



INTEGRAÇÃO ENTRE SIMULADORES DE TRÁFEGO E DE DIREÇÃO EM ESTUDOS DE CAR-FOLLOWING PARA DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTES (ITS)

Tiago Kirsch Lanes
Christine Tessele Nodari
Helena Beatriz Bettella Cybis
Daniel Sergio Presta García

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Departamento de Engenharia de Produção e Transportes

RESUMO

Simulações de direção e de tráfego são ferramentas recorrentes em estudos na área de transportes. Estudos com Simuladores integrados que desenvolvam simultaneamente ambas as interfaces (co-simuladores), contudo, ainda são restritos. A difusão de sistemas inteligentes de transportes pode beneficiar-se do uso de co-simuladores. A revisão sistemática da literatura identificou 48 artigos integrando simuladores de direção a simuladores de tráfego, sendo que desses 22 desenvolvem estudos aplicáveis a ITS através do processo de *car-following*, indicando a aplicação de sistemas integrados no gerenciamento de transportes através da assimilação do comportamento dos condutores. No presente artigo, buscou-se indexar tais artigos e identificar como simuladores integrados de tráfego e de direção são empregados no desenvolvimento de ITS.

ABSTRACT

Traffic and driving simulators are recurring tools in studies in the transportation area. Integrated simulators, that simultaneously develop both interfaces (co-simulators), however, are still restrictive. On the other hand, the diffusion of Intelligent Transport Systems can benefit from co-simulators. The systematic review of the literature identified 48 papers integrating driving simulators with traffic simulators, of which 22 develop studies applicable to ITS through the car-following process, indicating the application of integrated systems in the management and management of transport through assimilation of the behavior of the drivers. In this paper, we sought to index such papers and identify how integrated driving-and-traffic simulations can be used in the development of ITS.

1. INTRODUÇÃO

Simulação é uma representação da realidade que imita, de forma aproximada, seus processos e sistemas. A simulação permite que um usuário se aproxime de cenários do mundo real (Cassenti *et al.*, 2020). Cenários são compreendidos como séries de ações ocorrendo em determinado período de tempo dentro de determinado espaço (Wen *et al.*, 2020).

Em estudos na área de transportes, as abordagens mais adotadas são de tráfego e de direção. Simuladores de direção (*Driving Simulators – DS*) são utilizados para prover experiências sensoriais e psicomotoras a partir de integração topológica, lógica, física e visual (That e Casas, 2011). Simuladores de tráfego (*Traffic Simulators – TS*), por sua vez, são utilizados para análises que não consideram a interação do condutor com o veículo, mas sim o desempenho de sistemas e redes em diferentes escalas. Microssimulações de tráfego relacionam cada veículo individualmente e sua interação com os demais, tratando-os como unidades distintas (Olstam, 2006). Macrossimulações tratam o tráfego como um meio fluido e contínuo, não considerando partículas individuais, mas sim volumes (Chen *et al.*, 2014). Modelos de *car-following*, nos quais o condutor ajusta o comportamento ao dos demais veículos do pelotão, são comumente associados a microssimulações, podendo ser também incorporados em simuladores de direção (Harms e Brookhuis, 2016).



Car-Following é a condição de tráfego na qual o comportamento de um veículo é ditado por aquele à sua frente quanto a distanciamento, velocidade e aceleração. Algoritmos de *car-following* são empregados avaliação, validação e gerenciamento de microsimulações. São processos complexos, dependentes das ações e decisões dos condutores cuja adoção e desenvolvimento são de grande valia para as simulações de tráfego, bem como para tecnologias emergentes em transportes, como controles adaptativos de viagem (*Adaptive Cruise Control* – ACC) e veículos autônomos.

O conceito de integração consiste em conectar diferentes sistemas para que atuem de forma conjunta, permitindo que estruturas distintas interajam. Sistemas Inteligentes de Transportes (*Intelligent Transport Systems* – ITS) consistem em vários atores integrados, permitindo interação e cooperação para gerenciamento de tráfego, operação de redes de transportes e coordenação multimodal. A aplicação de ITS tem acompanhado a automação e interconexão de veículos e o avanço na infraestrutura do transporte. As inovações em carros autônomos podem ainda beneficiar-se de estruturas que busquem executar simultaneamente simuladores de tráfego e simuladores de direção, denominadas DS-TS.

Este estudo tem como objetivo, por meio de uma revisão sistemática, identificar como as práticas de integração entre simuladores de tráfego e de direção estão sendo empregadas no aprimoramento de sistemas inteligentes de transportes. O artigo está organizado em cinco seções, incluindo esta introdução. Na seção 2 são apresentados os procedimentos metodológicos que embasam a revisão sistemática. Na seção 3 é realizada a revisão teórica acerca do uso de simuladores de tráfego e de direção, bem como suas aplicações em sistemas inteligentes de transportes. Na seção 4 são analisados e discutidos os resultados obtidos e, por fim, na seção 5, são realizadas as considerações finais do artigo.

