornecem uma plataforma útil para avaliar o efeito dos AVs nas operações de tráfego (STANEK *et al.*, 2017).

No contexto rodoviário brasileiro, Caleffi *et al.* (2017) destacam que o comportamento dos motoristas é considerado mais agressivo se comparado a outros países. Em se tratando da rodovia em estudo, localizada na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS (RMPA), Caleffi (2018) também ressalta que as condições de tráfego no segmento não são homogêneas, e cada faixa de tráfego normalmente possui médias de velocidades, intensidades de fluxo e composições de tráfego diferentes. Por isso, é importante analisar de que maneira a inserção de veículos autônomos poderá impactar o desempenho operacional de uma rodovia brasileira.

1.1 TEMA E OBJETIVOS

Esta dissertação versa sobre a análise dos impactos de veículos autônomos em tráfego misto rodoviário no Brasil. A avaliação será feita quantitativamente, com relação ao desempenho do fluxo de tráfego, mediante à inserção de automóveis autônomos na frota de uma rodovia com múltiplas faixas, especialmente quanto a parâmetros de operação e segurança viária.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os impactos de veículos autônomos, em tráfego misto, em uma rodovia brasileira de múltiplas faixas, utilizando simulação de tráfego. Adicionalmente, têm-se como objetivos específicos da pesquisa:

- (i) analisar os impactos da inserção de veículos autônomos no desempenho operacional dos cenários estudados;
- (ii) avaliar o provável impacto nos eventos que seriam considerados conflitos de tráfego para a frota convencional, ocasionados pela introdução de AVs, com base em uma medida de desempenho de segurança substituta (SSAM);
- (iii) estimar a percentagem de penetração de veículos autônomos que pode trazer benefícios significativos ao fluxo de tráfego para a rodovia estudada.

1.2 JUSTIFICATIVA

O surgimento e a implantação de novas tecnologias em transportes, em especial veículos autônomos, leva à necessidade de avaliar seus impactos no desempenho operacional das vias. A penetração dessa nova classe de veículos na frota deverá se dar de maneira gradual, com um período de tráfego com veículos convencionais e AVs, até chegar a uma frota com 100% de veículos autônomos. Além disso, no início de sua implantação e em todo o intervalo caracterizado como tráfego misto, os veículos deverão ser equipados com recursos

de níveis mais baixos de automação até um progressivo aumento da tecnologia (MAHMASSANI, 2016; BHAVSAR *et al.*, 2017; ZHU; ZHANG, 2018).

A literatura reporta estudos sobre impactos de veículos autônomos em rodovias estrangeiras, utilizando simulação de tráfego, como nos Estados Unidos (BIERSTEDT *et al.*, 2014; STANEK *et al.*, 2017; RODIER *et al.*, 2018) Canadá (FYFE, 2016), Reino Unido (ATKINS, 2016), Suécia (BOHM; HÄGER, 2015), Hungria (BERRADA; LEURENT, 2017), Grécia (FOUNTOULAKIS *et al.*, 2017), China (LI *et al.*, 2017; CHANG *et al.*, 2017) e Austrália (MORANDO *et al.*, 2017). Porém, o assunto ainda não fora tratado no estado da arte no Brasil.

Caleffi *et al.* (2017) estudaram o comportamento de motoristas brasileiros em rodovias, o qual é visto como sendo mais agressivo do que em outros locais do mundo. Destaca-se também a peculiaridade do tráfego típico de uma rodovia brasileira de múltiplas faixas com rampas de acesso e elevado fluxo, que apresenta características altamente heterogêneas. Isso gera diferentes desempenhos de tráfego entre as faixas da rodovia, devido a fatores como: (i) diversidade da frota de veículos, (ii) diferentes limites de velocidade para classes de veículos leves e pesados e (iii) agressividade dos condutores, provocando um elevado número de trocas de faixa e ultrapassagens (CALEFFI, 2018).

Portanto, vê-se a importância de avaliar a mudança na capacidade e nas medidas de desempenho e de segurança viária que veículos autônomos poderão provocar ao serem introduzidos na corrente de tráfego de rodovias brasileiras com múltiplas faixas. O estudo de diferentes modos de navegação do comportamento do sistema de condução autônoma e índices de penetração dos AVs na frota têm o potencial de quantificar os impactos, bem como analisar quando a inserção dessa nova tecnologia passa a trazer benefícios significativos para a operação do fluxo de veículos em geral.

1.3 MÉTODO

O método da pesquisa é de natureza aplicada, pois o estudo buscou avaliar os efeitos da inserção de veículos autônomos na corrente de tráfego de uma rodovia brasileira. Do ponto de vista da abordagem do problema, é uma pesquisa quantitativa, visto que foi realizada a análise de dados de volume, modos de condução e taxa de penetração de veículos autônomos

na rodovia, e os resultados foram traduzidos em: (i) medidas de desempenho, como velocidade, ocupação, tempo e atraso de viagem e número de troca de faixas e (ii) de segurança viária, como a análise do número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional no SSAM (Surrogate Safety Assessment Model). Quanto aos objetivos da pesquisa, é do tipo explicativa, já que teve por objetivo avaliar como e o quanto os veículos autônomos impactam o fluxo de tráfego. Por fim, no que tange os procedimentos técnicos, o trabalho é um estudo de caso de uma rodovia brasileira com múltiplas faixas, do estado do Rio Grande do Sul (BR-290/RS).

O trabalho foi desenvolvido em cinco etapas. A primeira etapa envolveu realizar uma revisão bibliográfica sobre veículos autônomos, modelos de *car following* e simulação de tráfego com AVs e veículos convencionais. A etapa 2 consistiu na definição do local e segmento de estudo, na construção dos cenários por meio de um projeto de experimentos e na codificação do modelo no software de simulação de tráfego VISSIM, incluindo os parâmetros de calibração para cada classe de veículo. Na terceira etapa foram realizadas as simulações dos diferentes cenários no VISSIM, a fim de se obter medidas de desempenho do tráfego, como: velocidade, ocupação, tempo e atraso de viagem e número de troca de faixas.

A quarta etapa visou à análise das variáveis obtidas por meio das simulações de tráfego, utilizando-se o Microsoft Excel, o Minitab e o software de análise de conflitos SSAM. Essa avaliação buscou comparar as mudanças dessas medidas no cenário sem veículos autônomos para cenários com diferentes níveis de penetração dos AVs na rodovia, modos de condução do sistema de navegação autônomo e volumes de tráfego. Por fim, a quinta etapa consistiu na discussão dos resultados obtidos, apresentando os comentários finais e as proposições para trabalhos futuros neste tema.

1.4 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

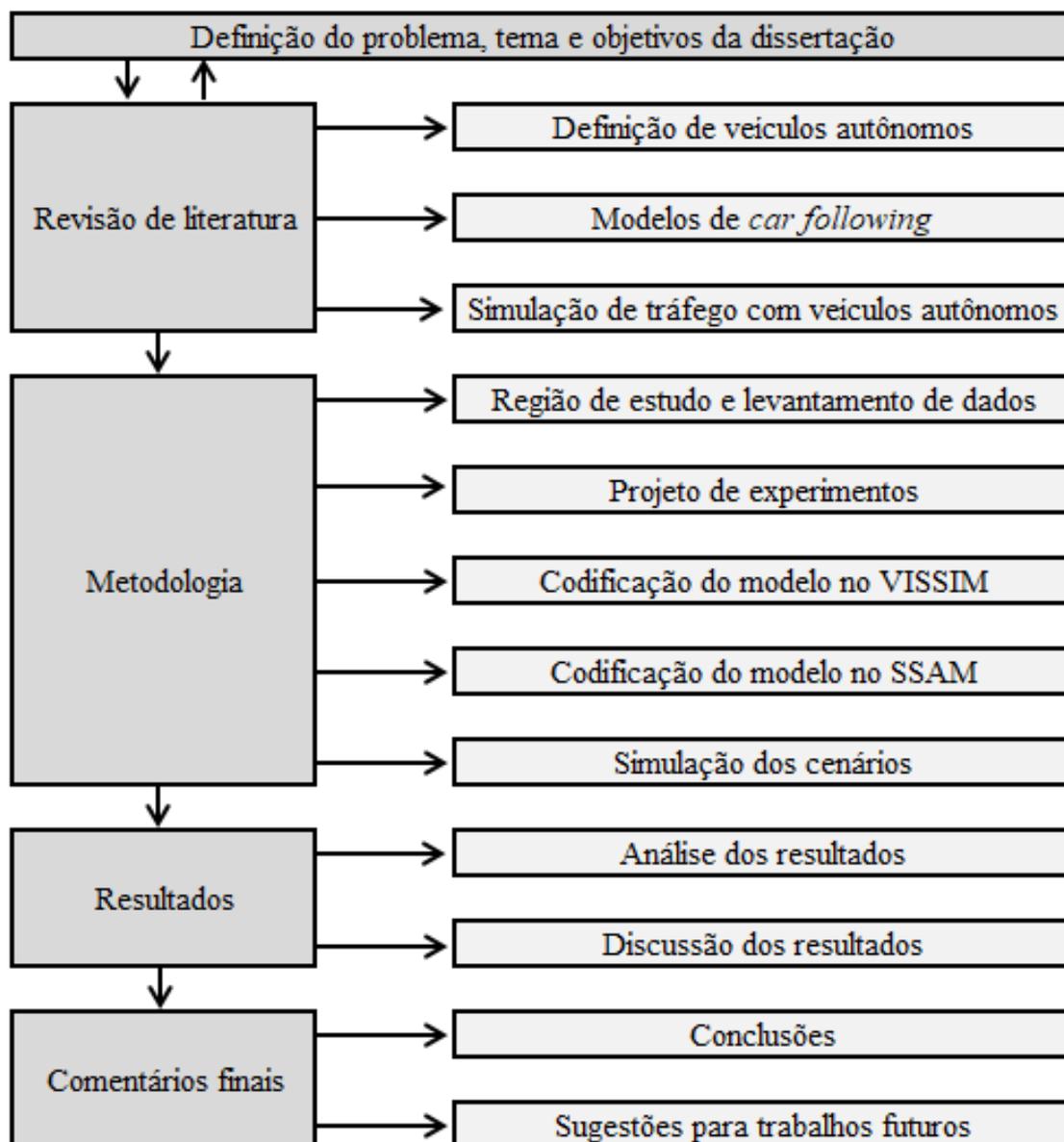
O presente trabalho limita-se a estudar a penetração de veículos autônomos com diferentes modos de condução de automação, em tráfego misto, em uma rodovia brasileira com múltiplas faixas, por meio de simulação de tráfego. O estudo considera volumes de tráfego da BR-290/RS e suas peculiaridades, como a diferença de capacidade, velocidade, fluxo e composição de tráfego entre as faixas de rolamento para um mesmo segmento. Além disso, as simulações foram feitas com base na calibração do trecho rodoviário de interesse

para este estudo. Esta pesquisa não trata do desempenho operacional de vias urbanas e rodovias de pista simples. O trabalho trata somente da inserção de automóveis autônomos na rodovia brasileira avaliada. Ainda, considera-se que os conflitos de tráfego podem ser utilizados para avaliar o potencial de ocorrer acidentes entre veículos convencionais.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. A estrutura de desenvolvimento das etapas da pesquisa está resumida na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura da dissertação



(fonte: elaborada pela autora)

O primeiro capítulo trata da introdução da dissertação, em que é feita a contextualização do assunto perante o cenário atual e os desafios futuros para os transportes, no Brasil e no mundo. Além disso, são descritos o tema e os objetivos geral e específicos do trabalho. Apresenta também a justificativa do estudo para o estado da arte e da prática. Ainda, comenta brevemente sobre o método utilizado para a análise dos dados, as delimitações do trabalho e, aqui, a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico do tema de estudo. Nele, discute-se sobre a iminência de veículos autônomos e a previsão de que a sua penetração ocorra de forma gradativa na corrente de tráfego. São apresentadas as diversas definições para os AVs, suas características e as classificações conforme os níveis de automação, bem como a diferença entre automação e conectividade. Após, apresenta-se a revisão teórica sobre os modelos de *car following*, especialmente o modelo de Wiedemann 99, utilizado no software de microsimulação de tráfego VISSIM — ferramenta de trabalho deste estudo. Por fim, é realizada a fundamentação teórica a respeito de simulações de tráfego com veículos autônomos, especialmente as que tratam de tráfego misto, com análise da operação viária.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia empregada na modelagem da rede objeto de estudo desta dissertação. O capítulo indica a região de estudo, sua caracterização e localização, além de justificar a sua escolha devido às peculiaridades da corrente de tráfego a ser estudada. Também contém a elaboração do projeto de experimentos para a criação dos cenários simulados, os parâmetros de calibração correspondentes a cada classe de veículo utilizados no modelo e, por fim, a discussão sobre o uso do software SSAM para a análise da segurança viária, quanto à quantidade de ocorrência de eventos considerados conflitos entre veículos convencionais.

O capítulo 4 contempla o estudo aplicado, em que são apresentadas as análises dos resultados obtidos com as simulações de tráfego, a comparação dos cenários e as considerações a respeito das medidas de desempenho resultantes dessas simulações. Após, o quinto capítulo apresenta os comentários finais do trabalho, a que conclusões a autora chegou com este estudo e quais suas sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Veículos autônomos (AVs) oferecem uma ampla variedade de benefícios potenciais. Um deles é o aprimoramento das operações de tráfego, como a diminuição do congestionamento e do atraso, o aumento da capacidade e um melhor uso da infraestrutura disponível, devido à maneira como se espera que eles se comportem nas vias (STANEK *et al.*, 2017). Chang *et al.* (2017) destacam que essa tecnologia tem o potencial de melhorar a eficiência, a estabilidade e a segurança do tráfego. Enquanto as barreiras vistas como as mais críticas são a aceitação de novas tecnologias e os atores sociais e legais (BOHM; HÄGER, 2015).

AVs provavelmente serão uma tecnologia cada vez mais disponível no futuro (ATKINS, 2016), em que é esperada uma transformação no conceito de veículos e suas características no mercado e na indústria automotivos. Novas Tecnologias da Informação e Comunicação (ICTs) estão estimulando o desenvolvimento de aplicações para um melhor e mais direcionado uso de veículos e da infraestrutura, a fim de otimizar o desempenho da rede de transporte (COPPOLA; SILVESTRI, 2019).

A ascensão desses novos recursos na frota de veículos leva à necessidade de avaliar a mudança de comportamento que eles podem provocar nas vias e os impactos quanto ao desempenho operacional. A fim de embasar e contextualizar o estudo, bem como caracterizar os AVs, esta seção apresenta a revisão de literatura sobre veículos autônomos, modelos de *car following* e simulação de tráfego misto.

2.1 VEÍCULOS AUTONÔMOS

Veículos autônomos são veículos equipados com recursos que auxiliam os motoristas (como câmera frontal, sensores de localização e de estacionamento, GPS, LiDAR, etc.) ou dirigem a si mesmos e têm uma velocidade de escolha automatizada. Os AVs podem dirigir parcialmente ou totalmente sem a interação humana (BOHM; HÄGER, 2015), também chamados de veículos tripulados ou não tripulados. É reconhecido que a literatura reporta múltiplas definições para veículos autônomos. A revisão regulatória detalhada do Departamento de Transportes de Londres, “O caminho para carros sem motoristas”, utiliza

duas definições amplas para descrever veículos autônomos e *self-driving* (ATKINS, 2016), são elas:

- a) altamente automatizado: um motorista deve estar presente e pode ser necessário que ele assuma o controle manual do veículo. Sob certas condições de trânsito, estrada ou clima, os sistemas de automação do veículo podem solicitar ações do motorista e que ele assuma o controle;
- b) totalmente automatizado: um motorista não é necessário, com o veículo capaz de completar com segurança as viagens em todas as condições de trânsito, estrada e clima normalmente encontradas. Permite que os ocupantes gastem seu tempo em outras atividades durante a jornada.

A referência mais citada para definir os níveis de condução de AVs foi publicada pela Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE INTERNATIONAL, 2014), classificada pelo padrão J3016. É o padrão mais comumente aceito para definir veículos autônomos, sendo adotado pela Administração Nacional de Segurança no Trânsito nas Rodovias (NHTSA), do Departamento de Transporte dos Estados Unidos, e pelas principais partes interessadas do setor automotivo.

Conforme a SAE International (2014), existem seis níveis de automação: desde o nível zero (veículos sem automação) até o nível 5 (autonomia total do veículo). Os conceitos fazem uma distinção sobre quem monitora o ambiente de direção, se o motorista humano ou o sistema de condução automatizado, e quando o condutor deve assumir o controle do veículo. Essa classificação depende da intervenção e atenção do motorista e não das capacidades do veículo. Ela pode ser descrita como:

- a) Nível 0 – sem automação: o motorista executa todas as tarefas de condução, sem qualquer assistência e recurso automatizado;
- b) Nível 1 – assistência ao motorista: o veículo é conduzido pelo motorista, mas pode incluir alguns recursos de assistência;
- c) Nível 2 – automação parcial: o veículo combina funções automatizadas, como as tarefas de aceleração, desaceleração e condução, porém o motorista deve manter o controle de todas as tarefas de direção e monitorar o ambiente de tráfego durante todo o período de condução;
- d) Nível 3 – automação condicional: o veículo pode funcionar de forma autônoma, mas o motorista deve estar pronto para assumir seu controle durante todo o percurso, conforme aviso do sistema;
- e) Nível 4 – alta automação: o veículo é capaz de executar todas as funções de direção, a certas condições de clima e tráfego, mas o motorista pode assumir o controle do veículo;

- f) Nível 5 – automação total: o veículo tem a capacidade de executar todas as tarefas de condução sob todas as condições de estrada e clima, sem a exigência de um condutor humano. O motorista pode ter a opção de controlar o veículo, se desejável.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos níveis de automação definidos pelo padrão J3016 da SAE International (2014).

Tabela 1 – Níveis de automação dos veículos, definidos pelo padrão SAE J3016

| Nível SAE | Nome | Direção, aceleração e desaceleração | Monitoramento do ambiente de condução | Reação à condição emergencial | Capacidade do sistema (modos de condução) |
|---|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---|
| <i>Motorista humano monitora o ambiente de direção</i> | | | | | |
| 0 | Sem automação | motorista humano | motorista humano | motorista humano | — |
| 1 | Assistência ao motorista | motorista humano e/ou sistema | motorista humano | motorista humano | alguns modos |
| 2 | Automação parcial | sistema | motorista humano | motorista humano | alguns modos |
| <i>Sistema de direção automatizado monitora o ambiente de direção</i> | | | | | |
| 3 | Automação condicional | sistema | sistema | motorista humano | alguns modos |
| 4 | Alta automação | sistema | sistema | sistema | alguns modos |
| 5 | Automação total | sistema | sistema | sistema | todos os modos |

(fonte: adaptada da SAE International, 2014)

A Atkins (2016) criou categorias para descrever os recursos e exigências dos veículos autônomos conforme o padrão da SAE International para fins de representação dessa tecnologia em modelos de simulações de tráfego. O Nível I (sem automação) é usado para descrever a frota base de automóveis de passageiros e veículos de transporte de mercadorias. Os parâmetros *default* do simulador são assumidos para os veículos sem alterações. O Nível II (assistência ao motorista) emprega parâmetros relacionados à oscilação de velocidade e controle do acelerador. A capacidade oferecida no Nível II também será aplicada aos veículos de Nível III e Nível IV.

O Nível III (parcial → alta automação) incorpora o comportamento longitudinal e lateral automatizado. Esse nível reconhece o papel da escolha do usuário, com alguns veículos adotando um comportamento assertivo e outros adotando um comportamento cauteloso. Isso resulta em uma mistura de recursos do veículo. O Nível IV (automação total) replica o comportamento do Nível III com uma diferença fundamental. A revisão detalhada do Departamento de Transportes de Londres, "O caminho para carros sem motorista", descreve um AV totalmente automatizado como um veículo no qual o motorista não é necessário. Nesse caso, presume-se que o motorista não tem entrada para a tarefa de condução e, como tal, o veículo irá se mover com um comportamento longitudinal e lateral melhorado (ATKINS, 2016).

