

ANÁLISE DOS IMPACTOS DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS EM UMA RODOVIA BRASILEIRA

Laísa Braga Kappler¹

Douglas Zechin²

Felipe Caleffi³

Helena Beatriz Bettella Cybis⁴

^{1, 2, 4} Laboratório de Sistema de Transportes - LASTRAN; Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
³ Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Campus Cachoeira do Sul - RS

RESUMO

Este artigo busca avaliar os impactos da inserção de veículos autônomos no tráfego de uma rodovia brasileira com múltiplas faixas. Foi realizado um projeto de experimentos para criar cenários com variações dos níveis de penetração desses veículos em relação aos veículos convencionais, do volume da rodovia e modo de direção do sistema autônomo. Utilizou-se o VISSIM para avaliar velocidade, ocupação, tempo de viagem, atraso e número de troca de faixas. Os parâmetros comportamentais dos veículos autônomos foram baseados no projeto CoEXist. O efeito dos fatores controláveis foi avaliado por análise de variância. Os resultados encontrados indicaram redução no atraso, diminuição dos períodos de congestionamento e aumento no número de trocas de faixa.

ABSTRACT

In this article we evaluate the impacts of the insertion of autonomous vehicles in the traffic of a multilane Brazilian highway. An experiment was carried out to create scenarios with different levels of penetration rate of autonomous vehicles in relation to conventional vehicles, highway volume and steering mode of the autonomous system. The VISSIM was used to evaluate speed, occupancy, travel time, delay and lane change. The behavioral parameters of the autonomous vehicles were based on the CoEXist project. The effects of the experiment's controllable parameters were evaluated through analysis of variance. The main results were reduction of delay, reduction of congestion periods and increase in the number of lane changes.

1. INTRODUÇÃO

Economias e estilos de vida modernos propõem mudanças nos sistemas de transportes existentes com o uso de novas tecnologias. Veículos autônomos, também chamados de AVs, estão entre os principais desafios do transporte no século XXI. Avanços tecnológicos associados à conectividade e 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) completam que as características dos AVs visam a reduzir a quantidade e severidade de acidentes, aumentar a mobilidade de pessoas com deficiência e idosos, reduzir emissões e utilizar a infraestrutura de forma eficiente.

A ascensão desses veículos demanda a avaliação do seu impacto na corrente de tráfego nas vias, uma vez que a inserção de novas tecnologias tende a prejudicar a operação viária, inicialmente. No entanto, acredita-se que essa tecnologia será introduzida aos poucos na indústria e mercado automobilísticos, primeiramente com veículos com menores níveis de automação até veículos totalmente autônomos (Zhu e Zhang, 2018). Além disso, espera-se que o índice de penetração dos AVs terá um aumento gradativo na corrente de tráfego. O tráfego misto corresponde a prováveis cenários de implantação da tecnologia, na longa transição para 100% de AVs (Mahmassani, 2016).

No contexto brasileiro, Caleffi *et al.* (2017) destacam que o comportamento dos motoristas é mais agressivo se comparado a outros países, bem como as condições de tráfego no trecho em estudo não são homogêneas e cada faixa 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 impactará o desempenho operacional de uma rodovia brasileira.

O objetivo deste artigo é avaliar os impactos de veículos autônomos em tráfego misto, no desempenho operacional de uma rodovia brasileira com múltiplas faixas, com simulação de tráfego no software VISSIM. A seção 2 apresenta o referencial teórico sobre os AVs e simulação com tráfego misto. Na seção 3 é apresentada a metodologia utilizada neste estudo, como os parâmetros adotados, a calibração da rodovia e o projeto de experimentos. As seções 4 e 5 contêm, respectivamente, a análise dos resultados e os comentários finais sobre o estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Veículos autônomos oferecem uma ampla variedade de benefícios potenciais. Um deles é o aprimoramento das operações de tráfego (como diminuição do congestionamento e do atraso) 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, estabilidade e segurança do tráfego. Enquanto as barreiras vistas como as mais críticas são: aceitação de novas tecnologias e fatores sociais e legais (Bohm e Häger, 2015).

Veículos autônomos provavelmente serão uma tecnologia cada vez mais disponível no futuro (Atkins, 2016), em que é esperada uma transformação no conceito de veículos no mercado. Sua ascensão leva à necessidade de avaliar a mudança de comportamento que eles podem provocar nas vias. A fim de embasar e contextualizar o estudo, esta seção apresenta a revisão de literatura sobre veículos autônomos e simulação de tráfego misto.

2.1. Definição de veículos autônomos

A literatura reporta múltiplas definições para veículos autônomos. A classificação mais ampla diferencia veículos altamente automatizados de totalmente automatizados (Atkins, 2016). Os primeiros necessitam de um motorista para assumir o controle manual do veículo, em casos extremos; os últimos são capazes de completar viagens com segurança em todas as condições de tráfego, estrada e clima, enquanto os ocupantes utilizam seu tempo para outras atividades.