2. METODOLOGIA

A revisão bibliográfica realizada buscou identificar pesquisas nos âmbitos da engenharia de transportes que utilizem simultaneamente ambas as simulações – de tráfego e de direção. A revisão sistemática adotada busca reunir respostas para uma questão central definida: *como integrar o uso de simuladores de tráfego com simuladores de direção no desenvolvimento de sistemas inteligentes de transportes a partir de modelos de car-following?*

A coleta envolveu pesquisa na produção científica indexada na base de dados Science Direct e Scopus, sendo encerrada no dia 5 de julho de 2022. As bases de dados foram selecionadas pela disponibilidade de acesso e pela abrangência editorial. A busca concentrou-se em materiais no idioma inglês, sem restringir quanto ao intervalo de tempo decorrente desde a publicação dos artigos. Assim ficaram definidas as *strings* de busca para cada base de dados:

- *Science Direct*: ("traffic simulator" OR "traffic simulation") AND ("driving simulator" OR "driving simulation") AND ("car-following") AND ("Intelligent Transport Systems")
- *Scopus*: TITLE-ABS-KEY ("traffic simulator" OR "traffic simulation") AND ("driving simulator" OR "driving simulation") AND ("car-following") AND ("Intelligent Transport System")



Foram localizados 7.017 artigos sobre simulações de tráfego e 5.426 artigos sobre simuladores de direção na base Science Direct, com 378 artigos abordando a ambos. Na base Scopus, foram localizados 26.211 artigos sobre simuladores de tráfego e 19.897 sobre simuladores de direção, com 1.215 abordando a ambos. Ao restringir a busca a artigos que também tratassem sobre car-following e sobre sistemas de transportes, foram localizados 20 artigos na base Science Direct e 35 artigos na base Scopus. Com a remoção dos 7 resultados duplicados, foram encontrados um total de 48 artigos. Estes, por sua vez, foram analisados quanto as questões de integração entre simuladores e relação com sistemas de transportes inteligentes, identificando, assim, um total de 22 artigos relevantes. A Figura 1 apresenta a proporção entre os artigos localizados nas bases.

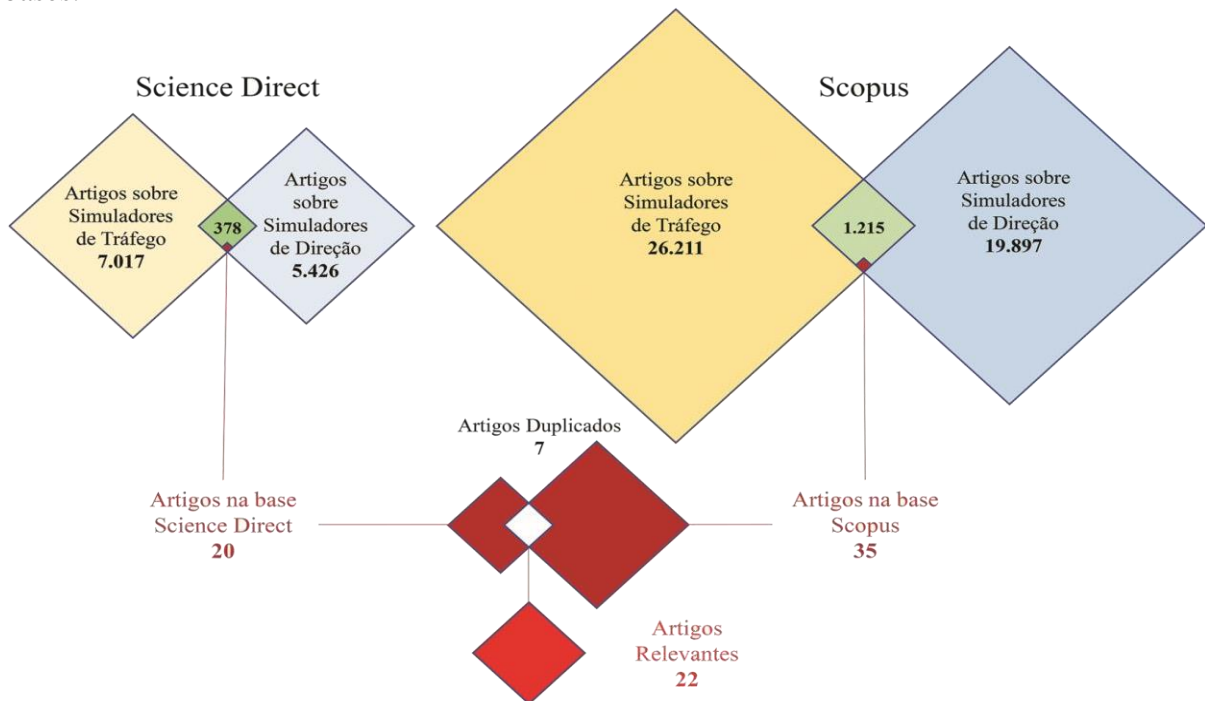


Figura 1: Artigos localizados

3. DESCRIÇÃO DOS ACHADOS

Quanto a integração entre simuladores de direção e de tráfego, observa-se a tendência ao enfoque dos autores em um dos tipos de simulador para coletar dados a serem empregados na criação de cenários para o outro. Alguns estudos concentram-se na construção de metodologias para integração de ambas as plataformas e na superação dos desafios do processo. A rastreabilidade dos achados é apresentada no Quadro 1