Contudo, existem outras definições a serem consideradas ao se trabalhar com modelos microscópicos de tráfego, como a proposta pelo CoEXist (SUKENNIK, 2018). Este é um projeto europeu que busca preparar a fase de transição durante a qual os veículos autônomos e os convencionais coexistirão. O projeto é baseado em testes realizados em quatro cidades europeias (Helmond – Holanda, Milton Keynes – Reino Unido, Gothemburg – Suíça e Stuttgart – Alemanha), com diferentes estruturas urbanas e composições de tráfego, a fim de analisar seus efeitos na infraestrutura viária, em tráfego misto (DAHL *et al.*, 2018).

Devido à necessidade de ajustes das características dos AVs para o simulador, os conceitos de comportamentos de condução foram adaptados a partir dos testes e, embora nem todos sejam realistas, são fundamentais para fins de comparação e pesquisa. Portanto, no caso de modelos de fluxo de tráfego microscópicos, uma nova classificação foi elaborada com o objetivo de representar toda a extensão de comportamentos possíveis. Essa definição deve ser vista como independente da classificação da SAE International, sem nenhuma correspondência entre os níveis da SAE International e as lógicas de direção definidas pelo projeto (DAHL *et al.*, 2018).

O CoEXist faz uma distinção entre quatro possíveis configurações do sistema de navegação do veículo autônomo, levando em conta as preferências do usuário na escolha do comportamento. Essa classificação visa a estudar os efeitos dos AVs em rodovias, simulando as características extremas dos veículos, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Comportamentos dos veículos autônomos propostos pelo projeto CoEXist

| Comportamento | Descrição |
|------------------|---|
| <i>Rail safe</i> | Comportamento análogo ao de um trem nos trilhos, seguindo um caminho pré-definido. Não estão previstas trocas de faixa e o veículo se comporta como se estivesse trafegando em uma faixa fisicamente segregada. |
| <i>Cauteloso</i> | O veículo observa a estrada e os obstáculos e sempre adota um comportamento seguro. Mantém <i>headways</i> que permitam uma distância de parada sem que ocorra colisão. |
| <i>Normal</i> | O AV comporta-se como um motorista humano, com a capacidade adicional de medir distâncias e velocidades dos veículos ao seu redor, com sua gama de sensores. |
| <i>Agressivo</i> | Tem uma consciência profunda e capacidade de previsão, levando principalmente a falhas menores em todas as manobras e situações. Um tipo de comportamento cooperativo é esperado. |

(fonte: elaborada pela autora)

Os veículos disponíveis atualmente no mercado são, em sua grande maioria, sem automação. Entretanto, é possível encontrar automóveis de diversas marcas equipados com recursos SAE Nível 1 e 2. Chamados de Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS), esses recursos envolvem assistência ao estacionamento, controle de cruzeiro, controle de luzes adaptável e assistência à manutenção de faixas (ERTRAC, 2015), fornecendo suporte ao motorista em termos de ajuda, aviso e assistência. Porém, eles não substituem o motorista nas atividades de condução (COPPOLA; SILVESTRI, 2019). A Figura 2 apresenta com detalhes as funções disponíveis em cada sistema.

Figura 2 – Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS) e funções de direção automatizadas

| Ajuda (SAE Nível 1) | Aviso (SAE Nível 1) | Assistência (SAE Nível 2) | Automação (SAE Nível >2) |
|-----------------------------------|------------------------------------|--|---------------------------------------|
| Visão noturna automatizada | Aviso de colisão antecipado | Controle de cruzeiro | Condução em estradas |
| Sensor de chuva | Sensor de estacionamento | Assistência ao estacionamento | Condução em congestionamento |
| Câmera traseira | Aviso de saída de pista | Assistência à colisão antecipada | Pelotão de caminhões |
| Sistema de navegação por satélite | Deteção de ponto cego | Assistência à manutenção de faixas | Estacionamento autônomo |
| Controle de luzes adaptável | Monitoramento da condução | Sistema de proteção aos pedestres | Piloto automático em estradas |
| Sistema de visão 360° | Deteção de sonolência do motorista | Recomendação de velocidade inteligente | Piloto automático em congestionamento |
| Sistema de travagem anti bloqueio | Monitoramento de pressão dos pneus | Reconhecimento de semáforo | Piloto automático em vias urbanas |

(fonte: adaptada de COPPOLA; SILVESTRI, 2019)

Atualmente, poucos fabricantes de automóveis podem oferecer modelos equipados com as funções de automação SAE Nível 3. É o caso do *Tesla Autopilot*, do *Volvo Drive Me* e

do *Audi A8 Highly Automated*, lançados em 2017, e do *General Motors Super Cruise*, de 2018. No entanto, de acordo com declarações, até 2021 outras empresas passarão a oferecer seu próprio produto, como os veículos: *Volkswagen Highly Automated*, *Nissan Autonomous*, *Daimler Intelligent Drive*, *Ford Level 4 Driving* e *BMW iNext Autonomous* (ASHBY, 2018).

Com a automação da navegação veicular, os veículos têm o potencial de se tornar conectados. A difusão de dispositivos móveis para processamento e troca de informações entre usuários e o provedor de serviços torna possível a digitalização e a conexão entre sistemas de *smartphones*, sensores de localização dos veículos e telecomunicações. Os dispositivos criam uma enorme quantidade de dados (*Big Data*), que é a principal fonte para o uso da Inteligência Artificial (IA) em transportes, permitindo que os computadores realizem atividades (como dirigir) para os seres humanos (COPPOLA; SILVESTRI, 2019).

Veículos conectados (CVs) são aqueles equipados com tecnologias avançadas de comunicação que permitem a troca de informações, por meio de diferentes canais de comunicação, entre os vários elementos do sistema de transporte. Autores descrevem a conectividade futura como uma tecnologia veículo-para-todos os dispositivos (V2X), que inclui os demais recursos de comunicação (COPPOLA; SILVESTRI, 2019):

- a) veículo-a-veículo (V2V): permite realizar a troca de informações entre veículos, como alertas sobre as condições de tráfego;
- b) veículo-para-infraestrutura (V2I): promove a troca de dados entre veículos e a infraestrutura, com a qual é possível que os veículos sejam avisados sobre eventos como acidentes ou informados sobre limites de velocidade de uma área que deseja acessar;
- c) veículo-a-pessoas (V2P): possibilita a integração entre dispositivos de *smartphones* e veículos conectados, sendo útil para receber informações sobre as atividades que ocorrem nas proximidades;
- d) veículos-à-rede (V2N): inclui a troca de dados entre veículos e o Centro de Controle de Tráfego (TCC), para recebimento de informações em tempo real sobre as condições do tráfego.

Dessa maneira, veículos conectados são capazes de interagir com o ambiente ao seu redor para evitar situações perigosas que frequentemente levam a acidentes de trânsito. Além disso, a tecnologia pode ser útil para receber informações para melhorar o desempenho do tráfego e o conforto ao dirigir, por exemplo. A segurança viária poderia definitivamente se beneficiar de tais tecnologias, como também a conectividade poderia aumentar o desempenho

geral da rede de transporte por meio de harmonização de velocidade, *platooning* e outros sistemas de controle de cruzeiro adaptativos cooperativos (MAHMASSANI, 2016).

Os AVs que estão conectados e se comunicando com outros AVs no fluxo de tráfego são capazes de formar trens virtuais, o que melhoraria ainda mais a capacidade da via. A conexão com a infraestrutura também poderia melhorar a capacidade se o veículo recebesse informações antecipadas sobre fases de semáforos ou outros planos de controle de tráfego (STANEK *et al.*, 2017). Além disso, a evolução contínua nas tecnologias de computação, detecção e comunicação pode melhorar ainda mais o desempenho de veículos autônomos (BHAVSAR *et al.*, 2017).

Os impactos dos veículos autônomos, associados à maior conectividade entre veículos e sistemas, podem ser de longo alcance em vários níveis. Eles implicam mudanças para (i) o lado da demanda e do comportamento, (ii) a oferta de serviços de mobilidade e (iii) o desempenho operacional de rede e instalações. Entre eles, sobressai o impacto sobre o fluxo de tráfego e operações, especialmente em situações de tráfego misto — em que veículos autônomos compartilham a via com veículos sem automação e com veículos conectados, que também podem ter algumas funções automatizadas. Essas situações de tráfego misto correspondem a prováveis cenários de implantação das tecnologias, especialmente na longa transição para 100% da frota composta por veículos autônomos (MAHMASSANI, 2016).

Ainda não está claro quais serão os requisitos essenciais para incluir a conectividade no sistema, especialmente quanto à tecnologia veículo-para-infraestrutura e se esta é realmente necessária. Isso se justifica uma vez que os AVs completamente independentes da infraestrutura (sem conectividade V2I) poderão se adaptar ao contexto da via existente graças às tecnologias embarcadas, como câmeras, sistemas de detecção e variação de luz (LiDAR), sensores de localização e sensores de mapas digitais. No entanto, a comunidade científica parece mais interessada em desenvolver veículos que exigem um diálogo contínuo com os outros elementos do sistema (veículos, pedestres, ciclistas e infraestrutura) para se orientarem no ambiente de condução, ou seja, veículos conectados e autônomos (CAVs) (COPPOLA; SILVESTRI, 2019).

Sob outra perspectiva, veículos autônomos sem recursos de conectividade exigem menos complexidade organizacional, menos investimento em digitalização de infraestrutura e fornecem mais segurança cibernética, pois as possibilidades de *hackers* são reduzidas.

Também, a nova combinação de tecnologias de comunicação automotiva e eletrônica autônoma apresentará novos desafios, como a interação com outros veículos não autônomos (POLIS, 2018; BHAVSAR *et al.*, 2017).

Contudo, os CAVs são vistos como meios para um ambiente de condução mais seguro (POLIS, 2018), em se tratando de questões operacionais da rodovia. Quando a alta automação for padronizada, as tecnologias veículo-a-veículo (V2V), veículo-para-infraestrutura (V2I) e veículo-a-pessoas (V2P) também devem estar disponíveis (COPPOLA; SILVESTRI, 2019).

Embora os veículos autônomos contem com ligeiras diferenças nos sistemas de automação, dependendo da lógica de condução, espera-se que operem com menores *headways*, tempos de reação mais curtos, velocidades mais altas e de forma mais cooperativa do que os convencionais (STANEK *et al.*, 2017). Com o uso mais eficiente do espaço viário disponível, os benefícios podem ser alcançados para o usuário e para o operador, em termos de confiabilidade, menor tempo de viagem e atraso (ATKINS, 2016).

Entretanto, é reconhecido que os veículos autônomos podem não exibir um comportamento aprimorado em todos os aspectos da operação, já que variam conforme a configuração e as exigências de segurança. Assim, os impactos provavelmente dependem da preferência do usuário. Além disso, tensões em torno da confiança na tecnologia e o equilíbrio entre segurança, conforto e desempenho da rede podem resultar em uma combinação de diferentes capacidades do veículo (ATKINS, 2016). Também há fatores externos que podem comprometer os impactos dos AVs na rede de transportes, como a aceitação do usuário, a tecnologia empregada no sistema e discussões sobre leis e regulamentos dessa nova classe de veículos (BOHM; HÄGER, 2015).

2.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO COM VEÍCULOS AUTÔNOMOS

A introdução de veículos conectados e autônomos promete reduzir a demanda de espaço nas rodovias e melhorar os fluxos e a segurança do tráfego. Nesse sentido, um planejamento adaptado de transporte e da infraestrutura está se tornando obrigatório para absorver a demanda por essa nova tecnologia. Além disso, a disponibilidade de um software de simulação adaptado é necessária, bem como a inclusão de novos recursos que facilitem a simulação e modelagem (DAHL *et al.*, 2018).

Como a maioria das tecnologias e regulamentações operacionais dos AVs ainda está em desenvolvimento, há poucos dados empíricos publicamente disponíveis sobre como eles se comportarão no fluxo de tráfego. Modelos de simulação microscópica utilizam comportamentos do motorista e parâmetros de desempenho do veículo para avaliar seu efeito nas operações de tráfego (RODIER, *et al.*, 2018; STANEK *et al.*, 2017), como o VISSIM. Este fornece dois modelos de *car following* psicofísicos desenvolvidos por Wiedemann, considerando deficiências humanas na percepção de velocidade e distância e na operação do veículo (SUKENNIK, 2018).

Atkins (2016) e Sukennik (2018) destacam a importância do estudo de veículos autônomos, visto que estes criarão um desafio para o transporte e operadores no futuro. Protótipos estão sendo testados em grandes cidades ao redor do mundo, e é esperado que metade de todos os veículos sejam totalmente autônomos nas próximas décadas. Ainda, o comportamento de condução dos AVs será diferente dos veículos convencionais. A curto e médio prazo eles serão obrigados a interagir no mesmo espaço viário.

Quanto à segurança viária, espera-se que os veículos autônomos possam reduzir os eventos que convertam em acidentes de trânsito, já que a maioria dos acidentes está relacionada a erros humanos, como fadiga, consumo de álcool ou drogas etc. Entretanto, pouca pesquisa foi conduzida para estimar os impactos na segurança viária com AVs. Nesse caso, esses impactos podem ser explorados por meio da análise do número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional, a partir de dados de trajetória extraídos do microssimulador de tráfego VISSIM, utilizando o SSAM (MORANDO *et al.*, 2017). Os resultados mostram que a combinação de VISSIM e SSAM fornece uma ferramenta apropriada para a avaliação de alterações no nível de segurança das aplicações de veículos conectados (FYFE, 2008).

Este tema vem sendo bastante investigado e diferentes estudos existem em todo o mundo. Porém, não existe uma padronização na representação da automação veicular. Quanto aos eventos considerados conflitos para a frota convencional, os resultados dos estudos de Morando *et al.* (2017; 2018) em interseções da Austrália sugerem que os AVs melhoram significativamente a segurança com altas taxas de penetração destes na corrente de tráfego, mesmo quando trafegam com *headways* menores para aumentar a capacidade da via e reduzir o atraso de viagem. A análise de uma interseção semaforizada apresentou uma redução de

20% a 65% no número de eventos considerados conflitos para veículos convencionais, para taxas de penetração de 50% a 100%, respectivamente. Quanto ao estudo de eventos de conflitos em uma rotatória, houve uma redução de 64% no número de eventos considerando uma frota composta exclusivamente por veículos autônomos.

O estudo de Fagnant e Kockelman (2015) estimou que, com uma penetração de 90% de veículos autônomos na corrente de tráfego, os AVs poderiam reduzir mais de 4 milhões de acidentes e salvar mais de 21.000 vidas por ano. Papadoulis *et al.* (2019) também avaliaram os impactos para a segurança viária da inserção de diferentes taxas de penetração de AVs em uma autoestrada na Inglaterra. Os eventos considerados conflitos para a frota convencional foram reduzidos em 12-47%, 50-80%, 82-92% e 90-94% para taxas de penetração de 25%, 50%, 75% e 100% de CAVs, respectivamente. Os resultados indicam que a presença de CAVs proporcionou um fluxo de tráfego mais eficiente. Também ficou claro que estes garantiram maior confiabilidade nos tempos de viagem, independentemente das condições do tráfego.

Rahman *et al.* (2018) avaliaram os impactos da implantação de veículos conectados em rodovias em condições de neblina para dois tipos de abordagens: veículos conectados sem platooning (CVWPL) e veículos conectados com platooning (CVPL). Os resultados mostraram que ambos melhoraram significativamente a segurança em condições de neblina à medida que as taxas de penetração aumentaram. Conforme resultados do estudo, a taxa mínima de penetração deve ser de 30% para fornecer benefícios significativos à segurança. Em termos de medidas substitutas de segurança, o CVPL superou significativamente o CVWPL quando as taxas de penetração foram iguais ou superiores a 50%. Os resultados também indicaram uma melhora significativa nas características da operação de tráfego em termos de velocidade média.

Rahman *et al.* (2019) realizaram estudos de interseções em vias urbanas mediante a simulações de tráfego. Os resultados sugerem que veículos conectados e CVLLA (veículos conectados com automação de nível inferior) reduziram significativamente o risco de eventos que seriam considerados conflitos para veículos convencionais do segmento avaliado, com base em cinco medidas de segurança substitutas, em comparação ao cenário base. Em termos de redução do risco de ocorrerem tais eventos, o CVLLA supera significativamente o CV quando as taxas de penetração são iguais ou maiores do que 60%. Assim, os resultados

indicam uma melhoria significativa da segurança quando da implementação das tecnologias CV e CVLLA nas duas interseções avaliadas.

Simulações de tráfego para avaliar os efeitos da inserção de veículos autônomos quanto ao desempenho operacional da corrente de tráfego também apresentam resultados significativos. Estudos nos Estados Unidos reportam que a partir 30% de penetração de veículos autônomos na frota de veículos convencionais ocorre uma redução substancial no atraso de viagem. Ainda, uma inserção de apenas 5% de AVs na frota poderia eliminar as típicas ondas de choque criadas por motoristas humanos (STANEK *et al.*, 2017).

Em Atkins (2016) as principais medidas de desempenho da rede, como tempo e atraso de viagem, demonstraram melhorar com o aumento da penetração e dos recursos dos CAVs. Os resultados mostraram uma melhoria potencial de mais de 40% no atraso e de 54,7% no tempo de viagem, assumindo 100% de penetração de AVs assertivos (agressivos) em rodovias. Há uma melhora associada ao tempo médio de viagem e à variabilidade dessa medida. A melhoria na confiabilidade é particularmente alta e é improvável que seja vista em todas as situações. Com AVs representando cerca de 25% da frota de veículos nas rodovias, por exemplo, os benefícios são insignificantes. No entanto, testar cenários com AVs em um modelo de baixa demanda, caracterizado por período com baixo congestionamento e velocidades médias mais altas, demonstrou uma melhora na confiabilidade do tempo de viagem de cerca de 30%, o que corroborou amplamente para essa conclusão.

Bohm e Häger (2015) realizaram estudos em redes viárias suecas, em hora-pico. Concluíram que a implantação de veículos autônomos melhora as medidas de capacidade viária. Os resultados apontam que o atraso e o número de paradas diminuíram em 56% e 54%, respectivamente, e a velocidade aumentou em 34% com a inserção de AVs na frota de veículos. Além disso, os autores realizaram simulações para um baixo fluxo de veículos, resultando em uma redução do atraso e da velocidade de 1,3% e 0,38%, respectivamente; e uma melhoria do número de paradas de 2,9%. Observa-se que os resultados para o baixo fluxo de veículos não apresentam grandes diferenças quanto para o alto fluxo. Esse padrão se repete inclusive nos resultados dos cálculos de emissões e consumo de combustível.

Os resultados de Atkins (2016), Rahman *et al.* (2018) e Rahman *et al.* (2019) sugerem que uma alta penetração de AVs é necessária para alcançar benefícios significativos. Morando *et al.* (2017) corroboram com esse resultado, ressaltando que uma implicação dessas

descobertas é que uma alta taxa de penetração de AVs pode ser necessária para entregar benefícios de segurança antecipados desses veículos. Atkins (2016) sugere que isso pode estar entre 50% e 75% de penetração de CAVs. Os resultados para o modelo de uma rede rodoviária com acessos indicam melhorias no atraso de 7% para uma penetração de 50% dos CAVs, aumentando de 17% para 75% de penetração e chegando a 40% para uma frota de veículos totalmente autônoma. Enquanto Stanek *et al.* (2017) e Papadoulis *et al.* (2019) consideram que os potenciais impactos possam ser observados em níveis mais baixos de penetração de AVs na corrente de tráfego.

Por fim, Sagir e Ukkusuri (2018) avaliaram os impactos de diferentes níveis de automação definidos pela SAE International (2014) em relação às medidas de desempenho do tráfego, como perfil de aceleração, perfil de velocidade e número de mudanças de faixa. Os resultados indicam que AVs do SAE Nível 1 promovem mais eficiência ao fluxo de tráfego quando comparados aos do SAE Nível 0, porque os primeiros possuem aceleração e velocidades consistentemente mais altas para determinadas condições de tráfego. O Nível 2 da SAE fornece mais estabilidade lateral e, portanto, menos acidentes implícitos do que os Níveis 1 ou 0, devido a desvios laterais mais baixos. Para o Nível 3, a principal consideração é modelar a transição entre o controle humano e o controle do sistema. No Nível 4 da SAE, foi modelada a operação de veículos autônomos no Domínio de Projeto Operacional (ODD) e a transição para condições mínimas de risco fora do ODD. O Nível 5 da SAE supera o impacto dessas transições e, portanto, apresenta medidas de tráfego mais eficientes do que os níveis mais baixos da SAE.