A referência mais citada para definir os níveis de condução de AVs foi publicada pela SAE International (2014) padrão J3016. A classificação divide-se em seis níveis: desde o nível zero (sem automação) até o nível 5 (autonomia total do veículo), descritos na Tabela 1. O primeiro é usado para descrever a frota base de veículos de passageiros e mercadorias (Atkins, 2016). Os conceitos fazem uma distinção sobre quem monitora o ambiente de direção, se o motorista humano ou o sistema de condução automatizado. Essa classificação depende da intervenção e atenção do motorista, e não das capacidades do veículo.

Tabela 1: Níveis de automação de condução (adaptada da SAE J3016, 2014)

Nível SAE	Nome	Direção, aceleração e desaceleração	Monitoramento do ambiente condução	Reação à condição emergencial	Capacidade 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/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

Contudo, existem outras definições a serem consideradas ao se trabalhar com modelos

microscópicos de tráfego, como a proposta pelo CoEXist (Sukennik, 2018). Esse 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, com diferentes estruturas urbanas e composições de tráfego, a fim de analisar seus efeitos na infraestrutura viária, em tráfego misto. Os conceitos de comportamentos de condução foram adaptados a partir dos testes e, embora nem todos sejam realistas, são necessários para fins de comparação e pesquisa (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, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Comportamentos dos AVs 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, o veículo se comporta como se estivesse em uma faixa fisicamente segregada.
<i>cauteloso</i>	O veículo observa a estrada e os obstáculos e sempre adota um comportamento seguro. Mantém headways 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 a 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.

Com a automação da navegação veicular, os veículos têm o potencial de se tornar conectados e interagir com redes externas, como outros veículos (V2V), infraestrutura (V2I) ou fornecimento de informações. Alguns benefícios podem ser realizados sem uma conexão específica (Atkins, 2016). Porém, AVs conectados V2V são capazes de formar trens virtuais e, se recebessem informações antecipadas da conexão V2I, contribuiriam para aumentar a capacidade (Stanek *et al.*, 2017). Em geral, os AVs contêm a característica de conectividade em seu sistema. Portanto, neste artigo será utilizado somente o termo veículos autônomos.

Esses veículos implicam mudanças na demanda, oferta de serviços e no desempenho operacional de rede e instalações (Mahmassani, 2016). Embora 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 operador, em termos de confiabilidade, menor tempo de viagem e atraso (Atkins, 2016).

Entretanto, é reconhecido que esses veículos 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).

2.2. Simulação de tráfego com veículos autônomos

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 e Häger, 2015), Hungria (Berrada e Leurent, 2017), Grécia (Fountoulakis *et al.*, 2017), China (Li *et al.*, 2018; Chang *et al.*, 2017) e Austrália (Morando *et al.*, 2017). Porém, esse não tem sido um tema explorado no Brasil.

Como a maioria das tecnologias e regulamentações dos AVs ainda está em desenvolvimento, há poucos dados empíricos 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 (Stanek *et al.*, 2017), como o VISSIM. Esse 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 esses 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. E, a curto e médio prazo, eles serão obrigados a interagir no mesmo espaço viário.

O CoEXist realiza testes para entender a influência do comportamento desses veículos em tráfego misto. 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) 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).

3. MÉTODO

Este artigo versa sobre a análise das operações de tráfego envolvendo veículos autônomos e convencionais em uma rodovia no Brasil. A avaliação foi realizada a partir de um projeto de experimentos para diversos níveis de automação, volumes e comportamentos do sistema. A mensuração foi feita por meio de simulações de tráfego no VISSIM, com relação ao desempenho dos veículos, quanto à velocidade, ocupação, tempo de viagem, atraso e número de troca de faixas. Os tópicos a seguir apresentam a metodologia utilizada.

3.1. Região de estudo

O estudo foi realizado em um trecho da rodovia BR-290, na região metropolitana de Porto Alegre (RS), apresentado na Figura 1. A região é caracterizada por ter um acesso à Ponte do Guaíba e a aproximação de entrada à capital. A rodovia é a principal ligação entre Porto Alegre e demais cidades do entorno, em que se destacam os movimentos diários pendulares,

com dois picos bem definidos. Foi estudado o sentido da via interior-capital, o qual apresenta uma concentração de fluxo de veículos maior pela manhã. O trecho apresenta congestionamentos relacionados aos gargalos existentes nas aproximações da capital.