Quadro 1: Rastreabilidade

Dimensão	Fator	Rastreabilidade	Autor
Simulações de direção com dados coletados em simuladores de tráfego	Comportamento	Percepção do condutor	[5], [31], [38], [46]
		Tomada de decisão	[3], [4], [11], [25], [27], [32]
		Resposta comportamental	[1], [2], [10], [11], [19], [24], [25], [27], [34], [26], [37]
		Dinâmica veicular	[4], [5], [17], [29], [46]
	Modelagem	Interface gráfica	[2], [8], [17], [22], [33], [41]
		Ambientação	[2], [8], [16]



Dimensão	Fator	Rastreabilidade	Autor
Simulações de tráfego com dados coletados em simuladores de direção	Tráfego	Fluxo	[8], [22], [31], [26], [30]
		Rede	[16], [19], [21], [24], [41]
		Pontos de Conflito	[3], [6], [27], [25], [33], [35], [43], [44], [47]
	Modelagem	Calibração	[1], [14], [20], [46]
		Variabilidade	[4], [6], [7]
		Confiabilidade	[8], [13], [33], [22]
Redes integradas	Interação	Interface gráfica	[1], [8], [9], [18], [22], [33]
		Custo computacional	[2], [9], [22], [33], [40]
		Algoritmo	[7], [15], [20], [26], [39], [42]
		Validação	[9], [23], [26], [34], [42], [45]
	Gestão	Controle semafórico	[28], [29], [35], [37]
		Travessia de pedestres	[10], [30]
	Avaliação de sistemas	[7], [8], [12], [18], [21], [26], [45]	

[1] Abdelgawad *et al.*, 2016; [2] Abdelgawad *et al.*, 2017; [3] Agrawal e Peeta, 2021; [4] Ali *et al.*, 2020; [5] Aramrattana *et al.*, 2017(a); [6] Aramrattana *et al.*, 2017(b); [7] Aramrattana *et al.*, 2017; [8] Aramrattana *et al.*, 2019(a); [9] Aramrattana *et al.*, 2019(b); [10] Artal-Villa *et al.*, 2019; [11] Bifulco *et al.*, 2013; [12] Calvert *et al.*, 2019; [13] Cham *et al.*, 2021; [14] Detering, Schnieder, 2009; [15] Elallid *et al.*, 2022; [16] Felez *et al.*, 2013; [17] Gao *et al.*, 2021; [18] Hassan *et al.*, 2021; [19] Hou *et al.*, 2014; [20] Hou *et al.*, 2015; [21] Ikeuchi, 2005; [22] Jeihani *et al.*, 2017; [23] Jia *et al.*, 2021; [24] Kuwahara *et al.*, 2005; [25] Laquai *et al.*, 2013; [26] Lee, Jung, 2019; [27] Li *et al.*, 2019; [28] Matsumoto, Nishio, 2019; [29] Matsumoto *et al.*, 2014; [30] Ntousakis *et al.*, 2017; [31] Olstam, 2006; [32] Park *et al.*, 2019; [33] Paz *et al.*, 2015; [34] Piao, McDonald, 2008; [35] Preuk *et al.*, 2016; [36] Rad *et al.*, 2020; [37] Savolainen, 2016; [38] Son *et al.*, 2020; [39] Suh *et al.*, 2016; [40] Sun *et al.*, 2015; [41] Talaat *et al.*, 2008; [42] That, Casas, 2011; [43] Varotto *et al.*, 2021 (a); [44] Varotto *et al.*, 2021 (b); [45] Wen *et al.*, 2020; [46] Xiong, Zhang, 2013; [47] Xu *et al.*, 2021; [48] Zulkefli, 2017

Os artigos que abordam simuladores integrados relacionando com sistemas de transporte inteligentes são apresentados no Quadro 2. Observa-se que 52,6% dos artigos foram publicados nos últimos 3 anos, e que 68,4% dos mesmos foram publicados na Europa.

Quadro 2: Estudos referentes a ITS

Autores	Ano	País	Abordagem
Olstam	2008	Suécia	Sistemas inteligentes na concepção de um submodelo de simulação que separa em camadas os veículos próximos ao condutor daqueles mais distantes
Talaat <i>et al.</i>	2008	Estados Unidos	Combinam a interface dos simuladores de direção com os fluxos dos simuladores de tráfego em análises mistas de controle
Detering, Schnieder	2009	Alemanha	Considera modelos de tráfego na calibração de sistemas avançados de assistência ao condutor
That, Casas	2011	Espanha	Estrutura uma integração entre simuladores de tráfego e direção focando na aplicabilidade em ITS
Bifulco <i>et al.</i>	2013	Itália / Reino Unido	Simula comportamentos de <i>car-following</i> para modelos de assistência ao condutor.



