

UMA PROPOSTA DE ANÁLISE DO IMPACTO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS SOBRE ASPECTOS LOGÍSTICOS DO SISTEMA VIÁRIO ATUAL

Paula Naomi Muniz dos Santos

João Batista Camargo Júnior

Lúcio Flávio Vismari

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Apesar da expressiva quantidade de trabalhos relacionados aos veículos autônomos, poucos são encontrados sobre a coexistência de veículos autônomos e convencionais no sistema viário. O comportamento dos veículos autônomos é abordado majoritariamente visando analisar a tecnologia envolvida para a comunicação entre os veículos ou a segurança destes dispositivos. Desta forma, o objetivo da pesquisa é avaliar o impacto, do ponto de vista logístico, no comportamento do tráfego em vias com veículos convencionais e autônomos simultaneamente. Através de simulação computacional utilizando ferramentas tradicionais e de código aberto, este trabalho analisa, como a inclusão crescente de veículos autônomos no sistema viário convencional afeta o comportamento dinâmico dos veículos. Cenários de tráfego foram modelados e considerados neste estudo, e sobre eles se concluiu, de forma quantitativa, que os veículos trafegam com maior fluidez (menor tempo em fila e maiores velocidades medias) quando toda a frota de veículos presente em uma rota é autônoma.

ABSTRACT

Despite the abundance of research related to autonomous vehicles, few are found on the coexistence of autonomous and conventional vehicles. The behavior of autonomous vehicles is often approached to analyze aspects such as the technology involved in the communication between vehicles or the safety of these devices. This research has the objective of evaluating the impact, from the logistic point of view, of the traffic behavior in conventional and autonomous vehicles simultaneously. Through computer simulation using traditional and open source tools, this paper analyzes how the growing inclusion of autonomous vehicles in the conventional road system affects the dynamic behavior of vehicles. Traffic scenarios were modeled and considered in this study, and quantitatively concluded that vehicles travel more fluidly (less queuing time and higher average speeds) when the entire fleet of vehicles present in a route is autonomous.

1. INTRODUÇÃO

Os seres humanos quase sempre imaginam cidades futuristas como um cenário onde os meios de transporte seriam inteligentes, não sendo necessário controle humano algum para que os veículos trafegassem em perfeita harmonia.

Inúmeras são as pesquisas sobre os veículos autônomos atualmente. Acredita-se que em um futuro não muito distante, todos os veículos terão características autônomas, ou seja, serão aptos a trafegarem nas vias sem necessidade de interferência ou controle humano. Atualmente, veículos autônomos vêm sendo testados em ambientes controlados (vias de teste) e, onde as autoridades de trânsito locais permitem, também em vias públicas. Nestes casos, os veículos autônomos em desenvolvimento coexistem com os demais elementos do sistema de tráfego (como outros veículos tripulados e pedestres). O estado da Califórnia nos Estados Unidos, de acordo com o Departamento de Veículos Motorizados (2018) foi um dos pioneiros a permitir este tipo de testes, cujo exemplo foi seguido por outros estados americanos e locais do planeta.

Apesar da abundância de pesquisas relacionadas aos veículos autônomos, poucas são encontradas sobre a coexistência de veículos autônomos e convencionais no sistema viário. O comportamento dos veículos autônomos é abordado muitas vezes visando analisar aspectos como a tecnologia envolvida para a comunicação entre os veículos ou a segurança destes dispositivos. São poucos os trabalhos com objetivos de avaliar o desempenho logístico

resultante da inserção de veículos autônomos na malha viária atual com tráfego de veículos convencionais, situação esta de passagem inevitável neste processo de evolução.

Assim, esta pesquisa tem o objetivo de avaliar, por meio de simulação computacional, quais as alterações sofridas por uma malha viária decorrentes da variação da proporção de veículos convencionais (com motoristas) e autônomos. Desta forma, pretende-se compreender como a inclusão de veículos autônomos no período de transição afetará o comportamento no tráfego dos veículos. Critérios como velocidade média dos veículos, distância total percorrida e tempo em fila foram utilizados na avaliação dos cenários simulados.