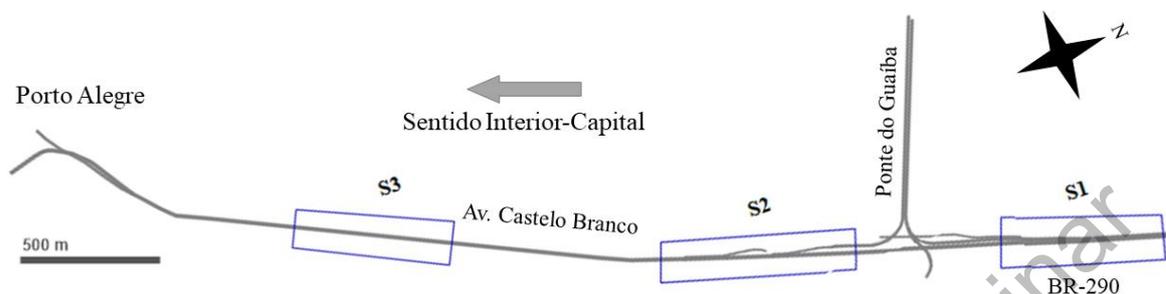


Figura 1: Região de estudo e seu perfil de fluxo típico

Os dados de tráfego foram obtidos a partir de laços indutivos presentes no km 94, com 5 faixas, localizado a 5 km do centro de Porto Alegre, de 2016 e 2017. Os detectores estão a 200 m de distância de uma bifurcação da rodovia: as 2 faixas à direita formam o acesso à Ponte do Guaíba e uma saída lateral, enquanto 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 após esses detectores: um é a alça de acesso à ponte e os demais se encontram distantes a 1,1 e 1,4 km. Por essa razão, foram criadas três seções de análise com características de fluxo de tráfego distintas, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Seções de análise

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
S3	Fluxo homogêneo	Trecho sem alterações de tráfego, antes do acesso a POA

A demanda da via de manhã inicia com cerca de 2.000 veíc/h, atinge 7.500 veíc/h no pico e, após, reduz para 4.000 veíc/h. O intervalo de simulação compreendeu 3h45min (entre às 6h e às 9h45min), com 2h30min de hora-pico. Assim, 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.

3.2. Projeto de experimentos

Este estudo foi desenvolvido a partir de um projeto de experimentos, que definiu o conjunto de cenários simulados por meio do microssimulador VISSIM. O projeto dos experimentos considerou quatro variáveis como fatores controláveis, a fim de entender seu papel nas operações de tráfego. A Tabela 4 apresenta os fatores controláveis e seus respectivos níveis.

Tabela 4: Fatores controláveis e níveis.

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

O fator “Semente aleatória” foi bloqueado no projeto para diminuir o termo do erro. Ele representa que cada condição fora simulada quatro vezes de forma randômica, para

representar a aleatoriedade do que ocorre na prática. 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 seu comportamento.

O fator “AV em nível alto” representa o modo de direção do sistema do veículo autônomo. Essa variável depende da escolha do usuário e define o comportamento do sistema. O estudo contemplou apenas os comportamentos Normal e Agressivo. 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 usuários brasileiros. Esse fator indica o comportamento de veículos autônomos predominante, com uma proporção de 2:1. Por exemplo, quando o AV_Alto é “Normal”, 66% dos AVs têm comportamento normal e 34%, agressivo – o inverso ocorre para o nível “Agressivo”.

O atributo “% Volume máximo” refere-se à percentagem do fluxo de veículos máximo na via em relação ao volume observado atualmente. Ele varia de 20% a 100%, em cinco níveis. A variável “Taxa de penetração de AVs” diz respeito à percentagem de veículos autônomos introduzidos no fluxo de veículos total, em relação aos veículos convencionais. O nível baixo corresponde ao cenário base, em que não há AVs percorrendo o trecho em estudo. O nível mais alto corresponde a um cenário com toda a frota de veículos composta por AVs.

O projeto contemplou um total de seis variáveis de respostas, são elas: atraso; taxa de ocupação; troca de faixa no período total de análise; troca de faixa no pico de volume (30 min); tempo de viagem; e velocidade média. A Tabela 5 apresenta essas variáveis, juntamente com o local da seção avaliada (n) e sua abreviação. Todos os resultados consideraram um $\alpha=0,05$, isto é, um intervalo de 95% de confiança para avaliar se há diferença significativa entre os efeitos. O tempo de viagem e o delay foram avaliados para o trecho completo a fim de verificar a contribuição da inserção de veículos autônomos para a corrente de tráfego geral.

Tabela 5: Variáveis de resposta

Variáveis de resposta	Seção de análise	Abreviação	Unidade
Delay	Trecho completo	Delay	s
Taxa de ocupação	Seções	Ocup_n	-
Troca de faixa	Seções	TF_n	-
Troca de faixa – 30min pico de Volume	Seções	TFp_n	-
Tempo de viagem	Trecho completo	T_viagem	s
Velocidade média	Seções	Vel_n	m/s

3.3. Parâmetros de comportamentais

Para as simulações, os parâmetros comportamentais dos veículos normais foram obtidos do estudo de Caleffi (2018) e as considerações referentes à infraestrutura, rotas e volumes, de Zechin (2019). Ambas as calibrações ocorreram para o trecho avaliado neste artigo.