Autores	Ano	País	Abordagem
Ntousakis <i>et al.</i>	2015	Grécia	Incorporam o impacto de sistemas ACC no tráfego a partir de simuladores
Preuk <i>et al.</i>	2016	Alemanha	Avaliam o impacto no tráfego decorrente da presença de condutores com ITS de assistência semafórica
Abdelgawad <i>et al.</i>	2016	Alemanha	Adotaram redes de simuladores de direção para gerar dados do tráfego próximo ao veículo analisado: modelos de condução controlando o comportamento dos veículos no tráfego enquanto simuladores de tráfego consideram comportamentos individuais como modelos distintos para cada condutor
Jeihani <i>et al.</i>	2017	Estados Unidos	Adaptam as diferentes naturezas, formatos e lógicas entre os simuladores para ajustes em redes de pequeno porte.
Aramrattana <i>et al.</i>	2018	Suécia	Propõem a adoção de simuladores de direção para ajustar a incerteza e variabilidade comportamental.
Calvert <i>et al.</i>	2019	Holanda	Avaliam sistemas de controle de viagem em pelotões de caminhões a partir de modelagem de tráfego
Lee, Jung	2019	Japão	Uso de estruturas DS-TS para avaliação de sistemas ITS
Matsumoto, Nishio	2019	Japão	Analisa a emissão de CO2 decorrente da reação dos condutores às informações em tempo real do tráfego em interseções semaforizadas
Son <i>et al.</i>	2020	Coréia do Sul	Efeitos dos avisos de sistemas de assistência ao condutor na redução de sinistros avaliada em simuladores de direção
Cham <i>et al.</i>	2021	Malásia	Utiliza de modelagem em tempo real para complementar dados referentes ao tráfego perdidos em sistemas inteligentes, devido a perda de conectividade ou erro de transmissão
Gao <i>et al.</i>	2021	Estados Unidos	Inclui veículos autônomos conectados com sistemas operados por robôs (ROS) em co-simuladores com condutores virtuais e microssimulações de tráfego.
Xu <i>et al.</i>	2021	Austrália / China	Realidade virtual na gestão de conflitos em interseções de rodovias
Elallid <i>et al.</i>	2022	Marrocos / Canadá	Através de simulações, estruturam algoritmo de aprendizado para veículos autônomos em rede
Aramrattana <i>et al.</i>	2019 (a)	Suécia	Testam a complexidade do comportamento na confiabilidade de cenários realísticos a partir de dados de simuladores de direção.
Aramrattana <i>et al.</i>	2019 (b)	Suécia	Testa as interações de sistemas de transporte inteligentes cooperativos em redes de co-simuladores
Varotto <i>et al.</i>	2021 (a)	Holanda	Com simulações combinadas de direção e de tráfego, analisam a influência de limites variáveis de velocidade e detecção automática de acidentes no comportamento de condutores em congestionamentos, focando na velocidade média e aceleração



Autores	Ano	País	Abordagem
Varotto <i>et al.</i>	2021 (b)	Holanda	Com simulações combinadas de direção e de tráfego, analisam a influência de limites variáveis de velocidade e detecção automática de acidentes no comportamento de condutores em congestionamentos, focando no processo de desaceleração

4. DISCUSSÃO

Simuladores de direção reagem às operações e decisões individuais do condutor humano (Hou *et al.*, 2015), sendo assim responsáveis pelo ferramental para análise da dinâmica veicular pela percepção do condutor (Hou *et al.*, 2014), enquanto simuladores de tráfego respondem pelos atores secundários referentes aos demais veículos presentes na rede viária (Aramrattana *et al.*, 2017). Os parâmetros e as funções de calibração obtidos em simuladores de direção podem ser integrados com modelos de tráfego microscópico executados em simuladores de tráfego (Xiong e Zhang, 2013).

Os dados de simuladores de tráfego são utilizados para alimentar simuladores de direção, fornecendo ao condutor o entorno a ser percebido, permitindo análises nos estágios subsequentes. A adoção de co-simulações pode realizar-se de três formas. Pode-se incorporar em simulações de direção o tráfego previamente gerado em TS. Pode-se, ainda, realizar simulações de tráfego utilizando dados de condutores coletados em DS. E, por fim, é possível empregar-se redes integradas para simulação simultânea. A Figura 2 distribui os estudos referentes a ITS nessas três categorias.