Este trabalho está organizado em cinco seções. A seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica, definindo o conceito de veículo autônomo, os potenciais benefícios e as principais incertezas sobre o futuro das cidades com relação ao comportamento dos veículos convencionais e autônomos trafegando simultaneamente. A seção 3 apresenta materiais e métodos utilizados no modelo de simulação utilizado, os parâmetros definidos para a caracterização dos veículos autônomos e convencionais e a diferenciação entre os cenários. A seção 4 apresenta uma avaliação dos resultados obtidos por meio das simulações. Por fim, a seção 5 apresenta as conclusões obtidas por meio deste trabalho, bem como os trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Petterson e Karlsson (2015), veículos autônomos não necessitam de um condutor humano. Estes veículos possuem a capacidade de navegar, decidir, prever e agir de forma inteligente em situações habituais e críticas. Para Azmat (2015), existem três fatores que determinam se um carro pode ou não ser considerado um veículo autônomo: navegabilidade inteligente, hardwares (câmeras e sensores) e inteligência artificial, para comunicação com centro de controle e comando. A Sociedade de Engenheiros Automotivos (2017) classifica os veículos autônomos em 6 diferentes categorias, de acordo com o nível de automação que possui, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Níveis de automação de veículos

Nível de Automação	Descrição
0	O veículo não possui qualquer autonomia. O condutor do veículo é o único responsável por todas as ações e decisões.
1	A automação está presente em apenas uma ou duas funções do veículo, e este emite alertas e informações ao condutor.
2	O veículo possui algumas funções autônomas, mas o condutor precisa estar atento a todas suas ações e as vias ao seu redor.
3	O veículo é conduzido pelo usuário mas não é necessária a completa atenção às vias. O condutor toma o controle apenas em situações de emergência, mas com um intervalo de tempo suficiente para esta transição de controle.
4	O veículo é projetado para possuir autonomia para trafegar nas cidades em condições favoráveis. O motorista pode ter a opção de controlar o veículo manualmente.
5	O veículo é projetado para possuir total autonomia para trafegar nas cidades mesmo em condições críticas. O usuário deverá apenas informar o local de destino e não precisará tomar o controle do veículo em nenhuma situação, a não ser que seja de seu desejo.

O tamanho estimado do mercado de veículos autônomos em 2015 era de 31 bilhões de euros, de acordo com a Comissão Europeia (2015). Tanto investimento financeiro, científico e industrial para o tema de veículos autônomos justifica-se pelas possibilidades de benefícios que estes veículos potencialmente podem trazer à sociedade, como por exemplo:

- § Redução de engarrafamentos: Os veículos autônomos terão inteligência para escolher as melhores rotas, evitando o acúmulo de veículos numa mesma via.
- § Aumento da mobilidade urbana: Schoettle e Sivak (2015) sugerem que ocorrerá o crescimento da mobilidade urbana, considerando que os indivíduos inaptos a dirigir poderão ser usuários dos veículos autônomos sem restrição.
- § Redução na emissão de gases poluentes: Chen et al. (2016) afirmam que existe uma sinergia natural entre as tecnologias aplicadas nos veículos autônomos e a substituição dos combustíveis fósseis, principal fonte de energia dos veículos convencionais. Além disso, os veículos autônomos serão aptos a desenvolver um perfil de velocidade ótima, com poucas variações, nas vias, não exigindo a queima desnecessária de combustível para troca de marcha e acelerações e frenagens desnecessárias.
- § Aumento da segurança no trânsito: Sivak e Schoettle (2015) através de suas pesquisas, concluíram em que a expectativa de extinguir totalmente os acidentes fatais no trânsito é, na prática, utópica. No entanto, como Singh (2015) estima que aproximadamente 90% dos acidentes são causados por erro humano, acredita-se que o tráfego de veículos será mais seguro do que nos dias atuais.

Para que todas os benefícios sejam convertidos em realidade e o cenário de coexistência entre veículos autônomos e convencionais seja concretizado, as cidades precisarão se adaptar. De acordo com Schank (2012), além dos investimentos em infraestrutura e melhorias operacionais, as leis que regulamentam o trânsito deverão ser revisitadas, a fim de incorporar estes novos tipos de veículos.

Maurer et al. (2016) afirmam que os veículos autônomos poderão alterar a forma como o solo é utilizado nas cidades. Por exemplo, grandes áreas para estacionamentos poderão ser substituídas por ciclovias ou calçadas maiores para pedestres, ou por parques e edifícios.