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). Conforme recomendação do autor, 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. Foi definido que os AVs Agressivos teriam seu headway (parâmetro CC1) igual ao dos AVs Normais quando estivessem seguindo um veículo convencional.

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no estudo. Os resultados do projeto de experimentos contemplam análise de variância, avaliação dos efeitos principais e das interações dos fatores controláveis e comparação da magnitude dos efeitos da inserção de AVs no tráfego sobre as variáveis de resposta. Também é apresentada uma análise dos efeitos dos AVs sobre a capacidade do trecho, no perfil horário das variáveis de resposta estudadas.

As simulações necessárias para a realização do projeto de experimentos foram organizadas por meio de uma rotina elaborada em linguagem Python. Ao todo foram realizadas 525 simulações e o tempo decorrido de simulação foi de 18h em um computador Windows 10 de 64 bits, com processador Intel Core i5-8500 de 3,00GHz e 32GB de memória RAM.

4.1. Análise de variância

Os efeitos dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta foram avaliados por meio de análise de variância, considerando-se também interações entre dois e três fatores. A Tabela 6 apresenta os p-valores encontrados. Os efeitos destacados em negrito dos fatores controláveis indicam significância com um nível de confiança de 95%, e os demais não são significativos. Os números 1, 2 e 3 são referentes às seções de análise de desempenho.

Tabela 6: p-valores obtidos com a análise de variância

Variável Resposta	Fatores Controláveis							
	Blocos	Volume	AV_alto	Pen_AV	Volume*AV_alto	Volume*Pen_AV	AV_alto*Pen_AV	Volume*AV_alto*Pen_AV
Vel_1	9,0E-01	0,0E+00	1,4E-01	0,0E+00	1,4E-02	0,0E+00	4,5E-01	1,0E+00
Vel_2	0,0E+00	0,0E+00	6,7E-02	0,0E+00	3,6E-01	0,0E+00	7,6E-01	1,0E+00
Vel_3	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	6,0E-03	4,0E-03
Ocup_1	5,9E-01	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,1E-02	5,4E-02
Ocup_2	0,0E+00	0,0E+00	4,3E-01	0,0E+00	7,4E-01	0,0E+00	1,0E+00	1,0E+00
Ocup_3	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	3,8E-02	1,9E-02
TF_1	8,4E-02	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	3,0E-03
TF_2	0,0E+00	0,0E+00	3,8E-02	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	2,5E-01
TF_3	3,0E-01	0,0E+00	1,7E-01	0,0E+00	3,0E-03	0,0E+00	8,6E-01	1,4E-01
TFp_1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,0E-03	8,0E-03
TFp_2	0,0E+00	0,0E+00	1,0E-03	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,0E-01	4,3E-02
TFp_3	2,5E-01	0,0E+00	3,7E-01	0,0E+00	4,8E-01	0,0E+00	9,1E-01	9,8E-01
T_viagem	0,0E+00	0,0E+00	1,6E-01	0,0E+00	2,2E-01	0,0E+00	9,5E-01	1,0E+00
Delay	0,0E+00	0,0E+00	1,7E-01	0,0E+00	2,2E-01	0,0E+00	9,5E-01	1,0E+00

A análise de variância indica que o efeito dos fatores controláveis foi significativo em 69,64% das avaliações feitas. Os fatores Volume, Pen_AV e sua interação se mostraram significativos para todas as variáveis de resposta avaliadas, indicando 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, bem como combinadas.

Os efeitos do fator AV_alto e sua interação com outros fatores indicam que a escolha entre AVs com comportamento Normal ou Agressivo não influencia significativamente no tempo de viagem, no atraso, na velocidade e ocupação da seção S2 e nas trocas de faixa da seção S3.

De modo geral, o efeito dos blocos é significativo. Isso sugere que a abordagem de blocagem nas repetições, com a variação controlada da semente aleatória utilizada para geração de estocasticidade pelo simulador, contribui para aumentar a precisão dos experimentos. Os efeitos principais e de interação obtidos pelo projeto de experimentos são apresentados nas seguintes subseções.

4.2. Efeitos principais

Os efeitos principais dos fatores controláveis Volume e Pen_AV são omitidos do corpo deste trabalho, uma vez que a interação entre esses fatores é significativa e será estudada. O fator AV_alto, contudo, apresentou poucos casos de efeito de interação com outros fatores. Portanto, seus efeitos principais significativos são apresentados na Figura 2 em termos da diferença percentual do valor das variáveis de resposta em relação ao cenário base, o qual contempla apenas veículos convencionais.