3 METODOLOGIA

Este trabalho trata da análise das operações de tráfego envolvendo veículos autônomos e convencionais em uma rodovia com múltiplas faixas no Brasil, e busca avaliar os impactos da inserção dessa nova tecnologia em transportes.

A metodologia utilizada segue a estrutura listada: (i) compreensão do local, definição do segmento de estudo e levantamento de dados; (ii) definição de um projeto de experimentos para a geração dos cenários a serem estudados; (iii) codificação do modelo no VISSIM e inserção dos parâmetros comportamentais conforme as classes de veículos; (iv) simulações de tráfego e extração das variáveis com as medidas de desempenho avaliadas; e (v) análise dos resultados das simulações e comparação dos diferentes cenários estudados, com o auxílio do Microsoft Excel, Minitab e SSAM.

O estudo envolveu, primeiramente, a avaliação do local e a definição do trecho, bem como a obtenção dos dados de tráfego da rodovia. Após, foi realizada a definição dos cenários a serem estudados a partir da construção de um projeto de experimentos, para diferentes percentuais de penetração de AVs na corrente de tráfego, diversos valores de volume de tráfego na via e duas escolhas de modos de comportamento de condução do sistema de navegação dos veículos autônomos. O projeto garante rigor estatístico quanto à comparação entre as variáveis resultantes das simulações de tráfego.

A partir do planejamento dos cenários a serem estudados, foi possível realizar as simulações de tráfego no software VISSIM. As medidas de desempenho a serem avaliadas foram extraídas do simulador, são elas: velocidade, ocupação, tempo de viagem, atraso de viagem, número de troca de faixas e trajetória dos veículos. Também foi realizada a análise de da segurança viária, quanto à ocorrência de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional, com o uso do SSAM. Os tópicos a seguir apresentam em detalhes o método utilizado.

3.1 REGIÃO DE ESTUDO

O trecho em estudo compreende um segmento da rodovia BR-290/RS e a Avenida Castelo Branco, na região metropolitana de Porto Alegre, totalizando cerca de 6 quilômetros

de extensão. A rodovia liga as principais vias e regiões do estado. Também é a principal ligação entre a capital (Porto Alegre) e as demais cidades do entorno, em que se destacam os movimentos diários pendulares, especialmente pelo setor de serviços. O segmento tem início na intersecção da BR-290/RS com a BR-448/RS e se estende até a entrada de Porto Alegre, incluindo o vão móvel da Ponte do Guaíba, como apresentado na Figura 3.

A localização foi selecionada devido à presença de laços indutivos e câmeras de monitoramento para a obtenção de dados de tráfego, à existência de rampas de acesso e de congestionamento. Foi estudado o sentido da via interior-capital, em que é observada uma concentração de fluxo de veículos maior durante a manhã. A região apresenta diariamente congestionamentos relacionados aos gargalos existentes nas aproximações da capital e ao içamento do vão móvel da Ponte do Guaíba, bem como ao alto volume de viagens entre as cidades da região metropolitana.

Figura 3 – Imagem de satélite da região de estudo

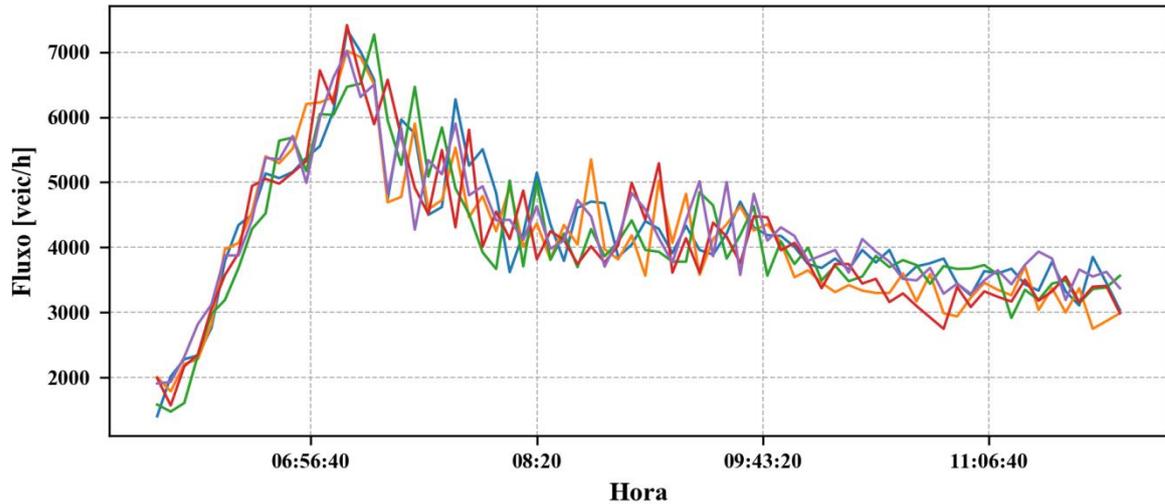


(fonte: adaptada de ZECHIN, 2019)

Os dados de tráfego utilizados neste trabalho foram disponibilizados pela empresa Triunfo Concepa, concessionária que operava o trecho da rodovia no período de estudo. O perfil de volume de dias típicos da BR-290/RS é composto por dois picos bem definidos, um maior no início da manhã e outro no final do dia. A Figura 4 ilustra o perfil de fluxo da manhã

de alguns dias típicos, no qual as cores representam dias distintos de coleta de dados de tráfego. Os dados foram coletados de laços indutivos presentes no km 94 da rodovia e a demanda máxima supera o valor de 7.700 veíc/h.

Figura 4 – Perfil horário de fluxo típico do km 94 da BR-290/RS (as cores representam dias distintos)



(fonte: ZECHIN, 2019)

As informações concedidas correspondem a um período de dois anos de dados de tráfego desagregados (2016 e 2017), coletados a partir de laços indutivos presentes no km 94 da rodovia BR-290. Os dados contêm data e horário de passagem de cada veículo, além de velocidade, comprimento e classificação do veículo (entre leve e pesado), e em qual faixa de rolamento o veículo foi identificado.

A rodovia possui cinco faixas de tráfego no local dos detectores, localizados 200 metros a montante de uma bifurcação e a 5 km do centro de Porto Alegre. As 2 faixas à direita formam o acesso à Ponte do Guaíba e uma saída lateral, que é frequentemente utilizada como um desvio em períodos de congestionamento. Enquanto isso, as 3 faixas à esquerda passam a se chamar Avenida Castello Branco e seguem em direção ao centro de Porto Alegre. Existem três acessos à rodovia: um é a alça de acesso à ponte e os demais se encontram distantes a 1,1 e 1,4 km, na Avenida Castello Branco. Por essa razão, foram criadas três seções de análise com características de fluxo de tráfego distintas, representando parte do segmento em estudo, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Seções definidas para a análise das condições de tráfego na rodovia em estudo

| Seção | Característica | Localização |
|--------------|-----------------------------|---|
| S1 | Divergência de fluxo | Início da alça de acesso à ponte |
| S2 | Duas convergências de fluxo | Saída do fluxo da ponte para a rodovia BR-290 e via de acesso local |
| S3 | Fluxo homogêneo | Trecho sem alterações de tráfego, antes do acesso a POA |

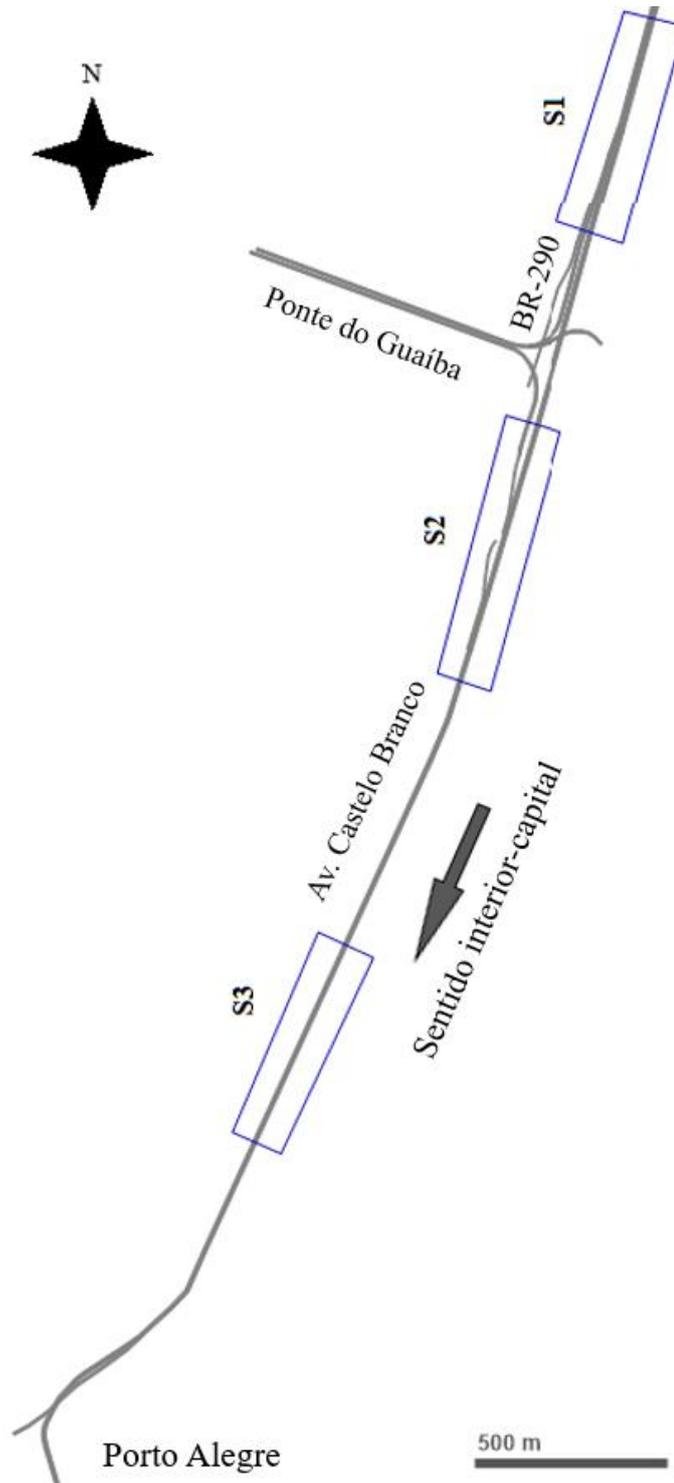
(fonte: elaborada pela autora)

A primeira seção busca contemplar as características de tráfego de uma região com bifurcação da rodovia e separação do fluxo de tráfego, incluindo movimentos como mudanças de faixas. A segunda seção contempla a convergência de fluxo de duas rampas de acesso à rodovia, uma delas contendo um alto volume de tráfego advindo da Ponte do Guaíba. A seção 3 foi selecionada para avaliar as medidas do fluxo de tráfego homogêneo da via, uma vez que nessa região a Avenida Castelo Branco não apresenta acessos, saídas ou gargalos. A Figura 5 ilustra a localização das seções no segmento em estudo.

O período de simulação foi escolhido a partir do perfil de fluxo da rodovia a fim de selecionar um intervalo adequado para as análises. O espaço de tempo total compreendeu 3h45min de simulação, a partir das 6h até as 9h45min, considerando 2h30min de hora-pico, em que foram observados congestionamentos. Dessa forma, foi possível desconsiderar os períodos de *warming up* e *cold down* da análise de resultados. O perfil de fluxo simulado corresponde a um padrão típico de volume no sentido interior-capital no período de pico da manhã.

Além disso, os dados utilizados para a construção do perfil de demanda da rodovia são apenas os dias do meio da semana, a fim de representar o fluxo de tráfego típico da região. O volume de tráfego durante o fim de semana foi descartado, pois se deve a viagens realizadas para o litoral do estado, em sua maioria (CALEFFI, 2018). Dos dias selecionados, foram removidos demais períodos em que se observou mal funcionamento dos detectores, isto é, cerca de 20% do período de análise.

Figura 5 – Modelo do trecho em estudo codificado no VISSIM



(fonte: elaborada pela autora)

Ressalta-se que as condições de tráfego no trecho em estudo contêm particularidades típicas da rodovia estudada. Assim sendo, as características das faixas não são homogêneas, e cada uma delas tem intensidades de fluxo, médias de velocidades e composição de tráfego

diferentes. A faixa da esquerda possui velocidades e fluxos mais altos do que as demais. Em contrapartida, a faixa direta apresenta velocidades e taxas de fluxo bem menores, uma vez que contém um tráfego mais intenso de veículos pesados, com desempenhos menores (e limites permitidos de velocidade menores) em relação aos veículos leves (CALEFFI, 2018).

3.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS

O trabalho foi desenvolvido a partir de um projeto de experimentos, que definiu o conjunto de cenários estudados. Projeto de experimentos (PE) é uma metodologia utilizada para realizar o planejamento, a execução e a análise de um experimento de forma otimizada, exigindo-se o mínimo de recursos. Este permite a estruturação eficiente de uma sequência de ensaios e, assim, seus resultados são superiores em termos de informações a qualquer experimento não estruturado (MONTGOMERY, 1991).

Para fins de melhor compreensão dos procedimentos metodológicos aplicados neste trabalho, são feitas as seguintes definições (HAIR, 2009; MONTGOMERY, 1991):

- a) características de qualidade: são todas as características julgadas importantes; indicadores de desempenho utilizados para avaliar um sistema;
- b) parâmetros do processo: todas as variáveis que podem ser alteradas e que talvez modifiquem o funcionamento do sistema e o resultado de seus indicadores (isto é, podem ter um efeito sobre as variáveis de resposta);
- c) fatores controláveis: um subconjunto dos parâmetros do processo; são variáveis que podem ser alteradas de maneira controlada em um experimento para observar seu impacto nos indicadores do sistema. Também chamados de variáveis independentes, podem ser quantitativas ou qualitativas;
- d) fatores constantes: outro subconjunto dos parâmetros do processo que devem ser mantidos constantes durante toda a execução do experimento, pois não é desejável estudar a alteração de seus valores;
- e) fatores de ruído: completam o conjunto de parâmetros do processo. São variáveis desconhecidas, difíceis ou caras de serem controladas durante os experimentos, que podem influenciar no desempenho do sistema. Responsáveis pelo erro experimental, são variáveis de blocagem;
- f) erro experimental: também chamado de variabilidade residual ou variância do erro. É responsável por produzir alterações nos resultados do experimento. Pode ser minimizado pelo bom planejamento e controle dos ensaios;
- g) blocos: grupos de ensaios que são tratados de forma similar em um projeto de experimentos. São definidos pelas variáveis de blocagem e buscam reduzir o erro experimental;

- h) variáveis de resposta: são características que podem ser observadas ou medidas em um experimento, e permitem quantificar as características de qualidade ou medidas de desempenho do sistema. É a saída do experimento e deve ser uma variável quantitativa, também chamada de variável dependente;
- i) nível: é um valor específico de um fator controlável selecionado para o estudo. Um fator controlável é composto por diversos níveis (valores fixos); cada nível representa uma condição ou característica diferente que afeta as variáveis de resposta;
- j) efeito: é a mudança no valor da variável de resposta que ocorre com a alteração dos níveis dos fatores controláveis; o efeito pode ser principal ou de interação entre dois ou mais fatores;
- k) grupos: são as diferentes combinações geradas com cada nível de cada fator controlável; também chamados de tratamentos, são os ensaios/cenários a serem estudados.

Dessa forma, o PE pode ser entendido como um plano de pesquisa que busca avaliar o estudo sistêmico de diversos fatores que possam afetar características da qualidade do serviço. Ao organizar um projeto, o pesquisador tem controle direto sobre os fatores controláveis e constantes identificados no ensaio e avalia seu efeito sobre as métricas que deseja conhecer (variáveis de resposta). Ele permite especificar os parâmetros do processo com maior precisão estatística, e os resultados contêm respaldo científico (HAIR, 2009). Além disso, o método busca reduzir fatores de ruído que possam inflacionar a variabilidade do erro, tornando o experimento pouco sensível para a identificação de efeitos dos fatores significativos (MONTGOMERY, 1991).

Ao planejar um experimento, o primeiro passo envolve a avaliação de todos os parâmetros do processo que possam ter seus valores escolhidos e que, talvez, tenham efeito sobre as variáveis de resposta. Os parâmetros devem ser separados entre: (i) fatores controláveis, (ii) fatores constantes e (iii) fatores de ruído. A definição dos fatores controláveis compreende a determinação dos níveis, projetados pelo pesquisador e administrados no decorrer do experimento (HAIR, 2009). Fatores constantes e fatores de ruído devem ser identificados e mantidos constantes para reduzir a variabilidade do erro. Os grupos são construídos por meio de combinações dos níveis dos fatores controláveis com o auxílio de um software de planejamento estatístico (MONTGOMERY, 1991).

Para este trabalho foram selecionados três fatores controláveis, a fim de entender seus efeitos nas medidas de desempenho da operação de tráfego. São eles: (i) taxa de penetração de veículos autônomos na rodovia (“Taxa de penetração de AVs”); (ii) modo de condução do

comportamento do sistema de navegação do veículo autônomo (“Modo de condução”); e (iii) volume de tráfego máximo na via em relação ao volume observado (“% Volume máximo”). O fator que relaciona a variabilidade das simulações no VISSIM foi definido como fator constante (bloco), uma vez que essa aleatoriedade deve ser mantida constante entre os grupos para não interferir na análise dos efeitos dos fatores controláveis. A Tabela 4 apresenta os fatores controláveis e o fator constante, bem como seus respectivos níveis com os valores definidos para cada um. A partir dessas escolhas, foi possível definir os grupos e a sequência de ensaios dos cenários no simulador.

Tabela 4 – Fatores controláveis e fator constante

| Fator controlável | Abreviação | Níveis | Descrição dos níveis | Tipo de variável |
|---------------------------|-------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|
| Taxa de penetração de AVs | Pen_AV | 6 | 0%, 20%; 40%; 60%; 80%; 100% | Contínua |
| Modo de condução | AV_alto | 2 | Normal, Agressivo | Discreta |
| % Volume máximo | Volume | 5 | 20%; 40%; 60%; 80%; 100% | Contínua |
| Semente aleatória | Bloco | 4 | 40; 41; 42; 43 | Discreta |

(fonte: elaborada pela autora)

O fator constante “Semente aleatória” foi bloqueado no projeto para diminuir a variabilidade dentro do grupo e, assim, reduzir o termo do erro. Ele contém quatro níveis e indica que cada grupo foi simulado quatro vezes, de forma randômica, para representar a aleatoriedade do que ocorre na prática do fluxo na rodovia. Semente aleatória é a propriedade que permite replicar a natureza estocástica do fluxo de tráfego e suas variações temporais, alterando o padrão de entrada de veículos na simulação e o seu comportamento (PTV, 2018). Quanto a este fator constante, Hair (2009) destaca que criação de um fator adicional para a redução do erro de medição, embora exija esforço, tempo e recursos, pode melhorar os resultados marginais e fortalecer a análise de diferenças significativas dos ensaios.

O fator “Modo de condução” representa a seleção do modo de condução quanto à navegação do sistema do veículo autônomo. Essa variável depende da escolha do usuário e define o comportamento de direção do veículo. Este estudo contemplou apenas dois níveis de comportamento com base nas definições do projeto CoEXist: “Normal” e “Agressivo”, os quais representam de forma mais realista as escolhas dos usuários brasileiros para o sistema

de navegação. Os comportamentos “*Rail safe*” e “Cauteloso” foram desconsiderados, uma vez que suas características excessivamente cautelosas geraram longas filas, não observadas no cenário real, e não condizentes com o perfil dos motoristas brasileiros. Esse fator indica o comportamento predominante de escolha para a navegação dos veículos autônomos, com uma proporção de 2:1. Por exemplo, quando o nível do “Modo de condução” é “Normal”, 66% dos AVs têm comportamento normal e 34%, agressivo — o inverso ocorre para o nível “Agressivo”.

O fator “% Volume máximo” refere-se à percentagem do fluxo de veículos máximo na rodovia em relação ao volume observado atualmente. O fator foi criado a partir do perfil de demanda da BR/290-RS no período de pico da manhã e considerou o valor do máximo volume observado em dias típicos, o qual provoca congestionamentos na rodovia. Tem cinco níveis, com valores variando entre 20% e 100% do pico de volume coletado, a fim de representar diferentes características e condições de fluxo de tráfego na via em análise.