Segundo Bose e Ioannou (2003), a introdução dos veículos autônomos no mercado ocorrerá de forma gradual, assim como foi com a inclusão da tecnologia dos freios ABS, Air Bags e computadores de bordo. Contudo, passados mais de uma década desde esta afirmação, ainda não está clara a forma como os veículos autônomos serão inseridos, e afetarão, os sistemas de transporte existentes. Este ambiente de incertezas em torno do futuro dos veículos autônomos faz com que o planejamento das cidades seja uma tarefa complexa. McGehee (2016) aponta como questionáveis os seguintes aspectos:

- § Capacidade das vias: as vias terão menor capacidade devido ao comportamento menos assertivo nas interseções que não possuem semáforos (as incertezas são em torno da prioridade de locomoção: pedestres e veículos convencionais terão prioridade de locomoção?); ou as vias terão maior capacidade, devido ao comportamento mais assertivo devido à possibilidade de menor espaçamento entre os veículos, tempos de reação reduzidos nas saídas dos semáforos, fluxos harmônicos e menores ocorrências de acidentes.
- § Distância total percorrida por veículo: aumento da distância total, como consequência do

custo reduzido das viagens em comparação com outros modais, acarretando na possibilidade de existirem viagens mais longas ou até mesmo veículos trafegando sem ocupantes (por exemplo, caso um indivíduo utilize um carro autônomo para ir ao trabalho, após chegar ao destino, o veículo volta sozinho para a residência, para ficar à disposição de outros membros da família); ou diminuição das distâncias viajadas, considerando que o compartilhamento de veículos seria mais eficiente e atrativo.

Os estudos de Sivak e Schoettle (2015) também revelam que no período de transição, quando veículos autônomos e convencionais compartilharem as vias, a segurança dos carros convencionais poderá ser prejudicada. Por exemplo, em muitas situações os motoristas fazem contato visual com os outros motoristas e tomam suas decisões baseadas na resposta desta interação. As incertezas indicadas por McGehee (2016) reforçam os apontamentos levantados por Khan et al (2016) sobre a necessidade de pesquisas com foco na resiliência das malhas viárias para superar vulnerabilidades, evitando interrupções no tráfego e reduzindo a gravidade dos impactos, caso venham a existir.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como método de avaliação da influência da introdução dos veículos autônomos no sistema viário atual, pretende-se usar a técnica de simulação visando analisar a velocidade média, a distância percorrida e o tempo total em fila de cada veículo.

O método de avaliação proposto nesta pesquisa refere-se à utilização de um modelo dinâmico, determinístico e discreto, desenvolvido por meio do simulador de tráfego SUMO. O SUMO é utilizado nesta pesquisa por ser um programa voltado para o ambiente acadêmico, possuir licença aberta, linguagem de programação relativamente simples e modelagem para simulação microscópica de trânsito, o que possibilita a análise individual dos veículos no sistema.

O comportamento dos veículos no SUMO segue o modelo modificado do veículo seguidor (*car-following*) desenvolvido por Krauss (1998). O modelo descreve como um veículo se comporta em relação ao veículo imediatamente a sua frente, calculando a velocidade desejada de acordo com a velocidade de segurança. Os principais parâmetros deste modelo são aceleração, desaceleração, velocidade máxima, imperfeição do motorista (σ) e tempo de reação do motorista para alterações na velocidade do veículo (τ). E, de acordo com os testes realizados por Leksono e Andriyana (2012), σ e τ são parâmetros que possuem grande influência na simulação.

Em todos os cenários a composição da frota dos veículos é a mesma: 12 veículos de passeio e 12 veículos de carga. Os parâmetros configurados para a diferenciação entre estes tipos de veículo são: tamanho do veículo, aceleração, desaceleração e velocidade máxima. De acordo com Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT (2005), a aceleração máxima possível de carros de passeio é $3,6\text{m/s}^2$, e de caminhões e veículos pesados, $0,9\text{m/s}^2$ no máximo. Para os parâmetros de desaceleração, de acordo com a pesquisa de Sousa (2001), a desaceleração média de veículos de pequeno porte chega a 4m/s^2 , enquanto a desaceleração de veículos maiores atinge em média $2,5\text{m/s}^2$. A tabela 2 apresenta as características de todos os veículos, sejam autônomos ou convencionais (conduzidos por humanos).

Tabela 2: Características gerais dos veículos

Veículo	Tamanho [m]	Velocidade Máx [km/h]	Aceleração [m/s ²]	Desaceleração [m/s ²]
Carro	5	90	3,6	4
Caminhão	10	60	0,9	2,5

Já para a diferenciação entre os veículos convencionais e autônomos foram utilizados os parâmetros:

§ τ : define o tempo de reação, em segundos, do motorista.