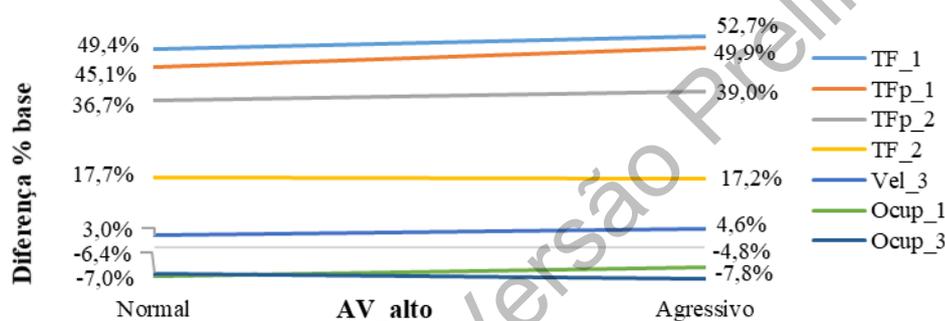


Figura 2: Efeitos principais significativos de AV_alto

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. Contudo, as diferenças de efeito de AV_alto sobre as variáveis de resposta são pequenas quando comparadas aos padrões comumente observados em engenharia de tráfego, embora sejam estatisticamente significativas. Como os efeitos de AV_alto são pequenos, também serão omitidos do trabalho.

4.3. Efeitos de interação

Entre as interações avaliadas, a que se mostrou significativa para a maior parte das variáveis de resposta foi a Volume*Pen_AV. Os gráficos dessas interações são apresentados na Figura 3. Observa-se um comportamento diferenciado das variáveis de resposta avaliadas sobre os níveis de Volume até 0,6 e sobre Volume maior ou igual a 0,8. O efeito de interação indica que quanto maior o volume, maiores são os efeitos do percentual de veículos autônomos no tráfego. No eixo x são apresentados os valores da penetração de AVs na corrente de tráfego e o eixo y se refere às variáveis respostas mencionadas no título de cada gráfico.

O aumento percentual de AVs se mostra benéfico para o tráfego por aumentar a velocidade média enquanto reduz a taxa de ocupação, o tempo de viagem e o atraso. O número de trocas de faixa nas seções de divergência e convergência de tráfego aumenta, o que usualmente está relacionado a um aumento no número de conflitos e acidentes (Caleffi, 2019). Contudo, a ocorrência combinada dos fenômenos citados sugere que o comportamento mais assertivo dos AVs permite que as condições de tráfego sejam otimizadas para padrões diferentes dos usuais.