Por fim, o fator controlável “Taxa de penetração de AVs” diz respeito à percentagem de veículos autônomos introduzidos no fluxo de veículos total, em relação aos veículos convencionais. Esse fator é composto por seis níveis: o nível baixo corresponde ao cenário base, em que não há veículos autônomos percorrendo o trecho em estudo; o nível alto corresponde a um cenário com toda a frota de veículos composta por AVs. Os níveis intermediários consideram um fluxo de veículos composto por tráfego misto.

Foram escolhidas um total de seis variáveis de resposta para a avaliação dos efeitos dos fatores acima citados nos indicadores de desempenho da rodovia, são elas: tempo de viagem, atraso de viagem, velocidade média, taxa de ocupação, número de mudanças de faixas e número de mudanças de faixas no período de máximo volume de tráfego na via (30 minutos). O tempo e o atraso de viagem foram avaliados para o trecho completo, a fim de verificar a contribuição da inserção de veículos autônomos para a corrente de tráfego geral em todo o segmento em estudo. Enquanto as demais variáveis foram medidas nas três seções com características e condições de tráfego distintas, para analisar as mudanças nos efeitos em diferentes seções. A Tabela 5 apresenta as variáveis de resposta, juntamente com o local da coleta e avaliação das medidas de desempenho, sua abreviação e unidade.

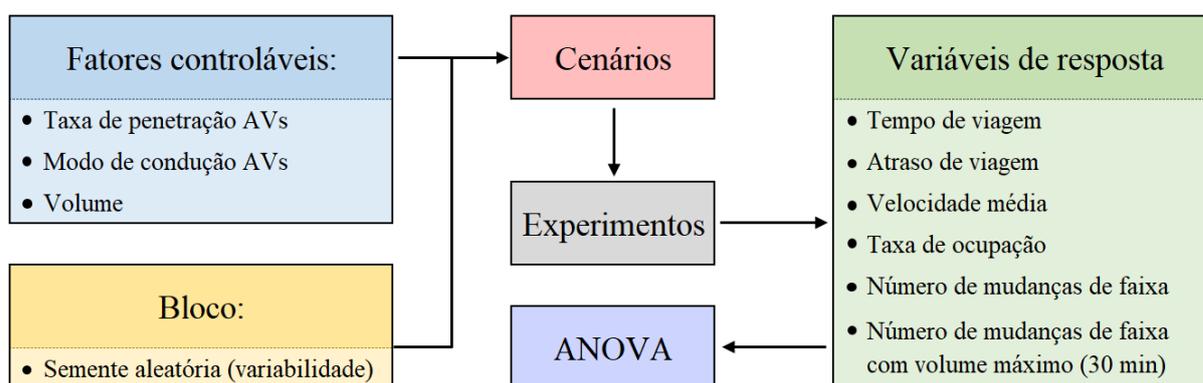
Tabela 5 – Variáveis de resposta (n representa o número da seção de análise)

| Variáveis de resposta | Seção de análise | Abreviação | Unidade |
|--|------------------|------------|---------|
| Tempo de viagem | Trecho completo | T_viagem | s |
| Atraso de viagem | Trecho completo | Delay | s |
| Velocidade média | Seções | Vel_n | km/h |
| Taxa de ocupação | Seções | Ocup_n | - |
| Número de mudanças de faixa | Seções | TF_n | - |
| Número de mudanças de faixa no pico de volume (30 min) | Seções | TFp_n | - |

(fonte: elaborada pela autora)

Em posse dessas definições e da composição dos grupos, é possível executar o experimento e realizar a análise estatística. Nesta dissertação, os ensaios são chamados de cenários e foram executados no simulador de tráfego VISSIM. O software permitiu a coleta das medidas de desempenho selecionadas como variáveis de resposta. Já a análise dos efeitos dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta foi realizada por ANOVA (análise de variância), com o auxílio do software Minitab. A Figura 6 apresenta um esquema-resumo do projeto de experimentos deste trabalho.

Figura 6 – Projeto de experimentos do trabalho



(fonte: elaborada pela autora)

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística de análise multivariada para projeto de experimentos, em que a replicação de ensaios é o principal meio de validação. A especificidade dos grupos permite o uso generalizado do mesmo experimento em várias populações para avaliar a generalização dos resultados. Por meio da ANOVA é possível

avaliar a significância estatística das diferenças entre grupos de diversos fatores controláveis e o efeito de suas interações em uma única análise. Para tanto, devem ser consideradas as seguintes premissas: existe uma distribuição normal do efeito do conjunto das variáveis de resposta, a homogeneidade dos grupos (aleatoriedade dos erros) e a independência estatística dos fatores controláveis (ortogonalidade). Não respeitar essas restrições afeta severamente a validade estatística da análise (HAIR, 2009).

A vantagem da análise multivariada é reconhecida quando ela avalia tanto o impacto coletivo dos fatores controláveis, como também a contribuição de cada fator separadamente para as mudanças nas variáveis de resposta. Além disso, a diferença do efeito entre os grupos de um fator controlável varia dependendo do nível dos demais fatores, ressaltando que a combinação de diversos níveis proporciona diferentes respostas (HAIR, 2009).

A análise de dois ou mais fatores controláveis é chamada de planejamento fatorial. Em geral, um projeto com n fatores controláveis é chamado de projeto fatorial n -way-ANOVA. Para a análise de variância, parte-se das seguintes hipóteses, que devem ser respondidas ao final da análise estatística (MONTGOMERY, 1991):

- (i) H_0 : não há diferenças significativas entre os grupos;
- (ii) H_1 : há diferenças significativas entre os grupos, provocada pelo fator controlável investigado.

As hipóteses buscam responder se os grupos, isto é, a combinação de diferentes níveis dos fatores controláveis provoca mudanças nas variáveis de resposta, as quais são as medidas de desempenho que desejam ser avaliadas no sistema. A variável de resposta pode ser explicada por esses fatores controláveis, como apresentado na Equação 1 (HAIR, 2009).

$$Y_1 = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n \quad (1)$$

Onde Y_1 é a variável de resposta e X são os fatores controláveis.

O modelo estatístico (MONTGOMERY, 1991) para a variável de resposta, apresentado na Equação 2, considera a média geral da variável dependente (μ), o efeito do grupo j (τ_j) e um erro aleatório inerente (e esperado) aos ensaios (ϵ_{ij}).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Como a ANOVA realiza a comparação de médias de diferentes grupos, deve ser feita a decomposição dos resíduos das variáveis de resposta, calculando o desvio padrão, pela Equação 3.

$$(Y_{ij} - \bar{Y}_{..}) = (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..}) + (Y_{ij} - \bar{Y}_{.j}) \quad (3)$$

O próximo passo é elevar a equação ao quadrado para calcular a variância, isto é, a dispersão do resultado das variáveis de resposta em relação à média. Essa dispersão pode ser calculada por dois componentes: a soma dos quadrados dos grupos (SQG) e a soma do quadrado dos resíduos (erros aleatórios) dentro do grupo (SQR). A Equação 4 apresenta como obter a variação geral de todas os grupos (SQT).

$$\begin{aligned} \sum(Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 &= \sum(\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2 + \sum(Y_{ij} - \bar{Y}_{.j})^2 \\ SQT &= SQG + SQR \end{aligned} \quad (4)$$

A estatística F leva em consideração a razão entre os quadrados médios. Para tanto, a soma dos termos da Equação 4 deve ser dividida pelo número de graus de liberdade de cada parâmetro do processo, conforme é apresentado na Equação 5.

$$\begin{aligned} MQG(\text{entregrupos} - \text{fator}) &= SQG / (K - 1) \\ MQR(\text{dentrogrupo} - \text{erro}) &= SQR / (N - K) \end{aligned} \quad (5)$$

Onde MQG é a média quadrada dos grupos, MQR é a média quadrada dos resíduos, N é o número de elementos e K é o número de grupos.

A par desses valores, é possível obter o F calculado pela Equação 6, o qual é a relação entre a variância dos grupos e a variância do erro.

$$F_{calc} = \frac{\text{Variânciaentregrupos}}{\text{Variânciadentrogrupo}} = \frac{MQG(\text{fator})}{MQR(\text{erro})} \quad (6)$$

A análise é realizada mediante à comparação dos resultados, com um teste F das variâncias. Isto é feito comparando o F calculado com o F tabelado e, se o primeiro for maior do que o segundo, significa que a hipótese nula é rejeitada e existem diferenças significativas entre os grupos avaliados provocadas pelos fatores controláveis estudados.

Caso a hipótese nula não seja rejeitada, o teste é inconclusivo e não há evidências suficientes para comprovar que as médias diferem significativamente entre si. Se for necessário, pode-se reduzir o termo do erro definindo fatores constantes (com variação indesejada) ou aumentando o número de repetições para reduzir o F tabelado (HAIR, 2009).

O limite de decisão é estabelecido usando os valores tabelados da distribuição F. O erro estatístico tipo I, ou alpha, estabelece o nível de significância estatística aceitável em que é permitido rejeitar a hipótese nula sendo ela verdadeira, o chamado falso positivo. O alpha é definido de acordo com o julgamento do pesquisador, geralmente recebe o valor de 0,05 para intervalos de 95% de significância, a fim de minimizar a probabilidade de erro nas conclusões (HAIR, 2009).

Para este projeto, foi definido realizar uma análise de variância dos efeitos dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta, considerando um intervalo de confiança de 95%, isto é, $\alpha \leq 0,05$. A análise dos resultados é apresentada no próximo capítulo.

3.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO NO VISSIM

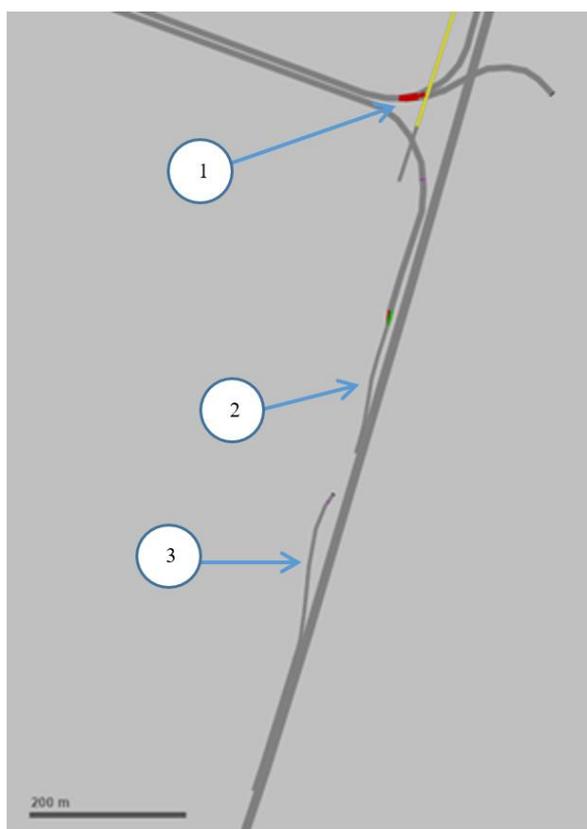
A ferramenta escolhida para realizar os ensaios do projeto foi o VISSIM. Este é um software alemão de microssimulação de tráfego com capacidade de modelar diferentes cenários, veículos individualmente e a interação entre eles, além de usar uma função de distribuição estocástica de velocidades desejadas para cada tipo de veículo (CALEFFI, 2018).

A construção do modelo no VISSIM envolveu a análise do mapa da região para realizar o levantamento e a codificação do segmento em estudo. O modelo inclui toda a rede que circunda os detectores de tráfego, fontes dos dados de tráfego obtidos para caracterizar o fluxo na via. Os limites foram definidos onde as perturbações de tráfego não têm mais influência sobre o trecho, para possibilitar a representação dos congestionamentos observados no período avaliado. Portanto, as entradas e saídas do modelo simulado foram localizadas em trechos homogêneos, abrangendo 2 km a montante e 4 km a jusante dos detectores e compreendendo os acessos existentes na rodovia.

Os volumes de tráfego introduzidos no modelo referem-se aos volumes médios observados na via em dias típicos e coletados dos detectores, em intervalos de cinco minutos. Os congestionamentos ocorrem pela existência de quatro gargalos existentes na via, após a

localização desses detectores. Incluem três rampas de acesso: o primeiro é a saída para a Ponte do Guaíba, o segundo é a convergência do fluxo de veículos oriundos da ponte para a rodovia e o terceiro se refere à entrada de uma via com tráfego local, que apresenta um alto volume na hora-pico. A Figura 7 ilustra a localização dos gargalos no modelo do VISSIM.

Figura 7 – Localização dos gargalos 1 a 3 no segmento de estudo



(fonte: ZECHIN, 2019)

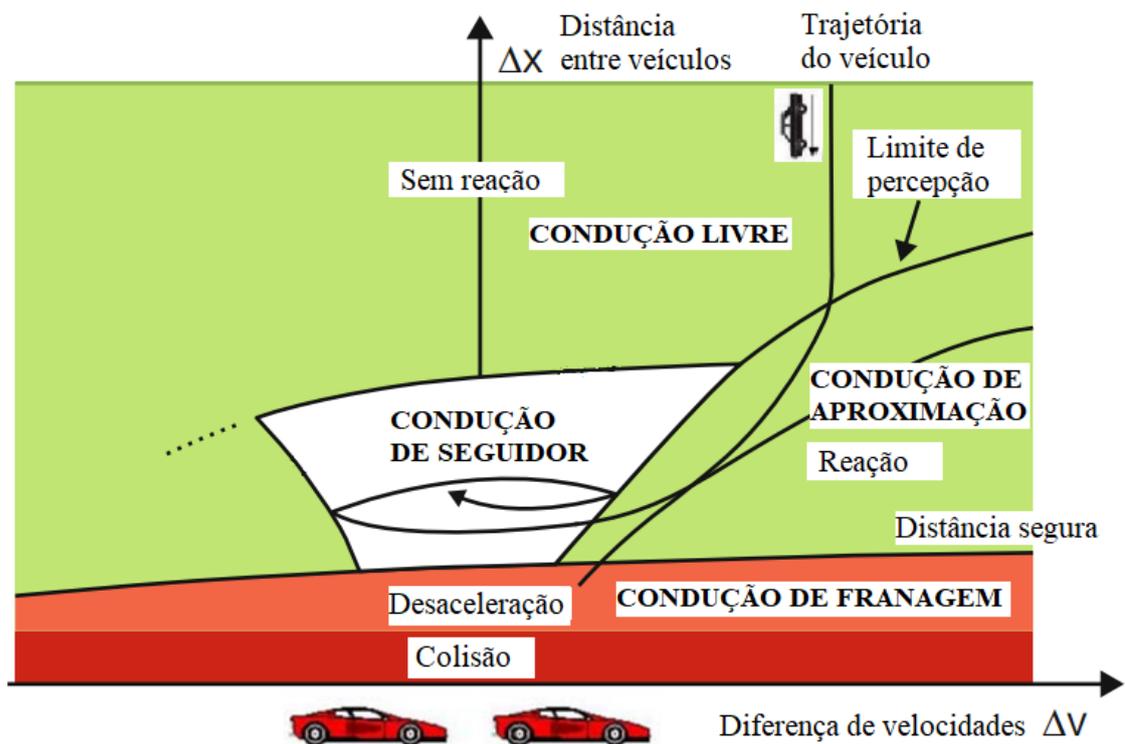
O último gargalo está localizado na intersecção da rodovia com a entrada de Porto Alegre, onde ocorrem as perturbações do tráfego do centro da capital, especialmente pela geometria das vias no entorno. A representação dessas perturbações foi simplificada no modelo, uma vez que o gargalo está distante 4 km dos laços indutivos. No local foram inseridos redutores de velocidade para representar a velocidade desenvolvida pelos veículos durante o período de pico estudado.

O VISSIM utiliza o Modelo de Wiedemann 99 para descrever a trajetória do veículo seguidor em função da trajetória do veículo da frente (líder). Este foi desenvolvido por Wiedemann (1991) para representar o tráfego em rodovias e é um modelo de regime múltiplo, que utiliza limites específicos para mudanças antecipadas no comportamento. Contém um

algoritmo de *car following* psicofísico, o qual combina um modelo de percepção dos condutores com um modelo de desempenho dos veículos. O comportamento dos motoristas está relacionado a cada tipo de link e para cada classe de veículo. O VISSIM busca representar o fluxo de tráfego por meio dos movimentos das unidades veículos-motoristas, que dependem de: (i) especificações técnicas dos veículos; e (ii) limites de sensibilidade psico-físicos dos motoristas, como a agressividade e a habilidade de estimar distâncias e velocidades relativas (ELEFTERIADOU, 1984; PTV, 2018).

O modelo comportamental de *car following* de Wiedemann envolve a classificação das reações do condutor (seguidor) em resposta às velocidades e distâncias relativas percebidas para o outro veículo a sua frente (líder) no fluxo de tráfego. Assume-se que os motoristas podem estar em um dos quatro estágios de formas de condução de veículos (PTV, 2018), conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Representação do modelo de *car following* de Wiedemann-99



(Fonte: adaptada de ELEFTERIADOU, 1984)

O estágio de condução livre ocorre quando o veículo seguidor não sofre influência de veículos a sua frente. O motorista busca atingir e manter a velocidade desejada, que na prática não se mantém constante. No estágio de condução de aproximação, ocorre o processo de

adaptação da velocidade do motorista seguidor a velocidades menores impostas por veículos mais lentos a sua frente. O motorista seguidor aplica uma desaceleração para igualar a sua velocidade à do veículo à frente no instante que atinge sua distância de segurança desejada.

No estágio de condução de seguidor, o motorista segue o veículo à frente sem consciência de aceleração ou desaceleração, buscando manter relativamente constante uma distância considerada segura. A diferença de velocidades entre os veículos oscila em torno de zero. Por fim, a condução de frenagem só ocorre se há imposição de taxas de desaceleração médias ou altas quando a distância do veículo à frente fica muito abaixo da considerada segura pelo condutor.

Os motoristas passam de um estágio para outro assim que atingem certas condições, que podem ser expressas como combinações de diferenças de velocidades e distâncias. O VISSIM busca representar esses comportamentos das unidades veículos-motoristas nas simulações de tráfego, por meio de parâmetros do modelo (PTV, 2018), são eles:

- a) CC0: distância desejada de parada entre veículos parados;
- b) CC1: tempo de *headway* (*gap*), em segundos, igual ao tempo para manter um espaçamento desejado do veículo à frente;
- c) CC2: variação de *following*, isto é, a oscilação longitudinal, ou o quanto mais de distância além da distância desejada de segurança o motorista permite do veículo à frente;
- d) CC3: espaçamento para entrar em *following*, que representa o controle do começo do processo de desaceleração, quando o motorista reconhece um veículo mais lento a sua frente;
- e) CC4 e CC5: limites negativo e positivo do *following*, os quais controlam a diferença de velocidades durante o estado de *following*;
- f) CC6: velocidade dependente da oscilação, que busca representar a influência da distância na oscilação da velocidade dos veículos em *following*;
- g) CC7: oscilação de aceleração real;
- h) CC8: aceleração quando parado, igual à aceleração desejada de um veículo quando estiver começando a se movimentar a partir da situação parada;
- i) CC9: aceleração a 80 km/h (limitada pela máxima aceleração definida nas curvas de aceleração).

O software é comercializado com valores *default* para todos os parâmetros que representam características de tráfego europeias. Para estudar as condições de fluxo da região de estudo, faz-se necessária a calibração do modelo para que os parâmetros mais influentes

representem o comportamento dos motoristas brasileiros. O manual do VISSIM (PTV, 2018) sugere utilizar o modelo de *car following* Wiedemann 99 que, em conjunto com o parâmetro *safe distance for lane changing* (distância segura para trocas de faixas) do modelo de mudanças de faixas e a distribuição de velocidade desejada, formam os parâmetros mais utilizados para determinar as características do tráfego que devem ser calibrados (ZECHIN, 2019). Uma vez que o simulador é codificado para receber os parâmetros geométricos e demais características do trecho em estudo, ele pode ser calibrado (CALEFFI, 2018).

Para as simulações do trecho em estudo deste trabalho, os parâmetros comportamentais dos veículos convencionais foram obtidos do estudo de Caleffi (2018). O autor realizou a calibração dos parâmetros comportamentais do modelo de Wiedemann 99 e de trocas de faixas do trecho em estudo para garantir que a simulação representasse satisfatoriamente todas as distribuições de velocidades e fluxos por faixa, e as composições dos veículos. A calibração foi validada com os dados coletados dos km 92 e 94 da rodovia BR-290/RS, por meio de testes de qui-quadrado, os quais mostraram que as diferenças para a relação fluxo-velocidade e os conflitos entre os dados simulados e observados não foram estatisticamente significativas. Detalhes do processo de calibração podem ser conferidos no capítulo 5 do trabalho de Caleffi (2018).