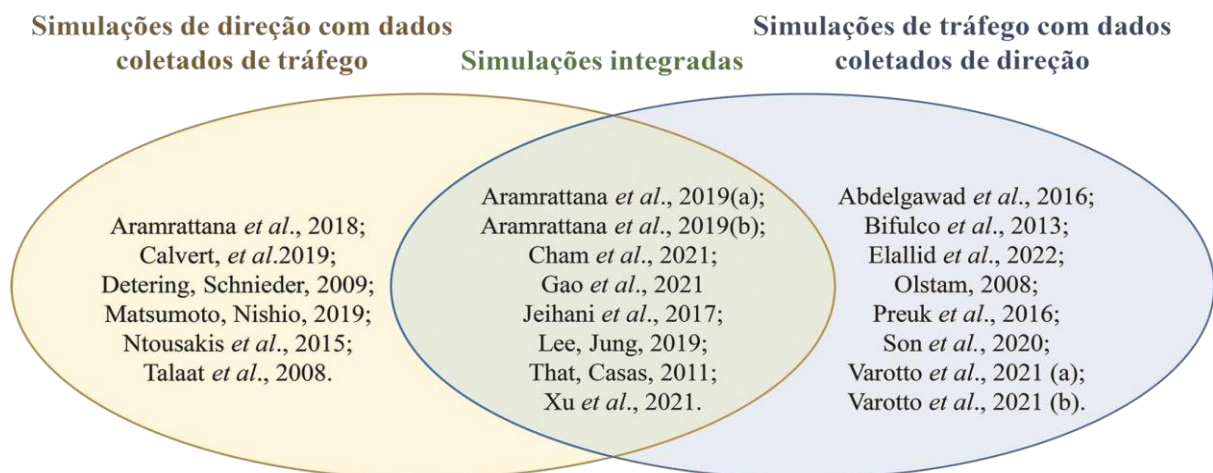


Figura 2: Distribuição de estudos com co-simuladores

4.1. Integração entre Simuladores de Tráfego e de Direção

As redes integradas de simuladores incluem estruturas que buscam executar simultaneamente simuladores de tráfego e simuladores de direção, denominadas DS-TS. Tais redes são complexas devido às diferenças entre os simuladores, e requerem altos custos computacionais. Abdelgawad *et al.* (2017) buscaram ajustar os níveis de fidelidade de sistemas integrados diante do desafio dos custos computacionais. Paz *et al.* (2015) adotaram duas camadas de simulação



de tráfego para reduzir o tempo computacional: uma mesossimulação que gera dados globais para toda a área e uma microssimulação lidando com os veículos próximos ao conduzido pelo usuário. Hassan *et al.* (2021) utilizam de realidade virtual para a visualização do tráfego em diferentes interfaces de simulação.

Um sistema integrado pode quantificar as ações em situações de tráfego pesado, de controle semaforico e de direção ofensiva (Matsumoto *et al.*, 2014), analisando até mesmo as interações comportamentais com pedestres (Artal-Villa *et al.* 2019). As condições de tráfego também podem ser recriadas conectando diversos simuladores de direção, criando um simulador de tráfego com simuladores múltiplos de direção (*traffic simulator with multiple driving simulators* – TSMDS). Sun *et al.* (2015) adotaram TSMDS para suprir as limitações de simuladores de tráfego microscópio na emulação das interações humanas com o meio, ou seja, as HITL (*human-in-the-loop*).

4.2. Modelos de *Car-Following* em simuladores

Modelos de *car-following* são amplamente utilizados em simuladores de tráfego para orientar o comportamento dos veículos a partir dos demais atuantes no sistema. Tais modelos seguem uma tradicional estrutura espiral para o processo de aproximação dos veículos em um pelotão, buscando a emulação do comportamento do condutor humano inserido dentro de um sistema de tráfego. Tais modelos são inclusive utilizados no ajuste comportamental de veículos autônomos e em sistemas de assistência ao condutor (Bifulco *et al.*, 2013).

Kuwahara *et al.* (2005) delimita que o comportamento do condutor deva ser analisado em simuladores de direção, enquanto a avaliação da influência do comportamento do condutor na rede viária deva ser avaliada nos simuladores de tráfego. Simuladores de tráfego oferecem representações realistas das redes de transporte e das condições de tráfego em pelotões, considerando parâmetros como velocidade, fluxo, *headways* e ocupação de faixas. A integração com simuladores de direção agrega informações mais fidedignas a simuladores de tráfego no referente ao comportamento dos indivíduos em diferentes configurações de parâmetros do trânsito (Naseri, Nahvi e Karan, 2015).

A análise dos condutores em simuladores de direção pode gerar dados para o ajuste de parâmetros em simuladores de tráfego. Laquai *et al.* (2013) utilizaram dados de simuladores de tráfego em simuladores de direção para análise do processo de mudança de faixa. Agrawal e Peeta (2021) geram condições consistentes para cenários de congestionamento e como afetam a tomada de decisão. Li *et al.* (2019) utilizam-se de microssimulações para emular as interações que podem resultar em sinistros, analisando a resposta comportamental. Park *et al.* (2019) focaram seu estudo na investigação de três elementos de agressividade: perseguição próxima, mudança abrupta de pista e desaceleração súbita. Aramrattana *et al.* (2016) integrou atores de simulações de tráfego em simulações de direção para avaliar a cooperação em ITS para a formação de pelotões.

No Quadro 3 são apresentados os modelos de *Car-Following* adotados em cada estudo. Também são identificados os estudos que comparam diferentes modelos em relação à sua



aplicação a sistemas inteligentes, bem como aqueles estudos que se propõem a validar um modelo próprio para ITS.

Quadro 3: Modelos de Car-Following

	CACC Rajamani	CORSIN	GHR	Gipps	HUTSIM/TPMA	LMRS	IDM	IPA	Plexe-Sumo	W74	Comparativo	Validação
Abdelgawad <i>et al.</i> , 2016			X									
Aramrattana <i>et al.</i> , 2018	X							X				
Aramrattana <i>et al.</i> , 2019 (a)									X		X	
Aramrattana <i>et al.</i> , 2019 (b)									X		X	
Bifulco <i>et al.</i> , 2013										X		
Calvert <i>et al.</i> , 2019						X	X					
Cham <i>et al.</i> , 2021								X	X			X
Detering, Schnieder, 2009			X	X						X	X	
Elallid <i>et al.</i> , 2022									X		X	
Gao <i>et al.</i> , 2021				X								
Jeihani <i>et al.</i> , 2017		X										
Lee e Jung, 2019										X		
Matsumoto, Nishio, 2019												
Ntousakis <i>et al.</i> , 2015				X			X					
Olstam, 2008					X							
Preuk <i>et al.</i> , 2016			X									
Son <i>et al.</i> , 2020				X								
Talaat <i>et al.</i> , 2008										X		
That, Casas, 2011				X								
Varotto <i>et al.</i> , 2021 (a)												X
Varotto <i>et al.</i> , 2021 (b)												X
Xu <i>et al.</i> , 2021										X		