§ σ : parâmetro de imperfeição do motorista, em manter a velocidade constante

Leksono e Andriyana (2012) explicam que o valor de sigma (σ) pode variar entre 0 e 1, onde um valor maior representa um motorista com pouca habilidade para manter a velocidade do veículo constante. O valor de 0 corresponde a um veículo que se comporta deterministicamente (respeitando os limites de segurança o veículo trafega sem oscilações na sua velocidade). Assim, para os veículos autônomos, como não são operados por humanos, considerou-se que a imperfeição do motorista (capacidade de manter a velocidade constante) é igual zero. E, para os veículos convencionais, adotou-se o nível de imperfeição 1, representando a irregularidade da condução humana.

Para os veículos convencionais, o tempo de reação do motorista (τ) foi considerado de 3 segundos. Para os veículos autônomos, de acordo com WAGNER (2016), este intervalo pode ser reduzido a 0,3 ou 0,5 segundos. Porém, como uma das configurações do SUMO para evitar colisões é a premissa de que o valor de τ não seja inferior que o menor intervalo de tempo de simulação, (definido neste estudo como 1 segundo), foi definido o valor de 1 segundo para os veículos autônomos. A Tabela 3 apresenta os parâmetros que diferenciam os tipos de veículos. Dado que τ e σ são parâmetros relacionados ao motorista (operador do veículo), vale comentar que os veículos de passeio e caminhões não foram diferenciados com relação a estes parâmetros.

Tabela 3: Diferenças entre veículos convencionais e autônomos

Tipo	τ	σ
Convencional	3	1
Autônomo	1	0

Todos os cenários foram executados com a mesma configuração de vias e número de intersecções e, no SUMO, é modelado por meio de uma rede (nós e arcos direcionais). A Figura 1 ilustra a rede viária adotada neste estudo:

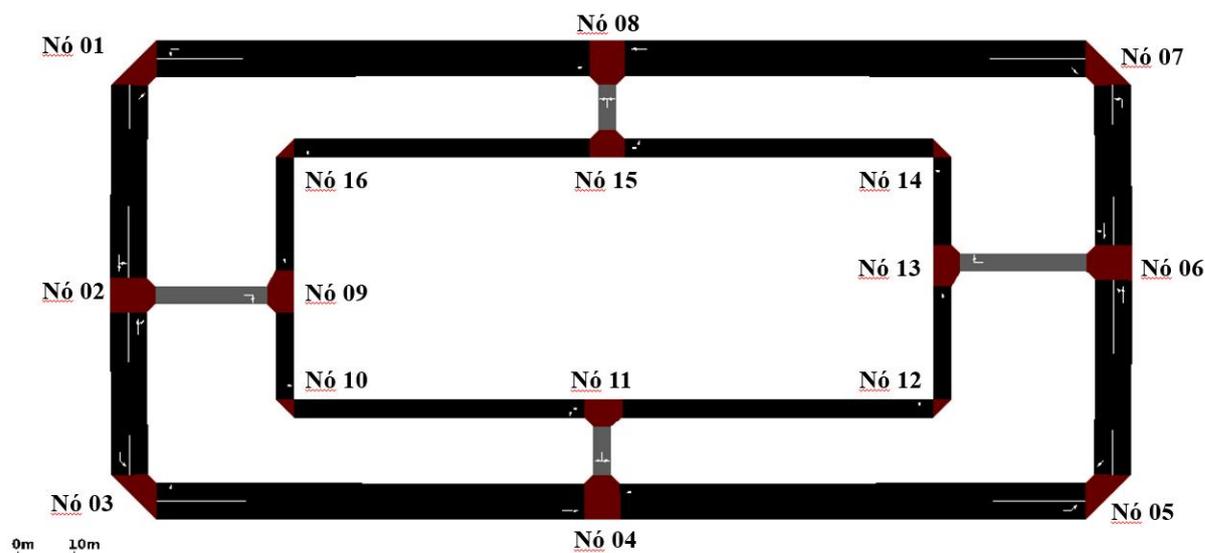


Figura 1: Rede Viária

Os veículos trafegam rotas definidas pelos nós da rede viária. No caso da rede viária adotada neste estudo, a via externa possui mão dupla e a via interna possui mão simples. Os veículos podem seguir uma das três rotas descritas:

- Rota A: 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 01
- Rota B: 01, 08, 07, 06, 05, 04, 03, 02, 01
- Rota C: 01, 02, 09, 10, 11, 04, 05, 06, 13, 14, 15, 08, 01

Para a caracterização do modelo, foi definido que 8 veículos trafegam em cada rota (A, B e C), sendo 4 automóveis e 4 caminhões. Pode-se observar das rotas selecionadas que a Rota C é aquela que interfere nas demais Rotas (A e B). Nos pontos de intersecção das vias, os veículos que possuem prioridade de passagem são os veículos das rotas A e B. Ou seja, os veículos da rota C apenas fazem as conversões quando as vias estão liberadas para a passagem.

