



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E  
GESTÃO TERRITORIAL

Lucas Franceschi

**Método para Avaliação, baseada em Visão Computacional, da Interpretabilidade da  
Sinalização Viária Vertical e Horizontal para o Tráfego de Veículos Autônomos**

Florianópolis

2021

Lucas Franceschi

**Método para Avaliação, baseada em Visão Computacional, da Interpretabilidade da Sinalização Viária Vertical e Horizontal para o Tráfego de Veículos Autônomos**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial  
Orientador: Prof. Jorge Destri Junior, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Franceschi, Lucas

Método para Avaliação, baseada em Visão Computacional,  
da Interpretabilidade da Sinalização Viária Vertical e  
Horizontal para o Tráfego de Veículos Autônomos / Lucas  
Franceschi ; orientador, Jorge Destri Junior , 2021.  
130 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Transportes e Gestão Territorial,  
Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2.  
Sistemas de Transportes. 3. Veículos Autônomos. 4. Rodovias.  
5. Sinalização Viária. I. , Jorge Destri Junior. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão  
Territorial. III. Título.

Lucas Franceschi

**Método para Avaliação, baseada em Visão Computacional, da Interpretabilidade da Sinalização Viária Vertical e Horizontal para o Tráfego de Veículos Autônomos**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Amir Mattar Valente, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Eduardo Lobo, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng.<sup>a</sup> Camila Belleza Maciel Barreto, Dra.  
Avaliadora Externa

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial

---

Prof.<sup>a</sup> Ana Maria Benciveni Franzoni, Dra.  
Coordenadora do Programa

---

Prof. Jorge Destri Junior, Dr. Eng.  
Orientador(a)

Florianópolis, 2021

Dedico esse trabalho à UFSC e a todas as universidades públicas do Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Jorge Destri Junior, sou grato pela orientação deste trabalho e pelo apoio e amizade oferecidos desde que nos conhecemos. À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Departamento de Engenharia Civil e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial (PPGTG) e todos os seus docentes, agradeço pela estrutura disponibilizada e pelo aprendizado desenvolvido ao longo do curso de mestrado. De forma especial agradeço ao Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans/UFSC) pelo acesso aos dados e ferramentas necessárias para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

A evolução tecnológica dos Veículos Autônomos (VA) traz consigo perspectivas de diversos benefícios a serem ganhos pela sociedade. Desde a redução de acidentes, melhoria da capacidade de tráfego das rodovias e redução dos custos operacionais para o transporte, existem diversos incentivos para que os transportadores adotem a tecnologia tão cedo esteja disponível no mercado. Isso é o caso especialmente do setor de transporte rodoviário de cargas brasileiro, que desempenha um papel vital para a economia e bem-estar da nação. No entanto, os VA necessitam ler e interpretar com clareza as características da rodovia para que possam navegar com segurança, possuindo necessidades diferentes dos condutores humanos. Por esse motivo, convém que a infraestrutura rodoviária brasileira esteja preparada para a recepção desses veículos, para que não haja obstáculos estruturais para o crescimento do setor de transporte de cargas no país. Este trabalho explora as necessidades estruturais para os VA em rodovias rurais em termos de leitura e interpretação de suas características, com foco na sinalização viária. Para realizar isso, além de uma revisão de literatura sobre o tema, realiza-se a proposição de um método para a avaliação das rodovias em termos do quão interpretáveis são as suas sinalizações, através do Índice de Interpretabilidade da Sinalização – IIS. O método proposto para cálculo do IIS é aplicado em 14 trechos viários no estado de SC que somam 235,6 km, e os resultados da aplicação prática demonstram a aplicabilidade do método proposto. Uma análise de sensibilidade é realizada com base nos dados da aplicação prática através de uma análise de correlação, onde se demonstra que o valor do IIS pode estar relacionado com o tipo das placas existentes no trecho analisado, mas que esse valor não necessariamente está associado com a qualidade da sinalização do ponto de vista de um condutor humano. Embora os fatores associados com a interpretação da sinalização por VA sejam complexos, a discussão apresentada e o método de avaliação proposto podem ser de utilidade para as entidades brasileiras no planejamento da infraestrutura viária em relação ao tráfego dos VA e a sua evolução ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** Sistemas de transportes. Veículos Autônomos. Rodovia. Sinalização. Segurança. Visão computacional. Infraestrutura.