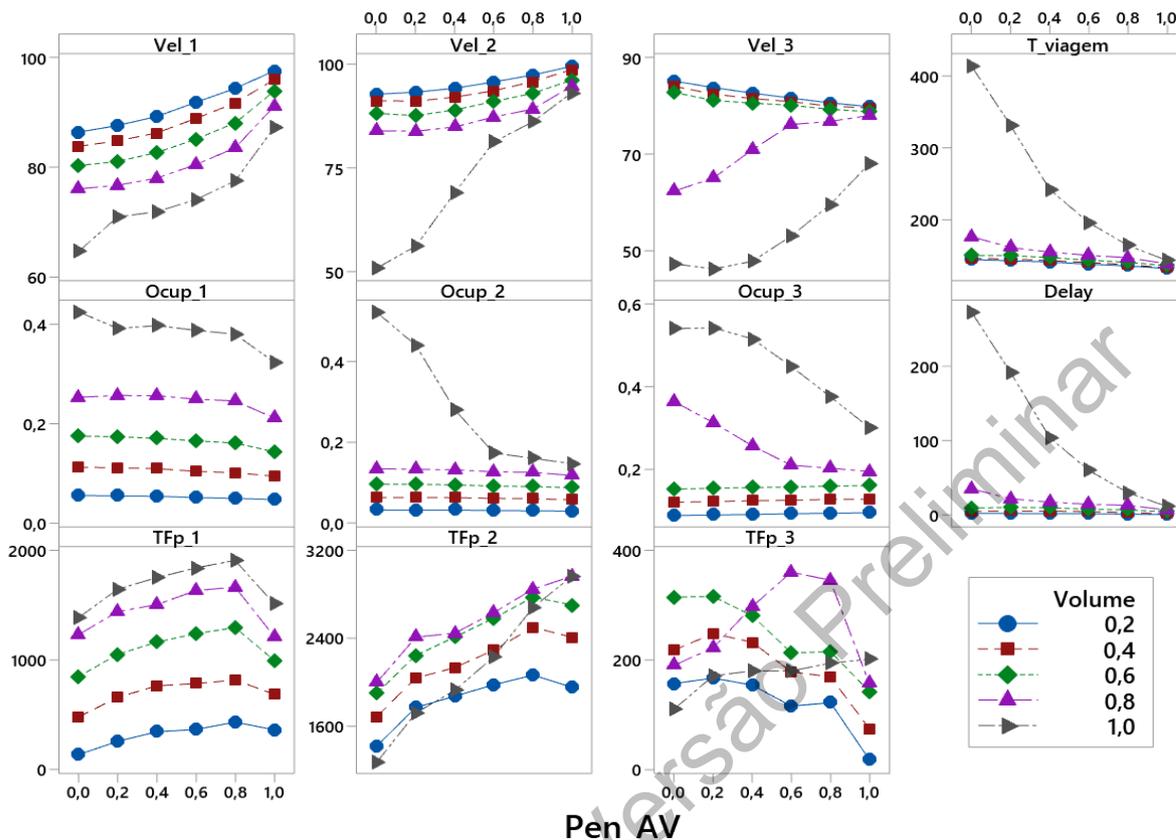


Figura 3: Efeitos da interação Volume*Pen_AV (unidades mencionadas na Tabela 5)

O nível Volume=1,0 refere-se ao fluxo existente na via em análise no período do estudo. Dessa forma, as análises da variação do efeito de Pen_AV sobre esse nível representam o efeito que veículos autônomos teriam na via nas condições de fluxo atual. A Tabela 6 apresenta o percentual da diferença dos efeitos entre o cenário base (fluxo de tráfego de veículos convencionais atual) e um cenário com 100% da frota de veículos autônomos.

Tabela 6: Efeitos de Pen_AV para Volume = 1,0 ordenados por magnitude do efeito

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

Os valores indicam que o aumento no percentual de veículos autônomos surte maiores efeitos na seção S2, onde há convergência do fluxo, enquanto a região de divergência é menos afetada. As reduções de 96,1% no atraso e de 65,5% no tempo de viagem, acompanhadas das comparações possíveis de serem feitas pela Figura 3, sugerem que o aumento no número de veículos autônomos gera condições de tráfego mais fluidas.

4.4. Influência na capacidade

A influência na capacidade decorrida da inserção de veículos autônomos na via foi avaliada ajustando-se o nível Volume para 1,2 vezes o volume atualmente observado, a fim de garantir que ocorra o *breakdown*. Um detector foi inserido na simulação imediatamente a jusante da seção S2, onde há convergência entre o fluxo principal e dois acessos. Considerou-se como capacidade o valor de 95% do volume máximo observado em intervalos de 5 minutos. Os resultados são apresentados na Figura 4, ajustados com polinômio de grau 2.

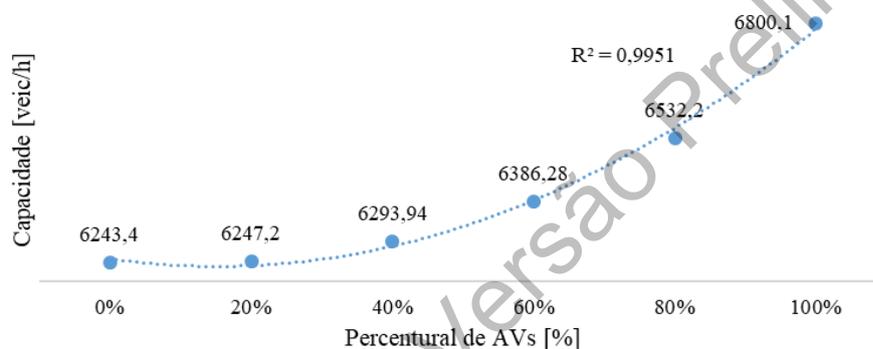


Figura 4: Influência de Pen_AV na capacidade do trecho estudado

As análises sugerem que a relação Pen_AV x Capacidade é bem ajustada a um polinômio de grau 2, com $R^2=0,9951$. O efeito do aumento da penetração de AVs na capacidade da via é pequeno para percentuais menores e atinge 8,9% para 100% da frota de veículos autônoma.

Para melhor compreender os efeitos dos veículos autônomos, comparou-se o perfil horário de fluxo, velocidade, taxa de ocupação e trocas de faixa, apresentados na Figura 5. Para essa análise foram criados dois cenários com o fator Volume=100%, para representar a situação de fluxo semelhante à existente na via. No primeiro cenário utilizou-se Pen_AV no nível 0, para representar uma situação sem veículos autônomos, e no segundo cenário foi utilizado Pen_AV=100%, para representar uma situação com apenas AVs.

Observa-se, nas seções S2 e S3 do cenário 1, que a partir de 7800 segundos se inicia um 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 S3, evidenciando a melhora no fluxo de tráfego gerada pela inserção de AVs.