Dentro deste panorama, o primeiro cenário a ser analisado considera 100% da frota com veículos convencionais (cenário atual). Os demais cenários foram configurados para alterar gradualmente o percentual entre veículos convencionais e autônomos, até atingir uma frota com 100% de veículos autônomos. A pesquisa considera que todos os aspectos de segurança estão sendo atendidos (i.e. segurança perfeita, sem a possibilidade de colisões), focando-se apenas em medir e comparar as velocidades médias (v_{med}), as distâncias totais percorridas (d) e o tempo total em fila (t_f) de cada veículo nos diferentes cenários.

Foram definidos 7 cenários a serem simulados para a análise comparativa dos resultados:

- § Cenário Conv: Todos os veículos de todas as rotas são convencionais.
- § Cenário A: Todos os veículos que trafegam na Rota A são autônomos.
- § Cenário B: Todos os veículos que trafegam na Rota B são autônomos.
- § Cenário C: Todos os veículos que trafegam na Rota C são autônomos.
- § Cenário Parcial: 2 automóveis e 2 caminhões das rotas A, B e C são autônomos.
- § Cenário AC: Todos os veículos que trafegam nas rotas A e C são autônomos.
- § Cenário Auto: Todos os veículos de todas as rotas são autônomos.

4. AVALIAÇÃO PRELIMINAR DOS RESULTADOS

A tabela 4 apresenta as distâncias totais percorridas (d) de cada veículo em cada um dos cenários simulados. As células com hachuras representam os veículos configurados como autônomos.

Tabela 4: Distâncias totais percorridas por veículo (d) [m]

Veículo	CENÁRIO CONV	CENÁRIO A	CENÁRIO B	CENÁRIO C	CENÁRIO PARCIAL	CENÁRIO A C	CENÁRIO AUTO
Carro1A	5.309	6.855	5.881	7.987	5.929	10.274	9.311
Carro2A	5.259	6.837	5.843	7.921	5.921	10.250	9.287
Carro3A	4.525	6.051	5.078	7.312	5.880	9.496	8.533
Carro4A	4.495	6.029	5.045	7.246	5.857	9.472	8.509
Caminhao1A	4.571	6.104	5.167	7.465	5.909	9.550	8.586
Caminhao2A	4.553	6.075	5.117	7.382	5.895	9.520	8.557
Caminhao3A	4.451	5.994	5.008	7.153	5.815	9.422	8.459
Caminhao4A	4.296	5.969	4.888	6.923	5.031	9.393	8.430
Carro1B	9.400	9.044	10.186	9.516	9.496	9.566	10.244
Carro2B	9.330	8.977	10.162	9.447	9.472	9.494	10.220
Carro3B	8.915	8.359	9.635	8.862	9.305	8.910	9.644
Carro4B	8.846	8.295	9.612	8.792	9.222	8.843	9.619
Caminhao1B	9.044	8.482	9.738	9.043	9.423	9.047	9.716
Caminhao2B	8.979	8.419	9.658	8.929	9.395	8.980	9.668
Caminhao3B	8.580	8.220	9.356	8.701	8.934	8.748	9.414
Caminhao4B	8.224	7.763	9.326	8.462	8.636	8.232	9.384
Carro1C	2.516	2.759	2.703	2.511	3.498	3.291	4.753
Carro2C	2.335	2.739	2.596	2.504	3.477	3.270	4.746
Carro3C	1.850	2.497	1.886	1.166	2.754	2.744	4.308
Carro4C	1.627	2.473	1.852	1.159	2.625	2.732	4.296
Caminhao1C	2.065	2.519	2.063	1.622	2.955	2.967	4.513
Caminhao2C	1.856	2.506	1.983	1.174	2.942	2.753	4.321
Caminhao3C	1.401	2.234	1.552	1.146	2.305	2.444	4.124
Caminhao4C	1.237	1.905	1.184	1.134	2.070	2.416	3.864

A tabela 5 apresenta a velocidade média dos veículos em cada um dos cenários simulados. Para o cálculo, foram considerados todos os instantes da simulação. Mesmo nos casos em que o veículo esteve parado em fila, sua velocidade nula é contabilizada no cálculo da velocidade média. As células com hachuras representam os veículos configurados como autônomos.