2.1. Uso de simuladores em ITS

As inovações em carros autônomos e integrados, bem como em sistemas inteligentes de transportes também podem se beneficiar das simulações DS-TS, sendo os simuladores integrados utilizados na avaliação dos sistemas (Lee e Jung, 2019). Detering e Schnieder (2009) avaliam o impacto de sistemas avançados de assistência ao condutor (*Advanced Driver-Assistance System - ADAS*), enquanto Ali *et al.* (2020) considerou o impacto de ambientes conectados – que provêm informações veículo-a-veículo ou veículo-a-infraestrutura – nas manobras realizadas pelos condutores, utilizando simuladores de direção para tal estudo.

O componente central dos sistemas inteligentes é sua função cooperativa, através de sensores



comunicação entre os atores. Algoritmos de controle de carros autônomos podem ser ainda controlados a partir de simulações em cabines de condução com tráfego simulado em tempo real (Suh *et al.*, 2016), aliando a comunicação interveicular à integração entre simuladores de tráfego e de direção (Zulkefli, 2017).

A gestão de tráfego a partir de ITS pode ser abordada por diferentes vieses, decorrentes dos diferentes atores que atuam sobre um mesmo aspecto. Um importante aspecto que representa tal característica é o controle semaforico, considerando a atuação de assistentes conhecidos como *traffic light assistance systems*, que recebem e compartilham informações sobre as vias. Matsumoto e Nishio (2019) avaliam os impactos a partir da ótica do condutor individual, enquanto Preuk *et al.* (2016) ponderam do ponto de vista dos impactos no tráfego decorrentes de condutores utilizando tais sistemas. Savolainen (2016) emprega sistemas DS-TS em interseções semaforizadas para a temporização do semáforo conforme o tempo de parada.

A adaptação comportamental de veículos autônomos requer modelos comportamentais com definições mais realistas a serem incorporados em experimentos de condução e simulações de fluxo de tráfego (Rad *et al.*, 2020). Simuladores isolados simplificam a funcionalidade de veículos autônomos, mostrando-se limitados ao lidarem com fluxos mistos de tráfego (Jia *et al.*, 2021). Requer-se, assim, ambientes interativos de tráfego. Ikeuchi (2005) concentra-se na obtenção de realismo a partir do volume de tráfego e de dados quanto a origens e destinos. Aramrattana *et al.* (2017) considera a heterogeneidade da frota no desenvolvimento de ITS, enquanto Aramrattana *et al.* (2019a) testa sistemas inteligentes heterogêneos – compostos por veículos autônomos e manuais – em co-simulações estruturadas entre simuladores de tráfego e de direção. Calvert *et al.* (2019) analisam o impacto de controles de viagem adaptativos e cooperativos em pelotões de caminhões, enquanto Ntousakis *et al.* (2015) realizam estudo similar com veículos de passeio, utilizando para tal simulações de tráfego aplicadas em simuladores de direção.

5. CONCLUSÃO

Os principais fatores de tráfego que podem ser incorporados a simuladores de direção são referentes à tomada de decisão, em situações de risco e seleção de rota, e quanto a resposta diante de estímulos da via – formação de pelotão, sinalização e semaforização. Os elementos referentes ao comportamento dos condutores aplicáveis a simuladores de tráfego concentram-se na emulação comportamental e na calibração de modelos que transponham aspectos individuais para o comportamento coletivo.

A integração DS-TS se dá tanto nos estudos com veículos inteligentes, interconectados ou autônomos, quanto na adoção de redes TSMDS, na validação ou estruturação de condutores simultaneamente conectados. A forte presença dos estudos que citam ITS aponta a aplicação em infraestrutura, gerenciamento e gestão de transportes adotando interfaces conectadas. Simuladores de direção e de tráfego alinham-se com sistemas de tráfego inteligente na assimilação dos nuances do comportamento de condutores humanos.

Observa-se, contudo, uma necessidade do aprimoramento constante da integração – constatada como complexa e sujeita a custos computacionais restritivos. Trabalhos que explorem soluções para tais restrições e facilitem a integração DS-TS trariam benefícios para todas as abordagens de estudos, tornando as simulações isoladas mais realistas e refinando o ferramental



interconectado. Mesmo quando o enfoque não são os simuladores em si, como em estudos quanto a veículos inteligentes e ITS, a integração garante a validação das simulações em ambientes seguros e controlados.

Sistemas Inteligentes de Transporte precisam considerar a variabilidade de comportamentos, especialmente considerando a heterogeneidade da frota quanto a grau de integração ao sistema. Condutores humanos e autônomos precisam apresentar comportamento similar e consistente com as necessidades da segurança viária. Tais ajustes comportamentais de pelotões pode ser realizado a partir dos modelos de *car-following*.