As considerações referentes à infraestrutura, rotas e volumes foram baseadas no trabalho de Zechin (2019), bem como a distribuição das velocidades desejadas dos veículos convencionais. O autor elaborou distribuições diferentes para veículos leves e pesados e para cada uma das faixas da rodovia. Os valores encontrados indicam que o comportamento dos motoristas da região estudada é mais agressivo do que o representado como *default* pelo simulador, corroborando com as colocações de Caleffi (2018).

Os parâmetros utilizados nos veículos autônomos foram os sugeridos pelo projeto CoEXist, já implementados como padrão no VISSIM (PTV, 2018), cuja metodologia de obtenção de seus valores é detalhada em Sukennik (2018). A escolha dos parâmetros do projeto se deu porque cada veículo autônomo utiliza uma lógica de condução. Porém, em vez de distinguir entre as lógicas do sistema de navegação autônomo dos fabricantes de automóveis ou das empresas, o CoEXist trabalha com quatro lógicas de condução fundamentais descritas pelos seus princípios e capacidades.

O projeto realiza testes na Europa para entender a influência do comportamento desses veículos em tráfego misto e busca avaliar seus impactos na segurança, operação de tráfego e demanda por espaço na infraestrutura viária. Para tanto, foi estabelecida uma conexão entre as lógicas de controle de AVs e o simulador de veículo, por meio das interfaces de veículos autônomos da Renault, do VEDECOM (com algoritmos de decisão) e o simulador CAV PreScan (para representar a dinâmica do veículo) (DAHL *et al.*, 2018).

Como parte do desenvolvimento do projeto CoEXist, foram determinados os parâmetros desses veículos no VISSIM, baseados no modelo de Wiedemann 99. Realizou-se uma coleta de dados em ambiente de tráfego real em uma pista de testes, em Helmond (Holanda) e foram identificados oito casos de estudos na Europa. Foram estudados dois AVs, equipados com controle de cruzeiro avançado cooperativo, que pode estar ligado, desligado ou no modo degradado (este não considera a comunicação V2V), seguindo um carro convencional para diferentes cenários. Os testes foram simulados comparando os resultados do modelo e realizando as modificações necessárias. A partir desse processo, o comportamento dos AVs foi validado e seus parâmetros foram adicionados aos recursos do VISSIM 11 (DAHL *et al.*, 2018).

Conforme recomendação do autor (SUKENNIK, 2018), foram removidas as variabilidades das acelerações desempenhadas pelos AVs e a velocidade desejada foi determinada como sendo igual à velocidade limite da via, sem variabilidade. Além disso, foi definido que os AVs do tipo “Agressivo” teriam seu *headway* (parâmetro CC1) igual ao dos AVs do tipo “Normal” quando estivessem seguindo um veículo convencional.

No entanto, sabe-se que não vai existir um padrão para todos as marcas e modelos de veículos autônomos, podendo incluir ou não recursos de conectividade. Na ausência de um padrão conhecido e para a aplicação em simulador de tráfego, foram seguidas as definições do CoEXist. Cabe ressaltar que o comportamento da frota de veículos autônomos no Brasil poderá ser diferente do proposto pelo projeto. A Tabela 6 apresenta o resumo dos valores dos parâmetros comportamentais adotados para cada classe de veículo e os parâmetros *default* do VISSIM para fins de comparação.

Tabela 6 – Parâmetros comportamentais dos veículos no VISSIM

| Parâmetros | Default VISSIM | Veículos convencionais (CALEFFI, 2018) | AVs Normal (CoEXist) | AVs Agressivo (CoEXist) |
|--|---------------------------|---|-------------------------------------|--|
| CC0 (standstill distance) [m] | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,0 |
| CC1 (headway time) [s] | 0,9 | 1,1 | 0,9 | 0,6 |
| CC2 (following variation) [m] | 4,0 | 2,6 | 0,0 | 0,0 |
| CC3 (threshold of entering following) | -8,0 | -5,6 | -8,0 | -6,0 |
| CC4 & CC5 (negative and positive following thresholds) | ±0,35 | ±0,5 | ±0,1 | ±0,1 |
| CC6 (speed dependency of oscillation) | 11,44 | <i>default</i> | 0,0 | 0,0 |
| CC7 (oscillation acceleration) [m/s ²] | 0,25 | <i>default</i> | 0,1 | 0,1 |
| CC8 (standstill acceleration) [m/s ²] | 3,5 | <i>default</i> | 3,5 | 4,0 |
| CC9 (acceleration with 80 km/h) [m/s ²] | 1,5 | <i>default</i> | 1,5 | 2,0 |
| Safety distance reduction factor | 0,6 | 0,3 | 0,6 | 0,75 |

(fonte: elaborada pela autora)

Observa-se que os parâmetros comportamentais de veículos autônomos com modo de condução “Normal” apresentam características mais cautelosas em relação ao comportamento dos motoristas brasileiros (veículos convencionais). Por essa razão, o comportamento de veículos autônomos cautelosos não foi estudado, uma vez que esse modo de condução do sistema de navegação do AV não corresponde ao perfil de comportamento dos motoristas do local de estudo. Visto que os condutores brasileiros apresentam naturalmente mais agressividade em relação a outros países, foi assumido que esse tipo de condução não seria uma opção natural dos usuários da rodovia. Além disso, apesar de ser mais cauteloso, é importante ressaltar que o modo de condução “Normal” os AVs têm parâmetros que reduzem a variabilidade do comportamento no tráfego, o que os torna mais assertivos em relação aos motoristas humanos.

3.4 ANÁLISE DOS EVENTOS QUE SERIAM CONSIDERADOS CONFLITOS PARA A FROTA CONVENCIONAL NO SSAM

Estudos sobre a inserção de veículos autônomos no tráfego destacam a redução dos riscos e da severidade de acidentes como um grande benefício dessa tecnologia (CHANG *et al.*, 2017; FAGNANT; KOCKELMAN, 2015). Os altos níveis de congestionamento e heterogeneidade do tráfego entre faixas nas rodovias brasileiras tornam frequentes e perigosas as ultrapassagens. A combinação de análise dos modelos VISSIM e SSAM pode ajudar a avaliar os eventos que seriam considerados conflitos para veículos convencionais em diferentes condições de tráfego e, futuramente, auxiliar na segurança da rodovia (CALEFFI, 2018). Dessa forma, este trabalho busca encontrar uma relação entre as características operacionais do trecho com a probabilidade de ocorrer eventos que seriam considerados conflitos entre veículos convencionais, já que são uma medida direta de segurança viária.

Para tanto, o software SSAM foi selecionado para a análise da ocorrência de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional. Ele foi projetado para executar a análise estatística de dados de trajetória dos veículos no espaço-tempo, extraídos a partir de modelos microscópicos de simulação de tráfego, como o VISSIM. As informações de eventos de conflito são coletadas por meio do arquivo .trj salvo da microsimulação do VISSIM para posterior análise utilizando o SSAM. O modelo utiliza algoritmos para calcular uma série de medidas de segurança substitutas para cada evento identificado por meio de dados da trajetória, bem como os resumos (média, máximo, etc.) de cada indicador (FYFE, 2017; FHWA, 2008).

O modelo calcula indicadores de conflito de tráfego para veículos convencionais, como (FHWA, 2008):

- a) tempo de colisão (TTC): tempo previsto para dois veículos colidirem se permanecerem na velocidade atual e na mesma trajetória (essa estimativa é baseada na localização atual, velocidade e trajetória de dois veículos em um determinado instante);
- b) tempo de pós-invasão (PET): é o tempo mínimo após a invasão observado durante o conflito. O tempo entre a última vez que o primeiro veículo ocupou uma posição e o segundo veículo chegou posteriormente à mesma posição. Um valor 0 segundo indica uma colisão real;
- c) velocidade de desaceleração dos veículos (DR): é a taxa de desaceleração inicial do segundo veículo. Esse valor é registrado como a taxa de aceleração

instantânea. Se o veículo freia (reage), esse é o primeiro valor de aceleração negativa observado durante o conflito. Se o veículo não frear, esse é o menor valor de aceleração observado durante o conflito;

- d) velocidade máxima (MaxS): é a velocidade máxima de qualquer veículo durante o conflito (ou seja, enquanto o TTC é menor que o limite especificado);
- e) diferencial de velocidade (DeltaS): é a diferença de velocidades entre os veículos, conforme observado no tMinTTC. O valor é matematicamente definido como a magnitude da diferença nas velocidades do veículo (ou trajetórias);
- f) desaceleração máxima (MaxD): é a desaceleração máxima do segundo veículo. É a taxa de aceleração instantânea mínima observada durante o conflito. Um valor negativo indica desaceleração (frenagem ou liberação do pedal do acelerador);
- g) máxima diferença de velocidade (MaxDeltaV): a alteração máxima entre a velocidade do conflito e a velocidade pós-colisão para qualquer veículo envolvido no conflito;
- h) FirstDeltaV/SecondDeltaV: alteração entre a velocidade do conflito e a velocidade pós-colisão;
- i) tMinTTC: é o tempo de simulação em que o valor do tempo mínimo de colisão (TTC) para esse conflito foi observado;
- j) ângulo entre o conflito: definido como o ângulo do veículo em conflito quando o primeiro veículo tomou uma ação evasiva para evitar uma colisão.

O software identifica os conflitos com base em limiares específicos para os valores do TTC. Isto é, o SSAM identifica a ocorrência de eventos considerados conflitos para a frota convencional quando o valor mínimo de TTC entre dois veículos excede o valor máximo de um limiar pré-definido (CALEFFI, 2018), este geralmente é um dado coletado em campo. Após, os eventos são classificados conforme o tipo de manobra: conflitos de colisão traseira (entre veículo perseguidor e veículo líder); conflitos por mudança de faixas; e conflitos em cruzamento (FHWA, 2008). Essa classificação depende dos valores dos ângulos limites definidos para cada tipo de conflito.

É importante calibrar o modelo no SSAM para que a análise e a identificação de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional tenham validade com as métricas fornecidas pelo simulador para o local de estudo. Por essa razão, este trabalho baseia-se no estudo de Caleffi (2018), que realizou a calibração e a validação do trecho em estudo, a fim de representar no VISSIM os conflitos coletados em campo e ajustar os limiares dos parâmetros do software SSAM para a rodovia. Em seu trabalho, o autor buscou modelar a

relação entre as características de tráfego e a probabilidade da ocorrência de eventos considerados conflitos na rodovia BR-290/RS.

Para realizar a calibração do modelo no SSAM, o estudo de Caleffi (2018) coletou dados de trajetória dos veículos e identificou os eventos de conflitos em campo por meio de técnicas semiautomáticas de visão computacional. Os conflitos de tráfego foram extraídos identificando as ações evasivas dos veículos, como freadas, mudanças de direção e desaceleração dos veículos. As informações coletadas foram: (i) velocidade média; (ii) ocupação; (iii) fluxo total para cada faixa; (iv) tempo de cada conflito; (v) distância dos veículos em conflito com o ponto de conflito; (vi) ângulo de cada veículo em conflito; e (vii) velocidade de cada veículo em conflito. Em posse dos dados, foi possível estimar o tempo até a colisão (TTC).

Para o método foi necessário definir o tempo até a colisão (TTC) e o ângulo dos veículos no evento de conflito. O valor para o TTC medido nos locais selecionados (km 92 e km 94) do estudo na rodovia variou entre 0,5 e 3,6 segundos, com uma média de 2,0 segundos. Um total de 3756 conflitos foram observados e identificados, incluindo 2291 conflitos de colisão traseira (61%) e 1465 conflitos de mudança de faixa (39%). O elevado número de eventos considerados conflitos de mudança de faixa para veículos convencionais enfatiza as peculiaridades do tráfego na rodovia em estudo, em que ultrapassagens e a mudança de faixa são frequentes devido à alta diferença nas velocidades médias e nos fluxos por faixa (CALEFFI, 2018).

O ângulo de conflito padrão no SSAM para diferenciar conflitos de colisões traseiras tem o valor de 30° . Isso indica que um evento de conflito com um ângulo entre os veículos menor do que 30° será classificado como conflito de colisão traseira. Uma vez que o trecho de estudo é uma via livre sem interseções, os conflitos de cruzamento não acontecem. Como o ângulo conflitante definido durante a coleta de dados pode ter alguma distorção, o ângulo de conflito padrão no SSAM foi ajustado a fim de alcançar a melhor consistência entre os conflitos simulados e os de campo. O limite do ângulo conflitante com a melhor consistência foi definido por Caleffi (2018) como 29° . A calibração apresentou uma boa correlação entre os modelos VISSIM e SSAM, para um valor de 0,9826, o que significa que eventos considerados conflitos de tráfego simulados forneceram estimativas razoáveis em relação aos conflitos de tráfego observados em campo.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este trabalho buscou avaliar os impactos de veículos autônomos, em tráfego misto, na operação de uma rodovia brasileira de múltiplas faixas. Nesta seção são apresentadas as análises dos resultados obtidos. A avaliação das medidas de desempenho contemplou a análise de variância dos efeitos principais e dos efeitos das interações dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta, que são: tempo de viagem, atraso de viagem, velocidade média, taxa de ocupação, número de mudanças de faixas e número de mudanças de faixas no período de máximo volume de tráfego na via (30 minutos). Além disso, foi realizada uma comparação da magnitude dos impactos da introdução de veículos autônomos na frota convencional, em especial sobre a capacidade do trecho e uma análise do perfil horário das medidas de desempenho. Por fim, avaliou-se a mudança no número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional comparando-se o cenário base (caracterizado pelo fluxo de tráfego de veículos convencionais atualmente existente na rodovia) com um cenário composto por uma frota de 100% AVs.

O projeto de experimentos permitiu o planejamento e a definição dos cenários a serem modelados no VISSIM. As simulações foram organizadas por meio de uma rotina elaborada em linguagem Python. Ao todo foram realizadas 260 simulações e o tempo decorrido de simulação foi de 18 horas em um computador Windows 10 de 64 bits, com processador Intel Core i5-8500 de 3,00GHz e 32GB de memória RAM. As subdivisões a seguir apresentam a análise das medidas de desempenho obtidas com as simulações de tráfego dos diferentes cenários estudados.

4.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Os efeitos dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta foram avaliados por meio da análise de variância (ANOVA) de um projeto fatorial composto por três fatores. Dessa forma, foi possível considerar o resultado do fator isoladamente e também o efeito das interações entre dois e três fatores. A Tabela 7 apresenta os p-valores encontrados para um intervalo de confiança igual a 95% ($\alpha \leq 0,05$). O resultado dos efeitos dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta com diferenças significativas entre os grupos estão destacados em negrito. Os demais valores não apresentam diferença significativa para esses

experimentos. Os números 1, 2 e 3 (associados às abreviaturas das variáveis de resposta) são referentes às seções de análise da região de estudo, definidas na Tabela 3.

Tabela 7 – Análise de variância (resultados dos p-valores obtidos)

| Variável de resposta | Fatores Controláveis | | | | | | | |
|----------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------------|
| | Bloco | Volume | AV_alto | Pen_AV | Volume* AV_alto | Volume* Pen_AV | AV_alto* Pen_AV | Volume* AV_alto* Pen_AV |
| <i>Vel_1</i> | 9,0E-01 | 0,0E+00 | 1,4E-01 | 0,0E+00 | 1,4E-02 | 0,0E+00 | 4,5E-01 | 1,0E+00 |
| <i>Vel_2</i> | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 6,7E-02 | 0,0E+00 | 3,6E-01 | 0,0E+00 | 7,6E-01 | 1,0E+00 |
| <i>Vel_3</i> | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 6,0E-03 | 4,0E-03 |
| <i>Ocup_1</i> | 5,9E-01 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 4,1E-02 | 5,4E-02 |
| <i>Ocup_2</i> | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 4,3E-01 | 0,0E+00 | 7,4E-01 | 0,0E+00 | 1,0E+00 | 1,0E+00 |
| <i>Ocup_3</i> | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 3,8E-02 | 1,9E-02 |
| <i>TF_1</i> | 8,4E-02 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 3,0E-03 |
| <i>TF_2</i> | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 3,8E-02 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 2,5E-01 |
| <i>TF_3</i> | 3,0E-01 | 0,0E+00 | 1,7E-01 | 0,0E+00 | 3,0E-03 | 0,0E+00 | 8,6E-01 | 1,4E-01 |
| <i>TFp_1</i> | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 1,0E-03 | 8,0E-03 |
| <i>TFp_2</i> | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 1,0E-03 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 1,0E-01 | 4,3E-02 |
| <i>TFp_3</i> | 2,5E-01 | 0,0E+00 | 3,7E-01 | 0,0E+00 | 4,8E-01 | 0,0E+00 | 9,1E-01 | 9,8E-01 |
| <i>T_viagem</i> | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 1,6E-01 | 0,0E+00 | 2,2E-01 | 0,0E+00 | 9,5E-01 | 1,0E+00 |
| <i>Delay</i> | 0,0E+00 | 0,0E+00 | 1,7E-01 | 0,0E+00 | 2,2E-01 | 0,0E+00 | 9,5E-01 | 1,0E+00 |

(fonte: elaborada pela autora)

Os resultados da análise de variância mostraram que os efeitos dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta apresentaram diferenças significativas para 69,64% das avaliações feitas. Isso indica que os parâmetros escolhidos para terem seus valores alterados durante as simulações têm grande influência sobre as medidas de desempenho estudadas. Os efeitos dos fatores controláveis que dizem respeito à percentagem de volume na rodovia em relação ao volume observado atualmente (Volume) e à taxa de penetração de veículos autônomos na frota convencional (Pen_AV), bem como os efeitos da interação desses fatores, mostraram-se significativos para todas as variáveis de resposta avaliadas. Essa conclusão corrobora com a questão de que a quantidade de veículos na rede e o número de veículos

autônomos em relação ao volume total influenciam direta e isoladamente nas variáveis de resposta estudadas, como também se combinados.

Enquanto a alteração do modo de navegação e, portanto, do comportamento do sistema autônomo (AV_alto) não apresentou diferenças significativas para todas as medidas de desempenho avaliadas. A análise dos p-valores para o fator controlável e sua interação com outros fatores indica que a escolha entre AVs com comportamento “Normal” ou “Agressivo” não influencia significativamente no tempo e atraso de viagem (T_{viagem} , $Delay$), na velocidade da seção 1 (Vel_1), na velocidade e na ocupação da seção S2 (Vel_2 , $Ocup_2$) — a qual apresenta dois acessos à rodovia — e nas trocas de faixas da seção S3 (Tf_3 , Tfp_3), esta com características de tráfego homogêneas.

De modo geral, os efeitos dos blocos são significativos, para o tempo e atraso de viagem (T_{viagem} , $Delay$), e em especial para as medidas de desempenho da seção 2, a qual apresenta características de tráfego de convergência de fluxo. Os resultados não são conclusivos para as variáveis de resposta da seção 1 e para as trocas de faixas na seção 3 (Tf_3 , Tfp_3). Isso sugere que a abordagem de considerar as sementes aleatórias como fatores constantes no experimento é capaz de reduzir o termo do erro entre parte dos grupos avaliados. Logo, o controle da variabilidade utilizada para a geração de estocasticidade pelo simulador contribui para aumentar a precisão dos experimentos.