Embora seja observado um aumento relativo no número de trocas de faixa no cenário 2 em relação ao cenário 1 durante o congestionamento, a análise não é suficiente para concluir que essa variável cresce com o aumento no percentual de AVs na via. Contudo, no período que precede o congestionamento, o número de trocas de faixa é maior no cenário 2. Sugere-se que em condições não-congestionadas isso ocorre, corroborando o que é apresentado na Figura 3.

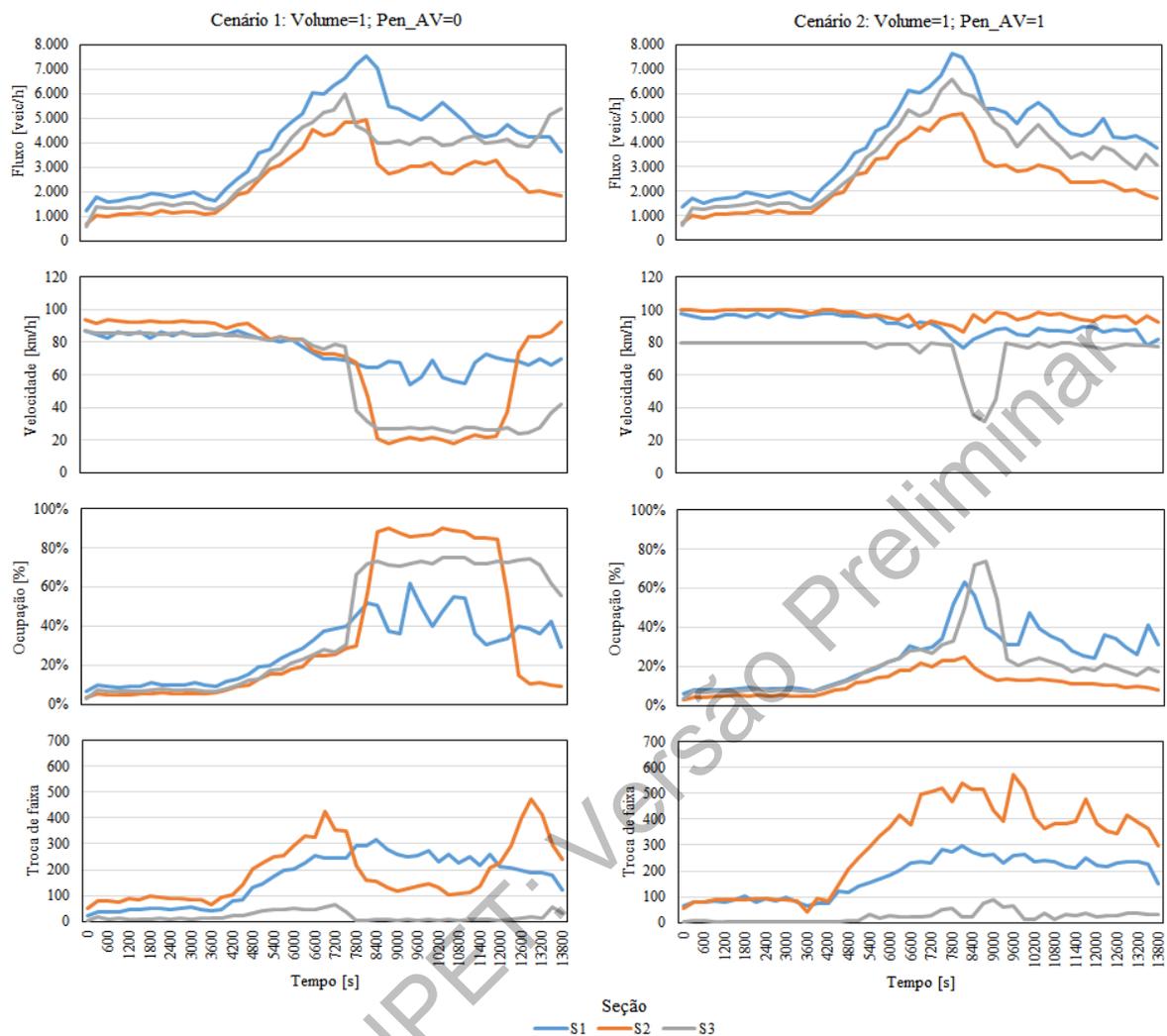


Figura 5: Perfil horário de fluxo, velocidade, taxa de ocupação e troca de faixa

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Este artigo buscou avaliar os impactos da penetração de veículos autônomos no tráfego de uma rodovia brasileira. Os resultados indicam que a inserção de AVs é benéfica para o tráfego, 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 e S3. 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.