## ABSTRACT

Autonomous Vehicles (AV) as a technological evolution brings with it perspectives of several benefits to be gained by society. There are several incentives for carriers to adopt the technology as soon as it becomes available in the market, which include reducing accidents, improving road traffic capacity, and reducing operating costs for transport. This is especially the case for the Brazilian road freight transport sector, which plays a vital role for the nation's economy and well-being. However, AVs have different needs than human drivers, and they need to clearly read and interpret the characteristics of the road so that they can navigate safely. For this reason, the Brazilian highway infrastructure should be prepared to receive these vehicles, so that there are no structural obstacles to the growth of the freight transport sector in the country. This work explores the main structural needs for AV on rural roads in terms of reading and interpreting their characteristics, with a focus on traffic signs and road markings. To accomplish this, in addition to a literature review on the subject, a method for the classification of highways in terms of how interpretable their signs are, through the Road Interpretability Index – IIS, is proposed. The proposed method for calculating the IIS is then applied to 14 road segments in the state of SC, totaling 235.6 km, and the results of the practical application demonstrate the applicability of the proposed model. A sensitivity analysis of the model is performed based on the practical application data through a correlation analysis, which demonstrates that the IIS value may be related to the type of traffic signs that exist in the analyzed segment, but that this value is not necessarily associated with the quality of the traffic signaling from the point of view of a human driver. Although the factors associated with the interpretation of traffic signaling by AVs are complex, the discussion presented, and the proposed classification method might be useful for Brazilian entities in planning the road infrastructure and its evolution over time for AV traffic.

**Keywords:** Transportation Systems. Autonomous Vehicles. Road. Traffic Signaling. Traffic safety. Computational Vision. Infrastructure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes da operação de um Veículo Autônomo.....	27
Figura 2 - Primeira placa de trânsito emitida para um veículo autônomo.....	34
Figura 3 - Diagramas do fluxo de operação de VA com sistemas modulares (a) ou ponta-a-ponta (b) .....	38
Figura 4 – Componentes do STRC.....	43
Figura 5 – Modelo estrutural de controle genérico STAMP .....	45
Figura 6 – Modelo STAMP adaptado para análise da reação do setor à introdução dos VA ..	47
Figura 7 – Síntese dos principais atores institucionais do setor rodoviário em esfera federal .	54
Figura 8 – Exemplos de situações que podem afetar a detecção da sinalização vertical .....	65
Figura 9 – Exemplos de relações entre duas variáveis ( $x$ e $y$ ) e o valor resultante do coeficiente $r$ .....	67
Figura 10 – Resumo do processo de seleção de portfólio bibliográfico PROKNOW-C .....	71
Figura 11 – Número de trabalhos selecionados por ano.....	78
Figura 12 - Fluxograma das etapas propostas para aplicação do método para avaliação de trechos.....	86
Figura 13 – Faixas de interpretabilidade, em função do resultado obtido para o IIS.....	95
Figura 14 – Localização geográfica dos trechos analisados.....	98
Figura 15 – Condição do pior trecho para a interpretabilidade da sinalização vertical, trecho #10 ( $IISV = 1,15$ ).....	102
Figura 16 – Condição geral do melhor trecho para a interpretabilidade da sinalização vertical, trecho #5 ( $IISV = 9,50$ ).....	102
Figura 17 – Condição do pior trecho para a interpretabilidade da sinalização horizontal, trecho #9 ( $IISH = 4,96$ ).....	103
Figura 18 – Condição do melhor trecho para a interpretabilidade da sinalização horizontal, trecho #1 ( $IISH = 7,66$ ).....	103
Figura 19 – Relação entre as variáveis consideradas para análise de sensibilidade e o valor do IIS. ....	106

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Número de acidentes registrados pela PRF entre 01 de janeiro de 2017 e 29 de fevereiro de 2020 por causa registrada e classificados quanto à falha humana do condutor. ..	17
Quadro 2 – Níveis de automação veicular.....	29
Quadro 3 – Número de resultados obtidos por base de dados.....	74
Quadro 4 – Trabalhos selecionados durante a revisão sistemática.....	77
Quadro 5 – Classificação da sinalização vertical de regulamentação .....	91
Quadro 6 – Classificação da sinalização vertical de advertência .....	91
Quadro 7 – Resumo dos trechos analisados .....	97
Quadro 8 – Número de placas e de quadros analisados em cada trecho .....	99
Quadro 9 – Número de falhas na identificação da sinalização.....	99
Quadro 10 – Variáveis de referência .....	100
Quadro 11 – Resultado da avaliação dos trechos viários através do <i>IIS</i> .....	101
Quadro 12 – Resumo estatístico dos resultados observados .....	103
Quadro 13 – Dados considerados para a análise de sensibilidade e coeficiente de correlação $r$ resultante entre cada variável e o valor do <i>IIS</i> .....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANPET	Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BDTD	Biblioteca Digital de Teses e Dissertações
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CR	Classe de Risco
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
SENATRAN	Secretaria Nacional de Trânsito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOI	<i>Digital Object Identifier</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IA	Inteligência Artificial
IIS	Índice de Interpretabilidade da Sinalização
LabTrans	Laboratório de Transportes e Logística
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
PATH	<i>California Partners for Advanced Transit and Highways</i>
PRF	Polícia Rodoviária Federal
PROKNOW-C	<i>Knowledge Development Process - Constructivist</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RNTRC	Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Carga
RS	Revisão Sistemática
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SFV	Sistema Federal de Viação
SNTT	Secretaria Nacional de Transportes Terrestres
SNV	Sistema Nacional de Viação
STRC	Sistema de Transporte Rodoviário de Cargas
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UMI	Unidades de Medição Inerciais