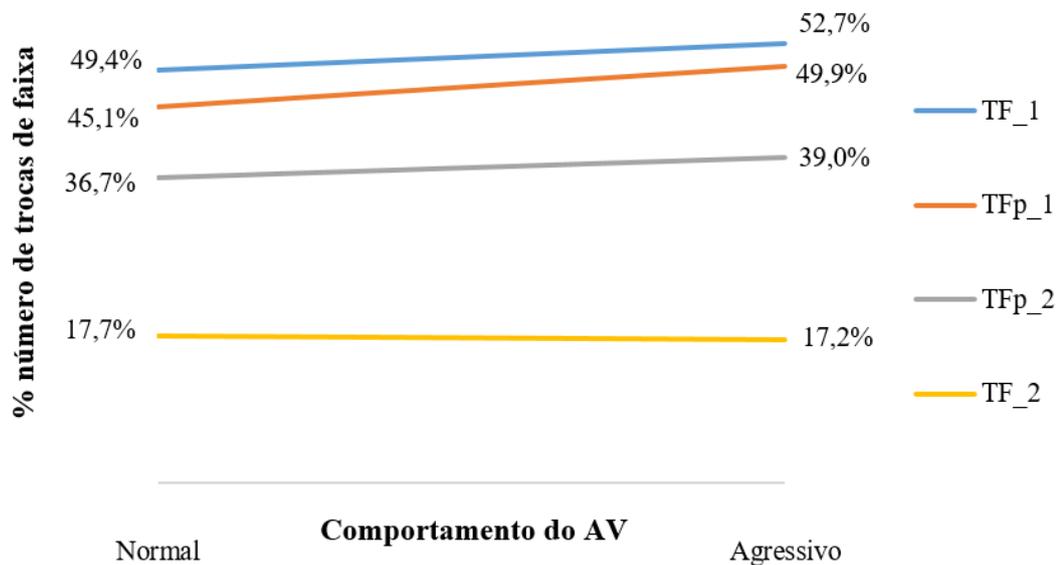
Os efeitos principais e de interação obtidos a partir da análise de variância do projeto de experimentos são apresentados nas seguintes subseções com mais detalhes.

4.2 ANÁLISE DOS EFEITOS PRINCIPAIS

Efeito principal é a alteração individual de cada fator controlável que impõe uma mudança na variável de resposta (HAIR, 2009). Como visto na análise de variância apresentada anteriormente, existe diferença significativa dos efeitos principais dos fatores controláveis “Volume” e “Pen_AV” sobre todas as variáveis de resposta avaliadas neste trabalho. Entretanto, para o fator controlável correspondente ao modo de condução do sistema autônomo (AV_alto) não foram observados resultados significativos para todas as variáveis de resposta. Por essa razão, esta seção apresenta uma análise mais detalhada dos resultados com diferenças significativas (p-valores $\leq 0,05$).

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os valores obtidos para as variáveis de resposta estudadas com a inserção de veículos autônomos na frota, são elas: trocas de faixa, taxa de ocupação e velocidade. Os gráficos descrevem a diferença, em termos de percentual, dos resultados conforme o modo de condução escolhido para o sistema de navegação dos AVs (“Normal” ou “Agressivo”). Os valores das percentagens são representados em relação às medidas de desempenho obtidas no cenário base, o qual contempla apenas veículos convencionais.

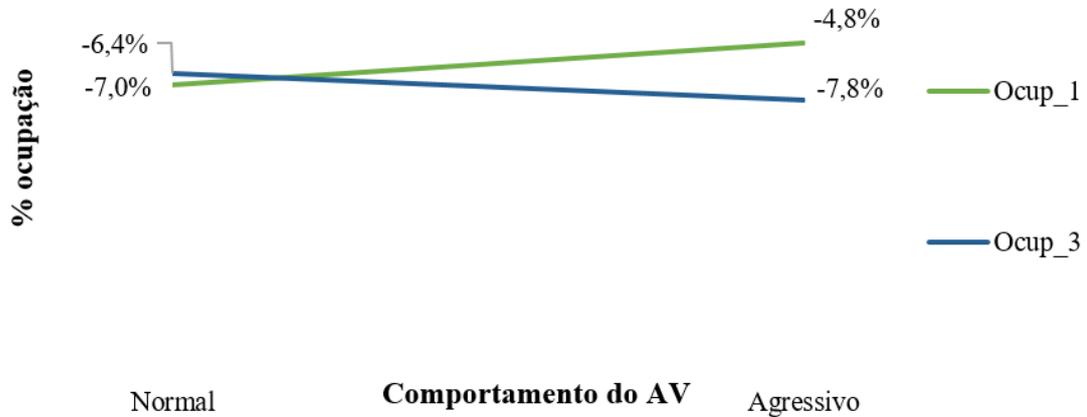
Figura 9 – Variação dos resultados para o número de trocas de faixa conforme o modo de condução dos AVs (percentagem em relação ao cenário base)



(fonte: elaborada pela autora)

Vê-se que houve um aumento no número de mudanças de faixas com a inserção de veículos autônomos na frota de veículos convencionais, variando entre 17,2% e 52,7%, dependendo da seção de análise do fluxo de tráfego e do modo de condução dos AVs. Observa-se uma tendência geral de aumento no número de trocas de faixa do nível “Normal” para “Agressivo” nas seções S1 e S2, onde trocas de faixa são especialmente importantes por não se tratarem de um trecho homogêneo, como a seção S3. Os resultados vão ao encontro da definição de que veículos (e motoristas) com comportamentos mais agressivos tendem a realizar mais mudanças de faixa. Enquanto as trocas de faixas na seção 2, durante todo o período de simulação, indicam uma pequena redução de valores do nível “Normal” para “Agressivo”.

Figura 10 – Variação dos resultados para a taxa de ocupação conforme o modo de condução dos AVs (percentagem em relação ao cenário base)



(fonte: elaborada pela autora)

Após a implantação de veículos autônomos na rodovia, as taxas de ocupação apresentaram redução para nas seções 1 e 3. Na região de bifurcação de faixas (S1) AVs do tipo “Normal” apresenta menores taxas de ocupação, enquanto na seção de tráfego homogêneo (S3) AVs do tipo “Agressivo” contribuem para a taxa de ocupação mais baixa. É reconhecido que o comportamento “Normal” é mais cauteloso do que o “Agressivo” e pode contribuir para uma melhor acomodação dos veículos no fluxo de tráfego, especialmente em locais com trocas de faixa, como a seção 1. No trecho sem alterações ou perturbações de tráfego, o comportamento “Agressivo” apresenta mais assertividade nas tarefas de condução, admite *headways* menores e, por essa razão, promove mais eficiência ao fluxo de tráfego.

Figura 11 – Variação dos resultados para a velocidade conforme o modo de condução dos AVs (percentagem em relação ao cenário base)



(fonte: elaborada pela autora)

Na seção 3, ambos os comportamentos dos veículos autônomos provocam aumento na velocidade. O modo de condução “Agressivo” apresenta um leve acréscimo em relação ao “Normal”.

A partir dessa análise é possível afirmar que as diferenças dos efeitos do modo de condução dos AVs sobre as variáveis de resposta são pequenas em termos de percentual, variando de 0,5% a 4,8%, embora sejam estatisticamente significativas. Ainda, quando se comparam esses valores com as medidas de desempenho apresentadas no cenário base, a escolha do comportamento do sistema dos veículos autônomos pode não provocar grandes mudanças em termos de eficiência do fluxo de tráfego na rodovia.

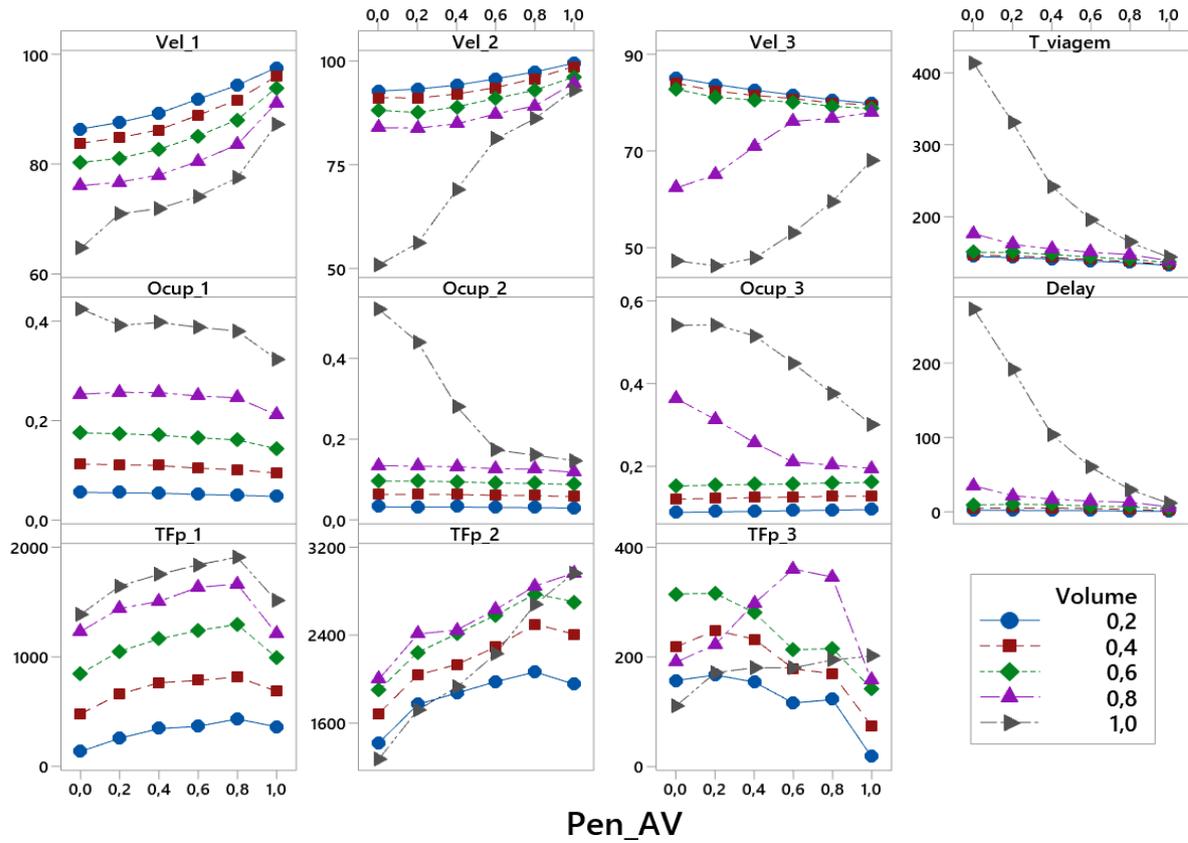
4.3 ANÁLISE DOS EFEITOS DE INTERAÇÃO

Efeitos de interação representam os efeitos conjuntos de dois ou mais fatores controláveis sobre uma variável de resposta (HAIR, 2009). Esta seção trata da análise dos efeitos do volume de tráfego na rodovia combinado à taxa de penetração de veículos autônomos na frota (Volume*Pen_AV), uma vez que a análise de variância apresentou diferenças significativas dessa interação sobre as medidas de desempenho avaliadas. A análise dos efeitos das interações é apresentada na Figura 12.

Os diagramas apresentados representam os efeitos das variáveis de resposta avaliadas neste trabalho. O eixo x descreve o nível da taxa de penetração de AVs na frota de veículos, enquanto o eixo y corresponde aos valores resultantes de cada medida de desempenho. Cada linha diz respeito ao valor da percentagem de volume máximo permitido na rodovia em relação ao cenário base. O tempo e o atraso de viagem são apresentados em segundos e a velocidade, em m/s.

Em geral, observa-se um comportamento diferenciado das variáveis de resposta avaliadas para valores de volume de tráfego até 60% do observado na via e para volumes acima desse patamar. A análise dos efeitos de interação permitiu concluir que quanto maior o volume de tráfego, maiores são os efeitos do percentual de veículos autônomos no tráfego.

Figura 12 – Efeitos da interação entre o volume de tráfego na rodovia e a taxa de penetração de AVs na frota



(fonte: elaborada pela autora)

Com relação às velocidades, é observada uma tendência de crescimento conforme a taxa de inserção de AVs na frota convencional, para o mesmo volume de tráfego. A taxa de ocupação sofre impactos positivos dos veículos autônomos quando a rodovia apresenta volumes de tráfego próximo ao volume atualmente existente (de 80% a 100%). Também para o fluxo de tráfego observado na BR-290/RS, ocorre uma diminuição exponencial do tempo de viagem e atraso conforme a introdução de AVs na corrente de tráfego. Esses resultados mostram que os veículos autônomos trazem benefícios para a operação de tráfego do segmento em estudo, particularmente com uma taxa de penetração a partir de 60% na frota convencional.

O número de trocas de faixa nas seções de divergência e convergência de tráfego (S1 e S2) também aumenta com a inserção de mais veículos autônomos, o que usualmente está relacionado a um aumento no número de conflitos e acidentes (CALEFFI, 2018). Contudo, a ocorrência combinada dos fenômenos citados sugere que o comportamento mais assertivo dos

AVs, bem como seus recursos e habilidades, permite que as condições de tráfego sejam otimizadas para padrões diferentes dos usuais.

De acordo com os resultados analisados, constatou-se que a taxa de penetração de 100% de veículos autônomos na frota convencional (Pen_AV=100%) e o volume de tráfego atualmente observado na via (Volume=100%) provocaram os maiores impactos nas medidas de desempenho. Assim, foi avaliada a diferença nos valores das variáveis de resposta em forma de comparação do cenário base com o cenário com 100% de AVs, para o mesmo volume de tráfego na rodovia, igual ao atualmente observado. A Tabela 8 apresenta a diferença percentual dos valores das variáveis de resposta para o cenário base (caracterizado pelo fluxo de tráfego de veículos convencionais atualmente existente na rodovia) e um cenário com 100% da frota de veículos autônomos. As variáveis estão ordenadas por magnitude dos efeitos dos AVs na frota, em relação ao cenário base.

Tabela 8 – Diferenças nas medidas de desempenho entre o cenário base e o cenário com uma frota de 100% AVs

| VR | Pen_AV = 0% | Pen_AV = 100% | Dif. % |
|-----------------|--------------------|----------------------|---------------|
| <i>TFp_2</i> | 1.274,00 | 2.964,13 | 132,7% |
| <i>Delay</i> | 272,28 | 10,66 | -96,1% |
| <i>Vel_2</i> | 50,74 | 93,23 | 83,7% |
| <i>TFp_3</i> | 110,80 | 201,50 | 81,9% |
| <i>Ocup_2</i> | 0,52 | 0,15 | -72,1% |
| <i>TF_2</i> | 8.169,20 | 13.554,50 | 65,9% |
| <i>T_viagem</i> | 414,12 | 143,05 | -65,5% |
| <i>Ocup_3</i> | 0,54 | 0,30 | -44,4% |
| <i>Vel_3</i> | 47,19 | 68,01 | 44,1% |
| <i>Vel_1</i> | 64,59 | 87,27 | 35,1% |
| <i>Ocup_1</i> | 0,43 | 0,32 | -23,8% |
| <i>TF_3</i> | 848,40 | 1.023,75 | 20,7% |
| <i>TFp_1</i> | 1.386,40 | 1.513,00 | 9,1% |
| <i>TF_1</i> | 7.283,20 | 7.521,88 | 3,3% |

(fonte: elaborada pela autora)

Os valores indicam que o aumento no percentual de veículos autônomos na frota surte maiores efeitos na seção 2, região onde se localizam dois acessos para a rodovia, ocorrendo convergência do fluxo e apresentando características de tráfego particulares. Enquanto isso, a seção 1, que apresenta características de tráfego com divergência de fluxo de veículos, é a menos afetada. Os maiores impactos podem ser descritos pelo aumento de 132,7% no número de troca de faixas na hora-pico na seção 2, redução de 96,1% no atraso e aumento de 83,7% na velocidade dos veículos na seção 2. Além da diminuição do atraso, houve uma redução de 65,5% no tempo de viagem, que acompanhadas das comparações possíveis de serem feitas pela Figura 12, sugerem que o aumento no número de veículos autônomos gera condições de tráfego mais fluidas.

Portanto, a comparação de cenários com 100% da frota de veículos autônoma em relação ao cenário base é de particular interesse para verificar sua influência na capacidade da rodovia. Além disso, o aumento do número de mudanças de faixas em todas as seções de análise deve ser acompanhado de uma análise de eventos considerados conflitos para veículos convencionais para conclusões mais precisas sobre os efeitos da inserção de AVs na frota quanto à segurança viária.

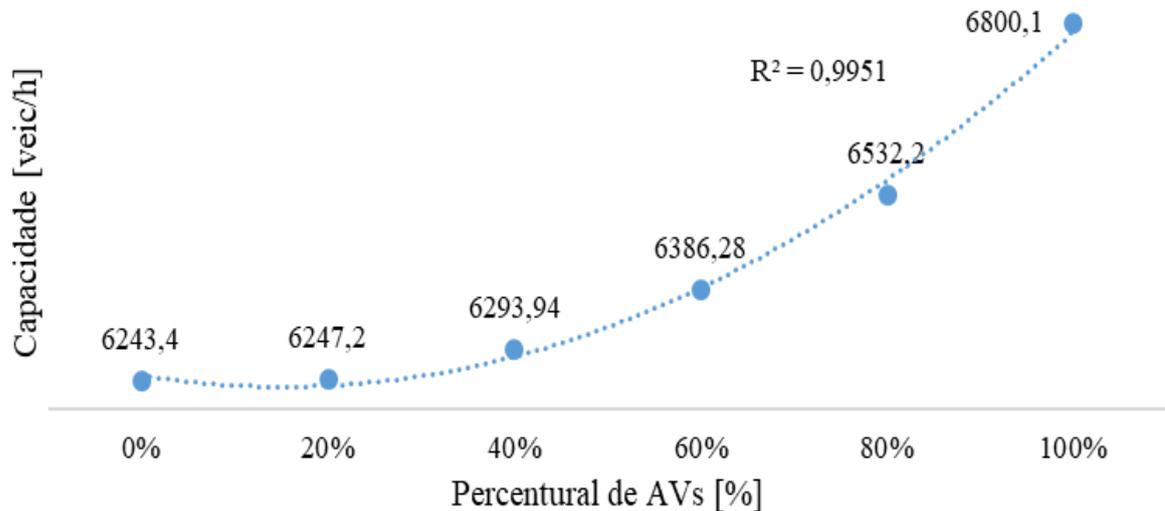
4.4 INFLUÊNCIA NA CAPACIDADE

Para fins de análise da influência da inserção de veículos autônomos na capacidade da rodovia, foi realizado um aumento no perfil de demanda da BR-290 em 20% do volume atual observado (volume de tráfego total = 120%), a fim de garantir que ocorresse o *breakdown* e os veículos estivessem trafegando em condições congestionadas. O conceito de capacidade pode ser associado ao fenômeno do *breakdown*. Este é caracterizado pela queda abrupta da velocidade e do volume de tráfego na seção analisada, devido ao excesso de demanda. O fenômeno pode ocorrer com diferentes volumes de tráfego e leva à transição do regime não-congestionado para congestionado (ELEFTERIADOU et al, 2006, apud ELEFTERIADOU, 2014).

Um detector de fluxo de tráfego foi inserido na simulação imediatamente a jusante da seção 2, onde há convergência entre o fluxo da via principal e de duas vias de acesso. Foi considerada como capacidade o valor de 95% do volume máximo observado em intervalos de 5 minutos. Os resultados da influência da taxa de penetração de AVs na capacidade são

apresentados na Figura 13, na qual o gráfico teve seus valores ajustados a um polinômio de grau 2.

Figura 13 – Influência da taxa de penetração de AVs na capacidade do trecho de estudo



(fonte: elaborada pela autora)

A análise do gráfico sugere que a relação da introdução de veículos autônomos na frota de veículos convencionais (Pen_AV) com a capacidade do trecho estudado é bem ajustada a um polinômio de grau 2, com um valor de $R^2=0,9951$. Pode-se dizer que a substituição total da frota convencional por veículos autônomos pode levar a um aumento de 8,9% da capacidade da via. Entretanto, para taxas de penetração de AVs de até 40%, o aumento na capacidade da via não atinge 1% do valor observado no cenário base. Logo, os impactos dos AVs são observados a partir de uma taxa de penetração de 60%.

Para melhor compreender os efeitos dos veículos autônomos na corrente de tráfego, foram comparados os perfis horários de fluxo, velocidade, taxa de ocupação e trocas de faixas das três seções de avaliação das condições do fluxo, apresentados na Figura 14. Para essa análise foram comparados dois cenários com o perfil de demanda atual (taxa de volume correspondente a 100% do valor observado na rodovia), com o objetivo de representar as condições de fluxo de tráfego semelhantes às existentes na BR-290/RS.

A primeira coluna diz respeito aos perfis horários das medidas de desempenho para o cenário base, com uma frota composta apenas por veículos convencionais (Pen_AV=0%). A segunda coluna representa o cenário com uma frota de veículos 100% autônoma (Pen_AV=100%). As linhas azuis referem-se à seção 1, a qual apresenta bifurcação do fluxo

de tráfego; as laranjas, à seção 2, onde existem dois pontos de acesso à rodovia; e as cinzas, ao trecho em estudo homogêneo, da seção 3.