O aumento de 132,7% no número de trocas de faixa em regiões de conflito indica 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 conflitos. Uma análise de conflitos e dos efeitos por classe de veículo é recomendada para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkins, Department For Transport. (2016) Research on the impacts of connected and autonomous vehicles (CAVs) on traffic flow. *Atkins*.
- Berrada, J. e Leuren, F. (2017) Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicles: A State of the Art. *Transportation Research Procedia*. Hungria.
- Bierstedt, J.; Gooze, A.; Gray, C.; Peterman, J. Raykin, L.; Walters, J. (2014) Effects of next-generation vehicles on travel demand and highway capacity. *FP Think*. Estados Unidos.
- Bohm, F. e Häger, K. (2015) Introduction of Autonomous Vehicles in the Swedish Traffic System: Effects and Changes Due to the New Self-Driving Car Technology. *Uppsala Universitet*. Suécia.
- Caleffi, F. (2018) Proposição de um método de harmonização da velocidade baseado em modelo de previsão de conflitos veiculares. *Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre.
- Caleffi, F.; Anzanello, M. J.; Cybis, h. B. B. (2017) A multivariate-based conflict prediction model for a Brazilian freeway. *Accident Analysis & Prevention*, 98, 295–302. doi:10.1016/j.aap.2016.10.025
- Caleffi, F.; Moisan, Y.; Cybis h. B. B. (2016) Analysis of an Active Traffic Management System proposed for a brazilian highway. *IJETAE*, 6, 2.
- Chang, J.; Wang, Z.; Xiao, T.; Xin, X. (2017) Modeling and simulations on automated vehicles to alleviate traffic congestion. *Mathematical Models in Engineering*, 3, 2, 112-125. doi.org/10.21595/mme.2017.19302
- Dahl, A.; Sukennik, C. F. P.; Walther, C. (2018) Microscopic simulation and impact assessment of the coexistence of automated and conventional vehicles in european cities. *European Transport Conference*.
- Fagnant, D. J. e Kockelman, K. (2015) Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 77, 167–181. doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003
- Fountoulakis, M.; Bekiaris-Liberis, N.; Roncoli, C.; Papamichail, I. (2017) Highway traffic state estimation with mixed connected and conventional vehicles: Microscopic simulation-based testing. *Transp. Res. Part C: Emerg. Tech* 78, 13-33. doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.015
- Fyfe, M. R. W. (2016) Safety Evaluation of Connected Vehicle Applications Using Micro-Simulation. *Dissertação de mestrado*. University of British Columbia, Canada.
- Li, D.; Zhao, Y.; Ranjtkar, P.; Zhao, H.; Bai, Q. (2018) Hybrid approach for variable speed limit implementation and application to mixed traffic conditions with connected autonomous vehicles. *IET Intelligent Transport Systems* 12, issue: 5, 6, 327-334.
- Mahmassani, H. S. (2016) Autonomous Vehicles and Connected Vehicle Systems: Flow and Operations Considerations. *Transportation Science* 50, 4. doi.org/10.1287/trsc.2016.0712
- Morando, M. M.; Truong, L. T.; Vu, H. L. (2017) Investigating safety impacts of autonomous vehicles using traffic micro-simulation. *Australasian Transport Research Forum*.
- PTV. (2018) PTV VISSIM and connected autonomous vehicles. Karlsruhe, Alemanha.
- Rodier, C.; Jaller, M.; Pourrahmani, E.; Bischoff, J.; Freedman, J.; Pahwa, A. (2018) Automated Vehicle Scenarios: Simulation of System-Level Travel Effects Using Agent-Based Demand and Supply Models in the San Francisco Bay Area. *UC Davis: National Center for Sustainable Transportation*. Estados unidos.
- SAE INTERNATIONAL J3016. (2014) Levels of driving automation.
- Stanek, D.; Huang, E.; Milan, R. T.; Wang, T. A. (2017) Measuring Autonomous Vehicle Impacts on Congested Networks Using Simulation. *Transportation Research Board 97th Annual Meeting*. Paper Number: 18-04585
- Sukennik, P. (2018) D2.5 Micro-simulation guide for automated vehicles. *CoExist*. V 1.0. PTV Group.
- Zhu, W. e Zhang, H. M. (2018) Analysis of mixed traffic flow with human-driving and autonomous cars based on car-following model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 496, 274-285.
- Zechin, D. (2019) 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.

Laísa Braga Kappler (laisakappler@hotmail.com)

Douglas Zechin (douglaszechin@gmail.com)

Felipe Caleffi (f.caleffi@yahoo.com)

Helena Beatriz Bettella Cybis (helenabc@producao.ufrgs.br)

^{1, 2, 4} Laboratório de Sistema de Transportes – LASTRAN, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 – Porto Alegre, RS, Brasil

³ Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Campus Cachoeira do Sul
Rua Ernesto Barros, 1345 – Cachoeira do Sul, RS, Brasil