Conforme a adoção de sistemas inteligentes de transporte – incluindo sistemas de assistência ao condutor e de controle de viagens – se populariza, também aumentam os estudos referente sobre o tema. Com simuladores de direção e de tráfego obtendo resultados consolidados, demonstram-se cada vez mais como um importante ferramental no desenvolvimento, aprimoramento, calibração e validação de sistemas inteligentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelgawad, K. et al. (2016). Advanced Traffic Simulation Framework for Networked Driving Simulators. *IFAC-PapersOnLine*, 49-11, 101–108. International Federation of Automatic Control.
- Abdelgawad, K. et al. (2017). Networked Driving Simulation: Applications, State of the Art, and Design Considerations. *MDPI Designs*, 1, 4. DOI:10.3390/designs1010004.
- Agrawal, S., Peeta, S. (2021). Hybrid route choice model incorporating latent cognitive effects of real-time travel information using physiological data. *Transportation Research Part F*, 81, 223-239. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.05.021>.
- Ali, Y. et al. (2020). Understanding the discretionary lane-changing behaviour in the connected environment. *Accident Analysis & Prevention*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105463>.
- Aramrattana, M. et al. (2017a). A simulation framework for cooperative intelligent transport systems testing and evaluation. *Transportation Research Part F*. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.08.004>.
- Aramrattana, M. et al. (2017b). Simulation of Cut-In by Manually Driven Vehicles in Platooning Scenarios. *ITSC IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- Aramrattana, M. et al. (2018). Extended Driving Simulator for Evaluation of Cooperative Intelligent Transport Systems. *SIGSIM-PADS*, 16, Maio 15 – 18, Banff, Canada. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2901378.2901397>.
- Aramrattana, M. et al. (2019a) A simulation framework for cooperative intelligent transport systems testing and evaluation. *Transportation Research Part F*, 61, 268-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2017.08.004>.
- Aramrattana M. et al. (2019b). Testing cooperative intelligent transport systems in distributed simulators. *Transportation Research Part F*, 65, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.07.020>
- Artal-Villa, L. et al. (2019). Extension of the 3DCoAutoSim to Simulate Vehicle and Pedestrian Interaction based on SUMO and Unity 3D. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*.
- Bifulco, G. N. et al., (2013). Driving behaviour models enabling the simulation of Advanced Driving Assistance Systems: revisiting the Action Point paradigm. *Transportation Research Part C* 36, 352–366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.09.009>.
- Calvert, S. C., et al. (2019). Evaluation and modelling of the traffic flow effects of truck platooning. *Transportation Research Part C* 105, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.019>
- Cassenti, D. et al. (2020). Advances in Simulation and Digital Human Modeling: Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conferences on Human Factors and Simulation, and Digital Human Modeling and Applied Optimization. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1206, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-51064-0>.
- Cham, R. K. C., et al. (2021). A neural network approach for traffic prediction and routing with missing data imputation for intelligent transportation system. *Expert Systems With Applications* 171, 114573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114573>.
- Detering, S., Schnieder, E. (2009). Requirements for Precise Simulation Models for Traffic Flow Optimizing



- ADAS. *12th IFAC Symposium on Transportation Systems*, Redondo Beach, CA, USA. International Federation of Automatic Control.
- Elallid, B. B., et al. (2022). A Comprehensive Survey on the Application of Deep and Reinforcement Learning Approaches in Autonomous Driving. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.03.013>.
- Felez J., et al. (2013). A full-scale simulation model to reproduce urban traffic in real conditions in driving simulators. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 89(9) 1099–1114. DOI: 10.1177/0037549713483557. IFAC PapersOnLine 54-20 (2021) 870–875. International Federation of Automatic Control.
- Gao, L. et al. (2021). ROS Integration of External Vehicle Motion Simulations with an AIMSUN Traffic Simulator as a Tool to Assess CAV Impacts on Traffic. IFAC PapersOnLine 54-20, 870–875. International Federation of Automatic Control. 10.1016/j.ifacol.2021.11.281.
- Harms, I. M., Brookhuis, K. A. (2016). Dynamic traffic management on a familiar road: Failing to detect changes in variable speed limits. *Transportation Research Part F* 38, 37–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2016.01.005>.
- Hassan, M. et al. (2021). Distributed Microscopic Traffic Simulation with Human-in-the-Loop Enabled by Virtual Reality Technologies. *Advances in Engineering Software*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2021.102985>.
- Hou, Y. et al. (2014). An integrated traffic-driving simulation framework: Design, implementation, and validation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 45, 138–153. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.02.004>.
- Hou, Y. et al. (2015). Simulation Based Testing and Evaluation Tools for Transportation Cyber-Physical Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- Ikeuchi, K. et al. (2005). Sustainable ITS Project Overview: Mixed Reality Traffic Experiment Space Under Interactive Traffic Environment For ITS. *IEEE Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium*, 735-738.
- Jeihani, M., et al. (2017). Integration of a driving simulator and a traffic simulator case study: Exploring drivers' behavior in response to variable message signs. *IATSS Research*, Volume 41, Issue 4, 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2017.03.001>.
- Jia, D. et al. (2021). Integrated simulation platform for conventional, connected and automated driving: A design from cyber-physical systems perspective. *Transportation Research Part C*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.102984>.
- Kuwahara, M. et al. (2005). An enhanced traffic simulation system for interactive traffic environment. *IEEE Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium*, 739-742.
- Laquai, F. et al. (2013) A Multi Lane Car Following Model for Cooperative ADAS. *ITSC2013 IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- Lee, G., Jung, J. I. (2019). Integrated Simulator for Evaluating Cooperative Eco-driving System. *ISPACS International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*. DOI: 10.1109/ISPACS48206.2019.8986231.
- Li, X., et al. (2019). How do drivers avoid collisions? A driving simulator-based study. *Journal of Safety Research*, 70, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2019.05.002>.
- Matsumoto, Y., Nishio, K. (2019). Reinforcement Learning of Driver Receiving Traffic Signal Information for Passing through Signalized Intersection at Arterial Road. *Transportation Research Procedia* 37, 449–456. 21st EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2018, 17-19 2018, Braunschweig, Alemanha. 10.1016/j.trpro.2018.12.219.
- Matsumoto, S., et al. (2014). Comparative Study on Fuel Consumption Reduction Effects of Eco-Driving Instructions Strategies. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 12, 1–8. DOI:10.1007/s13177-013-0066-8.
- Naseri, H., Nahvi, A., Karan, F. S. N. (2015). A new psychological methodology for modeling real-time car following maneuvers. *Travel Behaviour and Society* 2, 24–130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tbs.2014.12.002>.
- Ntousakis, I. A., et al. (2015). On Microscopic Modelling of Adaptive Cruise Control Systems. *Transportation Research Procedia* 6, 111 – 127. 4th International Symposium of Transport Simulation-ISTS' 14, 1-4, 2014, Corsica, França. DOI: 10.1016/j.trpro.2015.03.010.
- Olstam, J. J. (2006). Generation and Simulation of Surrounding Vehicles in a Driving Simulator. *Driving Simulation Conference DSC 2006 Europe*. ISBN 2-85782-641 9 - ISSN 0769-0266.