Figura 14 – Perfis horários de fluxo, velocidade média, taxa de ocupação e trocas de faixas das seções de análise



(fonte: elaborada pela autora)

Observa-se nas seções 2 e 3 do cenário 1 que a partir de 7800 segundos (às 8h55min da manhã) inicia-se um período de congestionamento, caracterizado pela redução abrupta da velocidade, do volume e das trocas de faixa, bem como pelo aumento da taxa de ocupação. Por outro lado, no cenário 2 esse fenômeno não é observado, com exceção de um breve período de congestionamento na seção 3, evidenciando a melhora no fluxo de tráfego gerada pela inserção de AVs.

Embora ocorra um aumento relativo no número de trocas de faixa da seção 2 no cenário 2 em relação ao cenário 1, a análise dos perfis horários não é suficiente para concluir que essa variável cresce com o aumento no percentual de AVs na frota. Para avaliar o efeito do aumento do número de trocas de faixas com a inserção de veículos autônomos na rodovia, o próximo tópico realiza uma análise do número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional dos cenários aqui descritos.

4.5 NÚMERO DE EVENTOS EM QUE O TTC É MENOR DO QUE 3,6

O elevado número de mudanças de faixas observado nos perfis horários, na Figura 14, enfatiza as peculiaridades do tráfego no trecho em estudo. Ultrapassagens e trocas de faixa são frequentes devido à alta diferença nos fluxos e velocidades médias e entre faixas de tráfego. Contudo, usualmente essas variáveis estão relacionadas a um aumento no número de conflitos e acidentes (CALEFFI, 2018). Para verificar os impactos dos veículos autônomos quanto à segurança viária do trecho em estudo, fez-se necessária uma análise do número de eventos que seriam considerados conflitos para veículos convencionais, com o auxílio do software SSAM.

O SSAM permite avaliar diferentes indicadores, os quais têm relação direta com a segurança viária, como (CALEFFI, 2018):

- a) perfil dos conflitos indicativos de colisão traseira ao longo do período de simulação;
- b) perfil dos conflitos indicativos de colisão por mudança de faixas ao longo do período de simulação;
- c) perfil de TTC ao longo do período de simulação.

Para este estudo foram realizadas análises de eventos que seriam conflitos entre veículos convencionais para o cenário base (frota de veículos convencionais) e para o cenário com 100% da frota autônoma. O SSAM analisou dados de trajetória de veículos extraídos do VISSIM. Cada cenário foi simulado cinco vezes de forma aleatória. Os valores apresentados representam a média do número de eventos identificados como eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional. Os tópicos a seguir apresentam os resultados, divididos conforme as seções de análise.

4.5.1 Análise da seção 1

Na análise da frequência de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional, foram realizadas comparações quanto às medidas: número total de conflitos, conflitos de colisão traseira e conflitos por mudanças de faixa da seção 1, para o cenário base e para o cenário com uma frota totalmente autônoma. A Tabela 9 apresenta o número de eventos considerados conflitos, bem como sua classificação e a porcentagem de variação dos resultados entre os cenários avaliados.

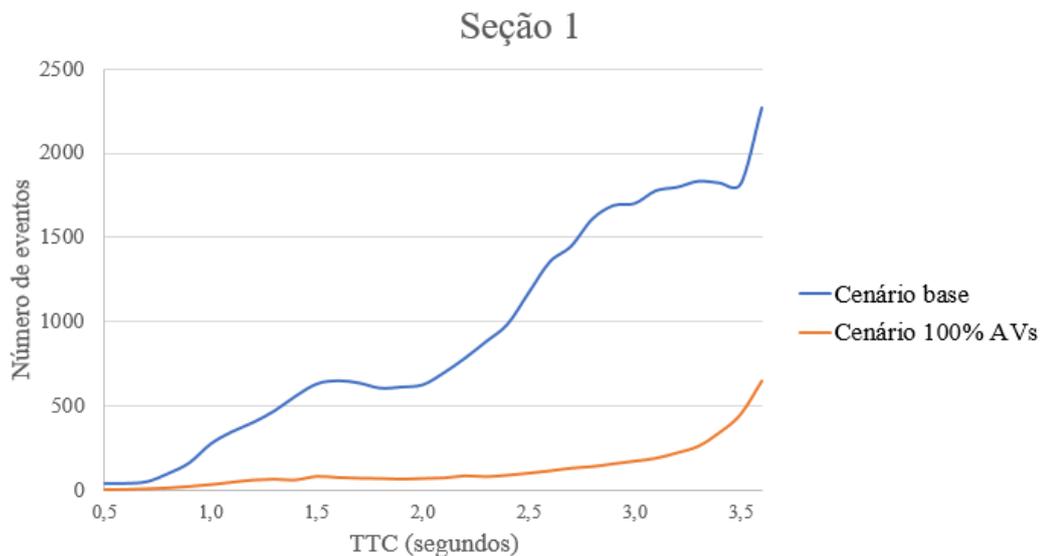
Tabela 9 – Síntese do número de eventos com TTC menor do que 3,6 registrados com o SSAM para a seção 1

| | Conflito de colisão traseira | Conflito de colisão por mudança de faixa | Total |
|-------------------------|-------------------------------------|---|--------------|
| <i>Cenário base</i> | 27.514 | 3.583 | 31.097 |
| <i>Cenário 100% AVs</i> | 4.548 | 803 | 5.351 |
| <i>Diferença</i> | 83% | 78% | 83% |

(fonte: elaborada pela autora)

A Figura 15 apresenta a relação entre o número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional e os diferentes tempos até a colisão (TTC). A margem de valores TTC avaliados variou de 0,5 a 3,6 segundos, medidos na coleta de dados de campo.

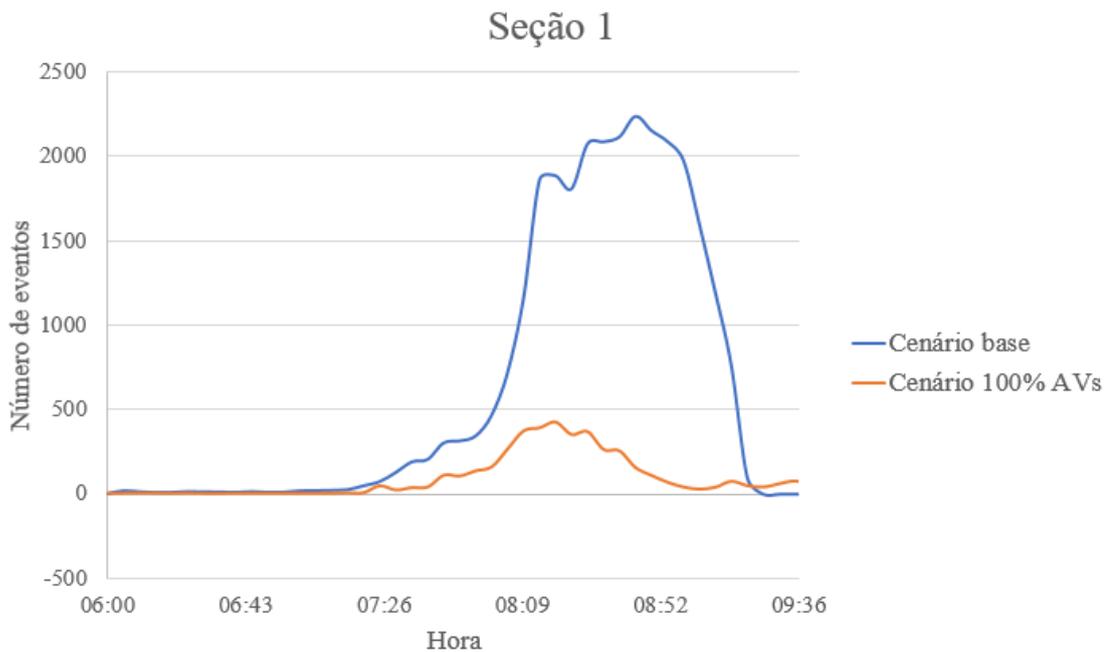
Figura 15 – Relação entre a frequência de eventos que seriam considerados conflitos para os veículos convencionais e o TTC para a seção 1



(fonte: elaborada pela autora)

Observa-se que o número de eventos com TTC menor do que 3,6 para o cenário com 100% da frota de veículos autônomos é bastante inferior ao encontrado para o cenário base, para qualquer valor de TTC e para todos os tipos de eventos classificados pelo SSAM. A Figura 16 apresenta a relação entre o número de eventos de seriam considerados conflitos para a frota convencional e o período da simulação.

Figura 16 – Relação entre o número de eventos com TTC menor do que 3,6 e o período simulado para a seção 1



(fonte: elaborada pela autora)

O gráfico da Figura 16 também apresenta uma grande redução no número de eventos que seriam considerados conflitos para os veículos convencionais do cenário 100% autônomo em relação ao cenário base, identificando que os AVs trazem benefícios para a segurança viária, como a diminuição do número de eventos que seriam considerados conflitos de trânsito para a frota convencional.

4.5.2 Análise da seção 2

A mesma análise quanto ao número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota base foi realizada para a seção 2 do segmento em estudo. A Tabela 10 apresenta os resultados entre os cenários avaliados.

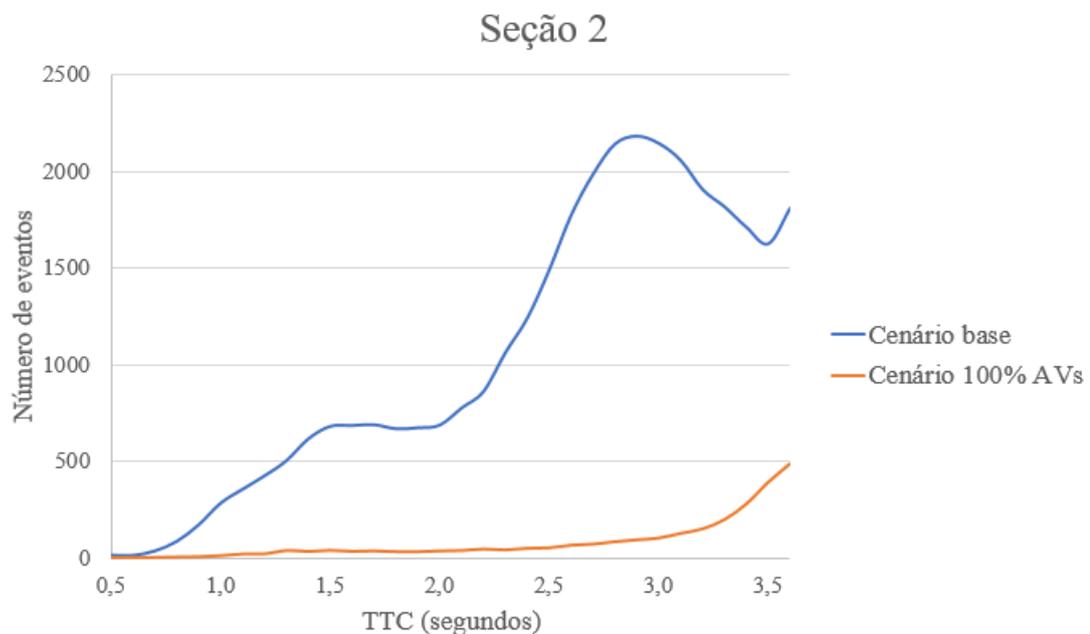
Tabela 10 – Síntese do número de eventos com TTC menor do que 3,6 registrados com o SSAM para a seção 2

| | Conflito de colisão traseira | Conflito de colisão por mudança de faixa | Total |
|-------------------------|-------------------------------------|---|--------------|
| <i>Cenário base</i> | 34.931 | 990 | 35.921 |
| <i>Cenário 100% AVs</i> | 2.646 | 211 | 2.857 |
| <i>Diferença</i> | 92% | 79% | 92% |

(fonte: elaborada pela autora)

O número de eventos com TTC menor do que 3,6 classificados como conflitos de colisão traseira e o número de conflitos totais apresentam uma redução de 92% com uma frota totalmente autônoma sobre os veículos convencionais. A Figura 17 apresenta o gráfico da frequência desses eventos e dos diferentes tempos até a colisão (TTC). Os limiares do TTC avaliados foram coletados em campo e variam entre 0,5 e 3,6 segundos.

Figura 17 – Relação entre a frequência de eventos que seriam considerados conflitos para os veículos convencionais e o TTC para a seção 2

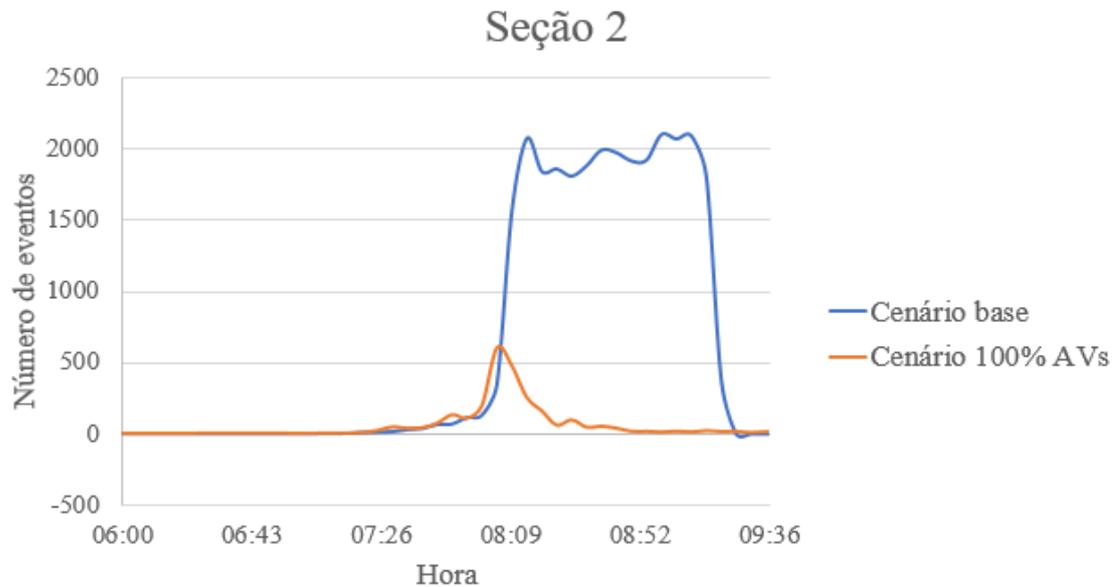


(fonte: elaborada pela autora)

Para a seção 2, foi observado um aumento de 132,7% no número de trocas de faixa nos 30 minutos de volume máximo observado na rodovia com a introdução de AVs. Entretanto, o número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional

do cenário apenas com veículos autônomos é bastante reduzido com relação ao cenário base, como pode ser observado nas Figuras 17 e 18.

Figura 18 – Relação entre o número de eventos com TTC menor do que 3,6 e o período simulado para a seção 2



(fonte: elaborada pela autora)

Observa-se que apesar do grande número de mudanças de faixa, não é identificado um aumento no número de eventos considerados conflitos para a frota convencional. A propósito, os valores encontrados são significativamente menores do que os vistos no cenário base, e podem refletir a melhoria na segurança viária que os recursos dos AVs devem proporcionar aos usuários da rodovia.

4.5.3 Análise da seção 3

Por fim, também foram avaliados os números de eventos com TTC menor do que 3,6 na seção 3 do segmento da rodovia. A Tabela 11 apresenta os resultados da diferença percentual entre os cenários avaliados.

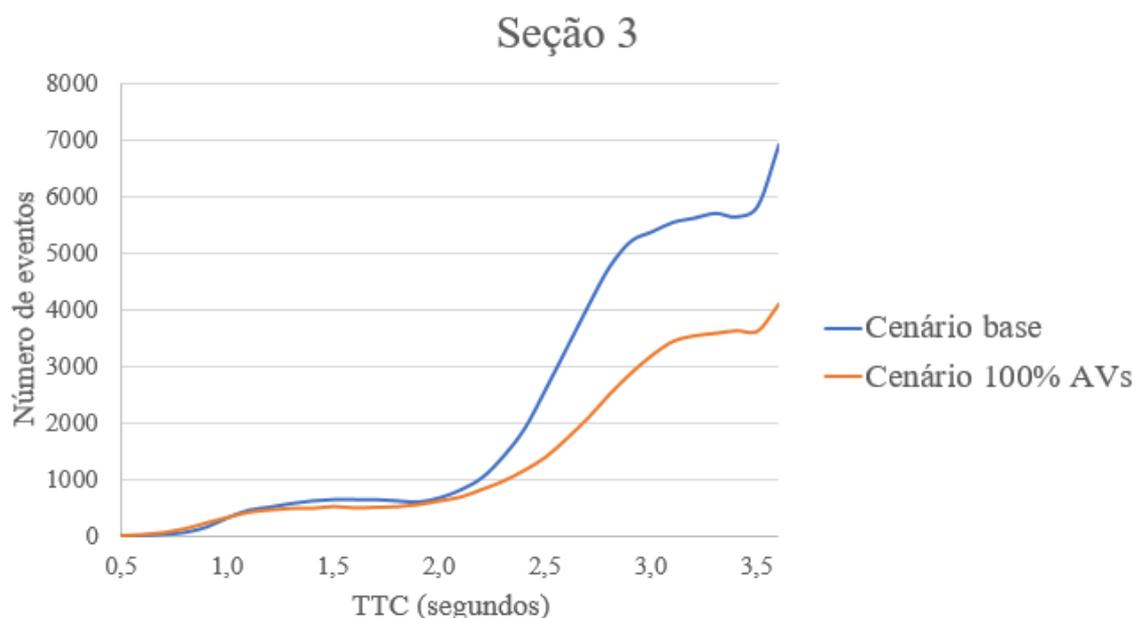
Tabela 11 – Síntese do número de eventos com TTC menor do que 3,6 registrados com o SSAM para a seção 3

| | Conflito de colisão traseira | Conflito de colisão por mudança de faixa | Total |
|-------------------------|-------------------------------------|---|--------------|
| <i>Cenário base</i> | 79.528 | 504 | 80.032 |
| <i>Cenário 100% AVs</i> | 46.468 | 289 | 46.757 |
| <i>Diferença</i> | 42% | 43% | 42% |

(fonte: elaborada pela autora)

Observa-se que na seção 3 o número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional é bem mais alto em relação às demais seções de estudo. Além disso, as reduções do número de eventos com TTC menor do que 3,6 no cenário com AVs em comparação ao cenário base foram menores do que as anteriormente vistas. Isso se deve ao fato de que a seção em análise se encontra em um segmento da via que apresenta 3 faixas de tráfego, com características de tráfego homogêneas. Além disso, o local possui um alto volume de tráfego observado por faixa (alta taxa de ocupação), quando comparado às demais seções de estudo, pois recebe o acréscimo de volume do fluxo de veículos advindos da Ponte do Guaíba. A Figura 19 apresenta a relação do número de eventos que seriam considerados conflitos para os veículos convencionais com o TTC.