Tabela 5: Velocidades médias por veículo (v_{med}) [km/h]

Veículo	CENÁRIO CONV	CENÁRIO A	CENÁRIO B	CENÁRIO C	CENÁRIO PARCIAL	CENÁRIO A C	CENÁRIO AUTO
Carro1A	31,86	41,13	35,29	47,92	35,57	61,65	55,87
Carro2A	31,66	41,16	35,17	47,68	35,65	61,71	55,91
Carro3A	28,18	37,18	31,52	45,54	36,12	58,34	52,42
Carro4A	28,34	37,23	31,64	45,68	36,29	58,49	52,54
Caminhao1A	27,71	36,93	31,37	45,24	35,75	57,78	51,95
Caminhao2A	28,02	37,07	31,43	45,43	35,97	58,09	52,21
Caminhao3A	28,36	37,20	31,74	45,57	36,35	58,48	52,50
Caminhao4A	28,48	37,37	32,29	45,90	31,94	58,81	52,78
Carro1B	56,40	54,26	61,12	57,10	56,98	57,40	61,47
Carro2B	56,26	54,13	61,18	56,97	57,02	57,25	61,53
Carro3B	55,24	51,79	59,19	54,91	57,16	55,21	59,24
Carro4B	55,29	51,85	59,35	54,95	57,14	55,27	59,40
Caminhao1B	54,90	51,49	58,92	54,90	57,02	54,93	58,79
Caminhao2B	55,07	51,72	58,93	54,76	57,32	55,16	58,99
Caminhao3B	54,28	52,10	58,07	55,05	55,74	55,45	58,43
Caminhao4B	54,23	51,38	58,39	55,80	54,45	54,28	58,75
Carro1C	16,84	17,41	18,05	16,80	22,81	20,75	29,96
Carro2C	15,77	17,45	17,50	16,85	22,80	20,72	30,08
Carro3C	14,74	16,62	15,02	9,15	19,44	18,03	28,30
Carro4C	13,13	18,62	14,98	9,15	18,98	18,05	28,37
Caminhao1C	15,95	16,40	15,90	11,00	19,52	19,18	29,17
Caminhao2C	14,58	16,53	15,59	9,13	19,61	17,95	28,18
Caminhao3C	15,42	17,04	16,43	9,11	17,58	16,23	27,39
Caminhao4C	13,92	14,71	12,88	9,11	17,17	16,20	25,90

A Tabela 6 mostra o tempo total de espera em filas em cada cenário. É considerado que o veículo está esperando em fila quando a sua velocidade é igual a zero. As células com hachuras representam os veículos configurados como autônomos.

Tabela 6: Tempo total de espera em fila (t_f) [s]

Veículo	CENÁRIO CONV	CENÁRIO A	CENÁRIO B	CENÁRIO C	CENÁRIO PARCIAL	CENÁRIO A C	CENÁRIO AUTO
Carro1A	0	9	0	0	0	0	6
Carro2A	0	9	0	0	0	0	6
Carro3A	3	9	0	0	0	0	15
Carro4A	1	9	0	0	0	0	15
Caminhao1A	12	9	6	1	5	0	17
Caminhao2A	3	9	0	0	2	0	15
Caminhao3A	1	9	0	0	0	0	9
Caminhao4A	0	9	0	0	0	0	6
Carro1B	0	0	0	0	0	0	0
Carro2B	0	0	0	0	0	0	0
Carro3B	0	0	0	0	0	0	0
Carro4B	0	0	0	0	0	0	0
Caminhao1B	0	0	0	0	0	0	0
Caminhao2B	0	0	0	0	0	0	0
Caminhao3B	1	1	0	1	0	1	0
Caminhao4B	0	0	0	0	0	0	0
Carro1C	35	38	46	309	57	241	94
Carro2C	54	35	63	308	56	243	93
Carro3C	44	37	88	328	54	244	120
Carro4C	62	8	70	320	29	244	130
Caminhao1C	39	34	48	349	208	231	94
Caminhao2C	45	56	78	327	197	244	109
Caminhao3C	23	39	35	288	18	258	97
Caminhao4C	46	65	56	284	51	252	117

O desempenho de um cenário é definido como ‘bom’ quando os veículos apresentam maiores velocidades médias, maiores distâncias percorridas e menores tempos em fila. Assim, analisando o desempenho dos veículos, nota-se que:

- § Todos os carros e caminhões da Rota B tem melhor desempenho no Cenário *Auto*, com exceção de apenas um caminhão, que tem melhor performance no Cenário *B*. Como a Rota B é interferida pela Rota C no sentido inverso, esse resultado era esperado. Talvez, a diferença para o ocorrido com um caminhão seja em função da menor agilidade em aceleração e desaceleração.
- § Os veículos da Rota C possuem maiores velocidades médias e distâncias percorridas no Cenário *Auto*.