- Park, S. et al. (2019). Understanding impacts of aggressive driving on freeway safety and mobility: A multi-agent driving simulation approach. *Transportation Research Part F*, 64, 377-387. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.05.017>.
- Paz, A. et al. (2015). Towards a realistic traffic and driving simulation using 3D rendering. *ICCP IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*. DOI: 10.1109/ICCP.2015.7312683.
- Piao, J., McDonald, M. (2008). Safety Impacts of Variable Speed Limits – A Simulation Study. *IEEE Proceedings. Conference on Intelligent Transportation Systems*, 12-15.
- Preuk, K., et al. (2016). Does surrounding traffic benefit from an assisted driver with traffic light assistance system? *Transportation Research Part F* 43, 302–314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2016.09.008>.
- Rad, S. R. et al. (2020). Design and operation of dedicated lanes for connected and automated vehicles on motorways: A conceptual framework and research agenda. *Transportation Research Part C*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102664>.
- Savolainen, T. S. (2016). Examining driver behavior at the onset of yellow in a traffic simulator environment: Comparisons between random parameters and latent class logit models. *Accident Analysis and Prevention*. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.01.006>.
- Son, S. et al. (2020). Effects of advanced warning information systems on secondary crash risk under connected vehicle environment. *Accident Analysis and Prevention* 148, 105786. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105786>.
- Suh, J. et al. (2016). Design and evaluation of a model predictive vehicle control algorithm for automated driving using a vehicle traffic simulator. *Control Engineering Practice*, 51, 92–107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.03.016>.
- Sun, J. et al. (2015). Development and application of an integrated traffic simulation and multi-driving simulators. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 59, 1–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2015.08.003>.
- Talaat, H., et al. (2008). Simple Mixed Reality Infrastructure for Experimental Analysis of Route Choice Behavior: Applications of Intelligent Transportation Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2086, 72-80. DOI: 10.3141/2086-09.
- That, T. N., Casas, J. (2011). An integrated framework combining a traffic simulator and a driving simulator, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 20, 648-655. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.072>.
- Varotto, S. F. et al. (2021a). Driver speed compliance following automatic incident detection: Insights from a naturalistic driving study. *Accident Analysis and Prevention* 150, 105939. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105939>.
- Varotto, S. F. et al. (2021b). Adaptations in driver deceleration behaviour with automatic incident detection: A naturalistic driving study. *Transportation Research Part F* 78, 164–179. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.02.011>.
- Wen, M., et al. (2020). A scenario generation pipeline for autonomous vehicle simulators. *Hum. Cent. Comput. Inf. Sci*, vol. 10, Issue 24. <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00231-z>.
- Xiong, C., Zhang, L. (2013). A Descriptive Bayesian Approach to Modeling and Calibrating Drivers' En Route Diversion Behavior. *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems*, 14, 4. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2270974>.
- Xu, Z. et al. (2021). Studying freeway merging conflicts using virtual reality technology. *Journal of Safety Research* 76, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.11.002>.
- Zulkefli, M. A. M. et al. (2017). Hardware-in-the-loop testbed for evaluating connected vehicle Applications. *Transportation Research Part C*, 78, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.019>.

Tiago Kirsch Lanes (tiagokirschlanes@gmail.com)

Christine Tessele Nodari (piti@producao.ufrgs.br)

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

Daniel Sergio Presta García (daniel.garcia@ufrgs.br)

Laboratório de Sistemas de Transportes – Departamento de Engenharia de Produção e Transportes

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Av. Osvaldo Aranha. 99 – Porto Alegre. RS. Brasil