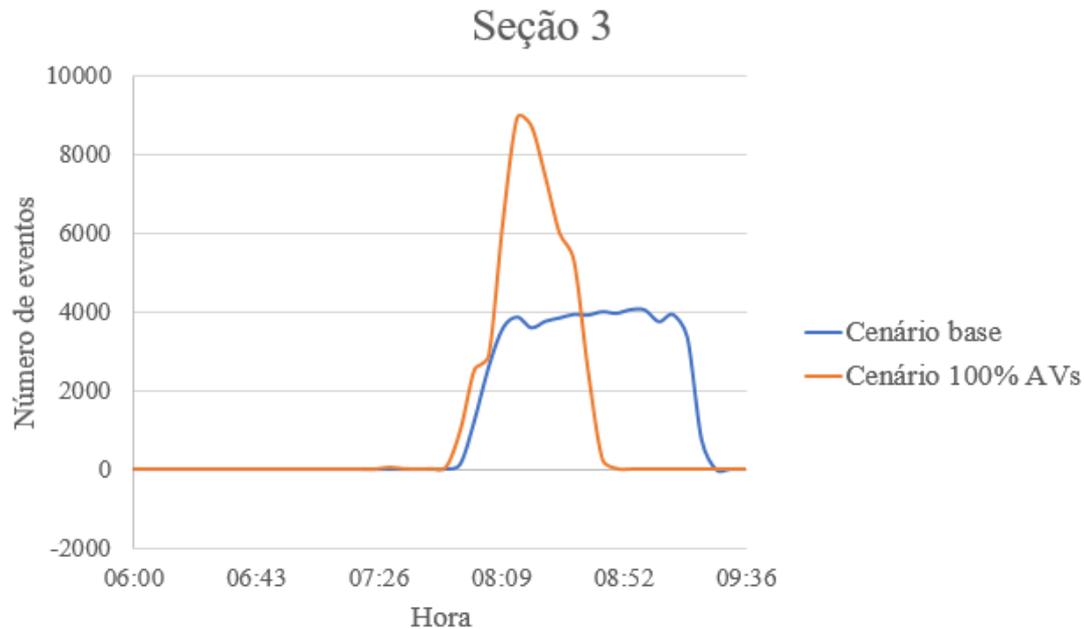
Figura 19 – Relação entre a frequência de eventos que seriam considerados conflitos para os veículos convencionais e o TTC para a seção 3



(fonte: elaborada pela autora)

Neste local, vê-se que o número de eventos para tempos até a colisão (TTC) até 3,6 do cenário com 100% da frota autônoma são mais altos, diferente do perfil do gráfico observado nas demais seções. A Figura 20 apresenta a distribuição do número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota base ao longo do período simulado.

Figura 20 – Relação entre o número de eventos com TTC menor do que 3,6 e o período simulado para a seção 3



(fonte: elaborada pela autora)

O gráfico apresenta um pico bem acentuado para o número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional no cenário 100% AVs, superando o cenário base. O fenômeno pode ser explicado com base nos perfis horários apresentados na Figura 14. Vê-se que no mesmo período de tempo simulado a seção apresenta uma queda abrupta da velocidade, acompanhada pelo aumento da taxa de ocupação. Além de a seção apresentar essa taxa de ocupação muito elevada, o trecho em análise sofre os efeitos dos congestionamentos que ocorrem a montante, na entrada da capital. Somado ao grande volume de veículos que esse segmento absorve dos acessos a jusante, os veículos tendem a trafegarem mais próximos uns aos outros, uma vez que aumenta a taxa de ocupação da rodovia.

Ainda, veículos autônomos trafegam com menores *headways* e possuem recursos que os tornam mais assertivos (agressivos) quanto à movimentação lateral e longitudinal, bem como são equipados para conseguirem realizar ações evasivas. Ocorre que o software SSAM utiliza padrões de calibração de parâmetros para veículos convencionais, que podem não

caracterizar conflitos entre dois veículos autônomos, já que utilizam *headways* mais curtos. Uma vez que, nessas condições de alta ocupação da rodovia, os AVs se encontram muito próximos uns aos outros, o SSAM pode estar identificando conflitos em eventos com TTC extremos que não ocorreriam em um cenário 100% AVs. Nesse contexto, é provável que em função das habilidades dos veículos autônomos os TTC sejam menores dos que os observados para a frota convencional. Ainda, os eventos identificados podem não corresponder a uma situação real de riscos para uma frota autônoma, que apresenta mais habilidades, aumentando a capacidade de passar pelo conflito sem converter em acidente. Isso reforça a hipótese de que AVs levam a menos conflitos e a um ambiente seguro.

Como os veículos autônomos têm uma variabilidade no perfil de velocidade desejada quase nula (SUKENNIK, 2018), espera-se que uma frota composta apenas por AVs trafeguem com velocidades mais harmônicas e menores diferenças de velocidades entre veículos e, assim, retardar o aparecimento de congestionamentos, reduzir o número de ultrapassagens e conflitos. Além disso, AVs têm melhor desempenho em relação ao tempo de reação e frenagem. Dessa forma, o aumento do número de troca de faixas pode não acarretar em aumento no número de conflito, variáveis que são comumente observadas e diretamente relacionadas em estudos de segurança viária.

As conclusões quanto à redução dos eventos que seriam caracterizados conflitos para a frota convencional com a inserção de veículos autônomos no tráfego devem ser cautelosas. Papadoulis *et al.* (2019), Morando *et al.* (2018) e Rahman *et al.* (2018) sugerem que os valores de TTC para os AVs podem ser menores do que os observados para os veículos convencionais, reduzindo ainda mais a probabilidade de ocorrer conflitos com essa classe de veículos. Além disso, AVs são equipados com recursos como desaceleração automática, avisos de potenciais conflitos antecipadamente e manobras evasivas automáticas. Nesse sentido, o número de conflitos poderia ser substancialmente reduzido.

Por fim, veículos autônomos contam com sensores e software que permitem uma visão abrangente do ambiente em uma variedade de condições de iluminação e clima. Eles podem aprender e se adaptar rapidamente a novas situações de condução, aprendendo com a experiência anterior por meio de atualizações de software. A contabilização total do potencial de salvar vidas de veículos autônomos, no entanto, exigirá um gerenciamento cuidadoso de

riscos à medida que novas tecnologias são introduzidas e adotadas em todo o sistema de transporte de superfície (U.S. DOT, 2018).

Contudo, Bhavsar *et al.* (2017) estudaram os riscos associados à falha de um veículo autônomo SAE Nível 4 em fluxos de tráfego misto. A análise resultou em uma probabilidade de falha de cerca de 14%, resultante de uma falha sequencial dos componentes autônomos durante a vida útil do veículo, particularmente os componentes responsáveis pela automação. Depois que a probabilidade de falha dos componentes autônomos do veículo foi combinada com a probabilidade de falha dos componentes da infraestrutura de transporte, foi encontrada uma probabilidade geral de falha relacionada aos componentes veiculares ou da infraestrutura de 158 por 1 milhão de milhas de viagem. Motoristas humanos imprudentes foram considerados a principal preocupação para veículos autônomos no fluxo de tráfego misto. No entanto, com o aumento da penetração de veículos autônomos no mercado, esse cenário pode mudar e reduzir a probabilidade de falhas para uma navegação autônoma mais segura.

Conforme estudos de Morando *et al.* (2017), os benefícios de segurança dos AVs variam entre 15% e 52%, dependendo das taxas de penetração e do limiar do TTC para conflitos AV-AV. No geral, embora os resultados demonstrem que o limiar de TTC para conflitos AV-AV é um fator importante na identificação de possíveis eventos considerados conflitos para veículos convencionais, eles mostram consistentemente os benefícios de segurança dos AVs, particularmente com altas taxas de penetração. Comportamentos mais assertivos dos AVs, como *headways* menores e aceleração mais agressiva, foram explicitamente considerados.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho tratou da análise operacional de veículos autônomos em tráfego misto rodoviário no Brasil. O objetivo geral foi avaliar os impactos da penetração de veículos autônomos, em tráfego misto, no desempenho operacional de uma rodovia brasileira com múltiplas faixas, através de simulações de tráfego do segmento em estudo, com o auxílio do software VISSIM.

A análise dos impactos da inserção de veículos autônomos para o desempenho operacional dos cenários estudados apresentou resultados positivos. Foi observado que o aumento da taxa de penetração de AVs no fluxo de veículos poderia trazer mudanças significativas em relação ao cenário base, segundo as variáveis de resposta estudadas no projeto de experimentos realizado. Os principais benefícios são observados em regiões onde há mais conflitos, caso das seções S2 (que contém convergências de fluxo de tráfego) e S3 (seção homogênea que é afetada pelo congestionamento a jusante). A seção S1, uma bifurcação do tráfego, apresenta os menores benefícios de modo geral.

Uma redução do atraso de 96,1%, acompanhado de um aumento na velocidade de 83,7%, na seção 2, indica que a introdução de veículos autônomos na frota de veículos convencionais da rodovia é capaz de diminuir os períodos de congestionamento e o atraso nas viagens, bem como o tempo de viagem.

O aumento de 132,7% no número de trocas de faixa em regiões de conflito sugere que condições otimizadas de tráfego são geradas pela inserção de AVs na rodovia, uma vez que também é observada uma melhora geral no tráfego. Contudo, isso pode ser acompanhado de efeitos indesejáveis para os veículos convencionais, já que as trocas de faixa geradas podem criar um ambiente hostil para motoristas e acarretar um aumento no número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional. Porém, ao serem realizadas análises do número de eventos que seriam considerados conflitos para a frota convencional no SSAM, os resultados para a seção 2 apontaram para reduções de até 92% no número de conflitos totais.

Os resultados sugerem que os AVs podem melhorar significativamente a segurança com altas taxas de penetração, mesmo quando viajam com *headways* menores para melhorar a

capacidade da rodovia e reduzir o atraso. A abordagem baseada em simulação apresentada neste documento fornece uma ferramenta importante para avaliar os impactos na segurança dos AVs, principalmente quando há dados empíricos muito limitados sobre o desempenho de segurança dos AVs.

A capacidade de replicar como os AVs agirão dentro de uma rede rodoviária do mundo real é limitada devido ao fato de a tecnologia ainda estar sendo desenvolvida. Pode ser necessário desenvolver novas medidas de segurança substitutas para os AVs devido a seus diferentes comportamentos. Para tirar conclusões mais confiáveis sobre os impactos gerais de segurança de AVs em uma grande rede rodoviária, mais testes com várias configurações de rede sob condições de tráfego variadas e taxas de penetração de AV podem ser necessários (MORANDO *et al.*, 2017).

Em se tratando da percentagem de penetração de veículos autônomos capaz de trazer benefícios significativos ao fluxo de tráfego da rodovia estudada, a análise de variância aponta que desde níveis mais baixos de inserção de AVs (cerca de 20%) na frota podem ser identificados impactos positivos estatisticamente significativos, como a redução do atraso e do tempo de viagem e o aumento da velocidade. Entretanto, a análise da capacidade para períodos congestionados indica que taxas abaixo de 60% não apresentam grandes benefícios para a fluidez do tráfego em geral.

Contudo, por enquanto, as referências estudadas que trataram de AVs em simulações de tráfego tiveram de fazer simplificações. Há incerteza inerente associada à previsão. Embora fundamentado em trabalhos anteriores, foi necessário fazer uma série de suposições sobre a futura penetração e capacidade dos AVs. Isso levanta uma série de questões-chave para os formuladores de políticas, em relação à capacidade disponível em AVs e à penetração e absorção de AVs. A capacidade dos veículos autônomos será adaptada pelos fabricantes automotivos às demandas do usuário. Como a indústria automotiva não é cobrada com a operação segura e eficiente da rede rodoviária, os benefícios máximos para o desempenho da rede podem não ser obtidos (ATKINS, 2016).

Além disso, benefícios substanciais podem não ser alcançados até altos níveis de conectividade e automação, como ao desempenho da rede, particularmente em situações congestionadas de alta velocidade e alto fluxo. Há evidências de que, em baixas penetrações, quaisquer AVs assertivos são limitados pelo comportamento de outros veículos e que os

veículos não são capazes de usar sua capacidade aprimorada. É importante ressaltar que os benefícios são maiores em redes congestionadas, que são limitadas pelo nível de densidade de tráfego que pode ser alcançado (ATKINS, 2016).

Portanto, para obter conclusões confiáveis sobre os impactos gerais de segurança de AVs em uma rede rodoviária de grande porte, mais testes com várias configurações de rede em condições de tráfego de amplo alcance e taxas de penetração AV podem ser necessários (MORANDO *et al.*, 2017).

Como sugestões para trabalhos futuros, a revisão da literatura identificou uma série de lacunas de conhecimento que devem ser consideradas prioridades para pesquisas futuras. Algumas delas oferecem oportunidades particulares de análise quantitativa por meio de modelagem de tráfego, como:

- a) considerar diferentes ambientes operacionais: grande parte da incerteza em torno do comportamento de veículos conectados e autônomos está relacionada a cenários particulares. A variedade de infraestrutura e condições de tráfego é grande, fazendo com que pesquisas específicas sejam necessárias. Afinal, os tipos de comportamento (logo, os impactos) dos AVs em vias urbanas, em autoestrada de fluxo livre, em rodovias de pista simples e em interseções urbanas são marcadamente diferentes;
- b) estudar a preferência do usuário: os estudos mostram o potencial de veículos conectados e autônomos impactarem a capacidade das vias. Dado o estado de incerteza sobre como veículos autônomos podem ser capazes de melhorar a operação de tráfego, esses impactos não necessariamente se traduzem nos desejos do usuário. Por isso, é importante considerar a heterogeneidade da escolha do usuário na frota de veículos;
- c) realizar estudos empíricos: a literatura ainda trabalha com muita incerteza em torno do comportamento de veículos autônomos. Uma lacuna a ser preenchida seria focar em testes com veículos autônomos para identificar os parâmetros de segurança viária e comportamento dos veículos necessários, a fim de caracterizá-los nos softwares de microssimulação de tráfego e análise de conflitos;

REFERÊNCIAS

- ASHBY, A. **The Disruptive Impact of Connected & Autonomous Vehicles on Mobility**. Ricardo Global Automotive (EMEA), 2018.
- ATKINS. DEPARTMENT FOR TRANSPORT. **Research on the impacts of connected and autonomous vehicles (CAVs) on traffic flow**. Summary Report Department for Transport Atkins, 2016.
- BHAVSAR, P.; DAS, P.; PAUGH, M.; DEY, K.; CHOWDHURY, M. **Risk analysis of autonomous vehicles in mixed traffic streams**. Transportation Research Record, v. 2625, p. 51–61, 2017.
- BERRADA, J.; LEURENT, F. **Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicles: A State of the Art**. Transportation Research Procedia, v. 27, p. 215–221, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.077>>.
- BIERSTEDT, J.; GOOZE, A.; GRAY, C.; PETERMAN, J. RAYKIN, L.; WALTERS, J. **Effects of next-generation vehicles on travel demand and highway capacity**. Estados Unidos, 2014.
- BOHM, F.; HÄGER, K. **Introduction of Autonomous Vehicles in the Swedish Traffic System: Effects and Changes Due to the New Self-Driving Car Technology**. , p. 52, 2015.
- CALEFFI, F. **Proposição de um método de harmonização da velocidade baseado em modelo de previsão de conflitos veiculares**. p. 130, 2018. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/179552>>.
- CALEFFI, F.; ANZANELLO, M. J.; CYBIS, H. B. B. **A multivariate-based conflict prediction model for a Brazilian freeway**. 1 January 2017, 98:295-302.
- CHANG, J.; WANG, Z.; XIAO, T.; XIN, X. **Modeling and simulations on automated vehicles to alleviate traffic congestion** Mathematical Models in Engineering. 3. 112-125. 10.21595/mme.2017.19302.
- COPPOLA, P.; SILVESTRI, F. **Autonomous vehicles and future mobility solutions**.

Elsevier Inc., 2019.

DAHL, A.; FLÉCHON, C.; SUKENNIK, P.; WALTHER, C. **Microscopic Simulation and Impact Assessment of the Coexistence of Automated and Conventional Vehicles in European Cities**. European Transport Conference 2018, p. 1–13, 2018.

ERTRAC. W.; DRIVING, A. **Connected Automated Driving Roadmap Status: final for publication**. , 2019. Disponível em: <https://connectedautomateddriving.eu/wp-content/uploads/2019/04/ERTRAC-CAD-Roadmap-03.04.2019-1.pdf?fbclid=IwAR3ynV7OpUc07zO3Y1PqQKe4S5xgY_sW8kMbnocwTZ7S78Cfz8upjPKRKpo>. .

ELEFTERIADOU, L. **An Introduction to Traffic Flow Theory**. Nova Iorque, 1984.

ELEFTERIADOU, L. **An introduction to traffic flow theory**. New York: Springer, 2014.

FAGNANT, D.J., KOCKELMAN, K. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. 2015. Pract. 77, 167–181. doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) SOFTWARE USER MANUAL. Publication No. FHWA-HRT-08-050. Washington DC, 2008.

FOUNTOULAKIS, M.; BEKIARIS-LIBERIS, N.; RONCOLI, C.; PAPAMICHAIL, I. **Highway traffic state estimation with mixed connected and conventional vehicles: Microscopic simulation-based testing**. 1761-1766. 10.1109/ITSC.2016.7795796.

FYFE, M. R. W. **Safety Evaluation of Connected Vehicle Applications Using Micro-simulation**. December, 2016.

HAIR, J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., E ANDERSON, R. E. (2009) **Multivariate Data Analysis**. (Pearson Prentice Hall, Ed) (Seventh Ed.).

LI, DUO & ZHAO, YIFEI & RANJITKAR, PRAKASH & ZHAO, HAIJIANG & BAI, QIANG. **A Hybrid Approach for Variable Speed Limit Implementation and Application**

to Mixed Traffic Conditions with Connected Autonomous Vehicles. IET Intelligent Transport Systems. 12. 10.1049/iet-its.2017.0090.

MAHMASSANI, H. S. **50th Anniversary invited article autonomous vehicles and connected vehicle systems:** Flow and operations considerations. Transportation Science, v. 50, n. 4, p. 1140–1162, 2016.

MAHMASSANI, H. S. **Autonomous Vehicles and Connected Vehicle Systems: Flow and Operations Considerations.** Estados Unidos, 2016.: <doi.org/10.1287/trsc.2016.0712>.

MONTGOMERY, D.C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley and Sons, New York, 3a Ed., 1991, 649p.

MORANDO, M. M. M. M.; TIAN, Q.; TRUONG, L. T. L. T.; et al. Study extract: **Capacity effect of autonomous vehicles.** Transportation Research Procedia, v. 3, n. August, p. 1–44, 2017. Elsevier B.V. Disponível em:
<http://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/adl_study_capacity_impact_autonomous_driving_study_extract_1.pdf>. .

MORANDO, M. M.; TIAN, Q.; TRUONG, L. T.; VU, H. L. **Studying the Safety Impact of Autonomous Vehicles Using Simulation-Based Surrogate Safety Measures.** Journal of Advanced Transportation, v. 2018, 2018.

PAPADOULIS, A.; QUDDUS, M.; IMPRIALOU, M. **Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways.** Accident Analysis and Prevention, v. 124, p. 12–22, 2019. doi.org/10.1016/j.aap.2018.12.019

POLIS. **Road Vehicle Automation and Cities and Regions Mobility & Traffic Efficiency.** European Cities and Regions Networking for Innovative Transport Solutions, 2018.

PTV GROUP. **PTV VISSIM 11 user manual:** v. 11.0. Karlsruhe, Alemanha, 2018.

PTV GROUP. **PTV VISSIM AND CONNECTED AUTONOMOUS VEHICLES.** Karlsruhe, Alemanha, 2018.

RAHMAN, M. S.; ABDEL-ATY, M.; WANG, L.; LEE, J. **Understanding the highway safety benefits of different approaches of connected vehicles in reduced visibility**

conditions. Transportation Research Record, v. 2672, n. 19, p. 91–101, 2018.

RAHMAN, M. S.; ABDEL-ATY, M.; LEE, J.; RAHMAN, M. H. **Safety benefits of arterials' crash risk under connected and automated vehicles.** Transportation Research Part C 100 (2019) 354–371. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.029>

RODIER, C.; JALLER, M.; POURRAHMANI, E.; *et al.* **Automated Vehicle Scenarios: Simulation of System-Level Travel Effects Using Agent-Based Demand and Supply Models in the San Francisco Bay Area.** , p. 51p, 2018. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/4dk3n531%0Ahttps://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/37167%0Ahttps://trid.trb.org/view/1560037>>. .

SAGIR, FASIL AND SATISH V. UKKUSURI. **“Mobility Impacts of Autonomous Vehicle Systems.”** 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (2018): 485-490.

SAE INTERNATIONAL J3016. **Levels of driving automation.** 2014.

STANEK, D.; HUANG, E.; MILAN, R. T.; WANG, T. A. **Measuring Autonomous Vehicle Impacts on Congested Networks Using Simulation.** Estados Unidos, 2017.

SUKENNIK, P. **D2.5 Micro-simulation guide for automated vehicles.** CoEXist. V 1.0. PTV Group, 2018.

U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Preparing for the Future of Transportation: Automated Vehicles 3.0.** Estados Unidos, 2018.

ZECHIN, D. **Influência da chuva nos parâmetros de calibração do microssimulador de tráfego PTV VISSIM.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ZHU, W.; ZHANG. H. M. **Analysis of mixed traffic flow with human-driving and autonomous cars based on car-following model.** Physica A. Statistical Mechanics and its Applications, Elsevier, vol. 496(C), pages 274-285.