Já os cenários com piores desempenhos para os veículos da rota A é o cenário *Conv*, para os veículos da rota B, é o cenário A; e para os veículos da rota C, o cenário C, com exceção de um carro, que possui pior desempenho no cenário *Auto*. Uma eventual explicação pode ser o diferente tipo de interferência da automação em diferentes tipos de rotas.

Quando o foco é o tempo total em filas, os cenários com pior desempenho (maior tempo em fila) são os cenários *A* e *Auto*, para os veículos da rota A e o cenário *C* para os veículos da

rota C. Em ambos os casos anteriores, a Rota B interfere demais quando nela só contém veículos convencionais. Nenhum veículo da rota B permanece parado no sistema, com exceção de apenas um caminhão.

Intuitivamente, espera-se que o Cenário *Auto* possua melhor desempenho (maiores velocidades médias, distâncias percorridas e menores tempos em filas) e o Cenário *Conv* apresente o oposto disto. Porém, contabilizando as ocorrências em que cada cenário é classificado como melhor desempenho (cenário no qual o mesmo veículo aparece com menor tempo de fila e maior velocidade média), isso não ocorre; o Cenário *Conv* é o quarto melhor colocado no ranking de melhores desempenhos, conforme ilustra a Tabela 7. É interessante notar que o Cenário B (Rota B com todos autônomos) apresenta bom desempenho, provavelmente, devido ao menor grau de interferência nas demais rotas (A e C) em função de todos seus veículos serem autônomos na Rota B.

Tabela 7: Cenários com melhores desempenhos

Cenário	Ocorrências como Melhor Desempenho
Cenário AUTO	23
Cenário B	20
Cenário A C	16
Cenário CONV	13
Cenário A	11
Cenário PARCIAL	9
Cenário C	7

É interessante notar que, dos sete cenários testados, os três piores classificados no ranking de melhor desempenho possuem veículos autônomos trafegando em vias compartilhadas com veículos convencionais (Cenário A, Cenário Parcial e Cenário C). Os cenários com piores desempenhos estão representados na Tabela 8.

Tabela 8: Cenários com piores desempenhos

Cenário	Ocorrências como Pior Desempenho
Cenário CONV	17
Cenário C	15
Cenário A	12
Cenário AUTO	4
Cenário A C	0
Cenário B	0
Cenário PARCIAL	0

Como esperado, o Cenário *Conv* aparece como o cenário que mais possui ocorrências de pior desempenho, seguido pelo Cenário C, Cenário A e Cenário *Auto*. Novamente, mostra-se que quando os veículos da Rota B não são autônomos, o impacto nas demais rotas é maior. Os cenários AC, B e *Parcial* não são citados nenhuma vez como piores desempenhos.

Combinando os resultados de melhor e pior desempenho, e atribuindo valores positivos para cada citação como Melhor Desempenho e valores negativos para citações como Pior Desempenho, criou-se uma métrica para classificação geral dos cenários (Tabela 9).

Tabela 9: Classificação geral dos cenários

Cenário	Melhor Desempenho (+)	Pior Desempenho (-)	Saldo Total
Cenário B	20	0	20
Cenário AUTO	23	4	19
Cenário A C	16	0	16
Cenário PARCIAL	9	0	9
Cenário A	11	12	-1
Cenário CONV	13	17	-4
Cenário C	7	15	-8

Analisando os resultados desta métrica, ao contrário do esperado, o Cenário *B* mostra-se como melhor cenário e o cenário *Auto* aparece como segundo melhor. O pior cenário é o Cenário *C*, seguido do Cenário *Conv*.

Assim, nas condições desta malha viária, o tráfego ótimo de veículos acontece quando apenas os veículos da rota *B* possuem características autônomas, rota esta que interfere no cruzamento dos veículos das rotas *A* e *C*. Quando todos os veículos são autônomos (Cenário *Auto*) o saldo do fluxo de veículos passa de 20 a 19, perdendo 5% de eficiência.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma avaliação preliminar, do ponto de vista logístico - comportamento dinâmico dos veículos convencionais e a logísticas do sistema viário, do impacto produzido sobre o comportamento do tráfego em vias onde há a operação simultânea de veículos convencionais e autônomos. Através de simulação computacional, uma rede viária foi modelada, contendo 3 rotas distintas, e onde sete cenários de tráfego (diferentes proporções de veículos convencionais e autônomos) foram simulados. De forma quantitativa, pode-se observar que os veículos trafegaram com maior fluidez – menor tempo em fila e maiores velocidades medias – quando toda a frota de veículos presentes em uma rota era autônoma.

Vale destacar que este trabalho apresentou uma avaliação preliminar do panorama das perspectivas futuras da inserção dos veículos autônomos no sistema viário atual com foco nos aspectos logísticos. No entanto, como prova de conceito, pode-se destacar o enorme potencial deste tipo de análise, podendo inclusive gerar quantidade suficiente de dados que possa servir de base para um processo de extração de conhecimento através de técnicas de *datamining*.

Como continuação deste trabalho, os autores estão desenvolvendo a modelagem de nova malha logística para lidar com o problema identificado. Em especial, está sendo modelado e simulado o tráfego real de algumas importantes vias da região metropolitana da cidade de São Paulo. Com os dados da CET (2016) de volume e velocidades médias das vias, espera-se que o modelo de simulação retrate com fidelidade o comportamento real dos veículos convencionais para que se possa ter uma base concreta de comparação para os resultados dos novos cenários a serem simulados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZMAT, M. (2015) Future Scenario: self-driving cars – the future has already begun. Conference paper, DOI:10.13140/RG.2.1.3143.6965.
- BOSE, A.; IOANNOU, P. A. (2003) Analysis of traffic flow with mixed manual and semiautomated

- vehicles. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 4, n. 4, p. 173-188.
- CHEN, T. D.; KOCKELMAN, K. M.; HANNA, J. P. (2016) Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 94, p. 243-254.
- Comissão Europeia (2005) Internet of things: Connected Cars. Case Study 43. Business Innovation. União Europeia, 2015.
- Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT (2005) Manual de projeto de intersecções. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2ª edição. Rio de Janeiro.
- Departamento of Motor Vehicles, State of California. < <https://www.dmv.ca.gov/portal/dmv/dmv/vr> >
- KHAN, A. M, et al (2016, Automation in driving for enhancing resiliency in transportation system. Resilient Infrastructure. Londres.
- KRAUSS, S (1998) Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. D L R – Forschungsberichte.
- LEKSONO, C. Y, ADRIYANA, T (2012) Roundabout microsimulation using SUMO: A case study in Idrottsparken Roundabout Norrkoping Sweden. Universidade de Linkoping. Departamento de Ciência e Tecnologia.
- MAURER, M. et al (2016) Autonomous driving: technical, legal and social aspects. Springer Publishing Company, Incorporated.
- MCGEHEE, D. V. et al (2016) Review of Automated Vehicle Technology: Policy and Implementation Implications.
- PETTERSSON, I.; KARLSSON, I. C. M. (2015) Setting the stage for autonomous cars: a pilot study of future autonomous driving experiences. IET intelligent transport systems, v. 9, n. 7, p. 694-701.
- SCHOETTLE, B.; SIVAK, M. (2015) Potential impact of self-driving vehicles on household vehicle demand and usage.
- SING, S. (2015). Critical reasons for crashes investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey, Washington, DC. Available at: <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812115>.
- SIVAK, M.; SCHOETTLE, B. (2015) Road safety with self-driving vehicles: General limitations and road sharing with conventional vehicles. University of Michigan. Transportation Research Institute.
- SOUSA, L. A. P, (2011) Taxas de desaceleração e tempos de percepção e reação dos motoristas em intersecções semaforizadas. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia de Transportes. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- SUMO. SUMO Main page. Disponível em: < http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation_of_Urban_MObility_-_Wiki>. Acesso em 17 de março de 2017.
- SAE, Society of Automotive Engineers. Automated driving: levels of driving automation are defined in new SAE international standard. J3016. Novembro, 2017. Available at < https://web.archive.org/web/20161120142825/http://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf>.
- WAGNER, P. (2016) Traffic control and traffic management in a transportation system with autonomous vehicles. In: Autonomous Driving. Springer Berlin Heidelberg. p. 301-316.