USDOT	<i>United States Department of Transportation</i>
V2I	Comunicação Veículo-Infraestrutura
V2V	Comunicação Veículo-Veículo
VA	Veículos Autônomos
VAC	Veículos Autônomos Conectados
VAE	Veículos Autônomos Elétricos
VC	Visão Computacional
VE	Veículos Elétricos
VPN	<i>Virtual Private Network</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS .....	20
1.1.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>20</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>20</b>
1.2	JUSTIFICATIVA .....	21
1.3	LIMITAÇÕES .....	22
1.4	METODOLOGIA.....	22
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	24
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>25</b>
2.1	VEÍCULOS AUTÔNOMOS .....	25
2.1.1	<b>Níveis de automação .....</b>	<b>27</b>
2.1.2	<b>Veículos Autônomos Conectados.....</b>	<b>29</b>
2.2	HISTÓRICO .....	31
2.3	PRINCIPAIS TECNOLOGIAS ADOTADAS NOS VA.....	36
2.3.1	<b>Arquitetura interna do sistema .....</b>	<b>37</b>
2.3.2	<b>Sensores e outros equipamentos .....</b>	<b>39</b>
2.3.3	<b>Localização .....</b>	<b>40</b>
2.4	VISÃO SISTÊMICA DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO.....	42
2.4.1	<b>Principais atores do setor rodoviário na esfera federal no Brasil.....</b>	<b>49</b>
2.5	POSSÍVEIS IMPACTOS DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS NA SOCIEDADE	54
2.5.1	<b>Redução do número de acidentes .....</b>	<b>55</b>
2.5.2	<b>Fatores ambientais.....</b>	<b>56</b>
2.5.3	<b>Melhoria na capacidade de fluxo das rodovias .....</b>	<b>58</b>
2.5.4	<b>Redução de custos operacionais ligados ao transporte de cargas .....</b>	<b>59</b>

2.6	PREPARAÇÃO DAS RODOVIAS PARA OS VA.....	60
2.7	IMPORTÂNCIA DA INTERPRETAÇÃO DA SINALIZAÇÃO VIÁRIA PARA A SEGURANÇA.....	62
2.8	CONSTRUÇÃO DE MÉTODO DE APOIO À DECISÃO.....	65
<b>3</b>	<b>REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA.....</b>	<b>68</b>
3.1	SELEÇÃO DAS BASES DE DADOS.....	72
3.2	SELEÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE.....	72
3.3	PROCESSO INICIAL DE FILTRAGEM.....	74
3.4	AVALIAÇÃO DA RELEVÂNCIA CIENTÍFICA.....	76
3.5	RESULTADO DA COLETA DE TRABALHOS.....	76
3.6	ANÁLISE DA LITERATURA COLETADA.....	78
<b>4</b>	<b>MÉTODO PROPOSTO PARA A AVALIAÇÃO DA INTERPRETABILIDADE DAS RODOVIAS POR SISTEMAS DE VISÃO COMPUTACIONAL.....</b>	<b>83</b>
4.1	PLANEJAMENTO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO.....	86
4.2	INSTRUMENTAÇÃO DO VEÍCULO.....	87
4.3	COLETA DE DADOS.....	87
4.4	PROCESSAMENTO AUTOMATIZADO.....	88
4.5	PROCESSAMENTO MANUAL.....	89
4.6	CÁLCULO DO IIS.....	89
<b>4.6.1</b>	<b>Divisão dos tipos de sinalização vertical em classes de risco.....</b>	<b>90</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Obtenção do valor do IIS.....</b>	<b>91</b>
4.7	AVALIAÇÃO DOS TRECHOS ANALISADOS.....	94
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO PRÁTICA EM RODOVIAS FEDERAIS E ESTADUAIS NO ESTADO DE SANTA CATARINA.....</b>	<b>96</b>
5.1	TRECHOS ANALISADOS.....	97
5.2	RESULTADOS.....	99

5.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO IIS .....	104
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
	REFERÊNCIAS .....	112
	APÊNDICE A – REGISTROS FOTOGRÁFICOS DA CONDIÇÃO DA SINALIZAÇÃO VIÁRIA NOS TRECHOS RODOVIÁRIOS ANALISADOS.....	123

## 1 INTRODUÇÃO

Com a evolução tecnológica dos transportes, diversos fabricantes de veículos já estão se mobilizando para disponibilizar um novo tipo de veículo para o mercado automotivo: os Veículos Autônomos (VA) (KOPELIAS *et al.*, 2020). Está em curso um processo de transição entre os veículos convencionais – dirigidos por humanos – e os VA que, parcialmente ou completamente, dirigem a si mesmos (ANDERSON *et al.*, 2016). Uma vez que essa tecnologia é promissora e possui um grande potencial para mudar o cotidiano dos transportes, a pesquisa relacionada com o desenvolvimento dos VA e dos Veículos Autônomos Conectados (VAC) (que são veículos que, além de possuírem sistemas de direção autônoma, comunicam-se com outros veículos), tem avançado de forma significativa nos anos mais recentes (ELLIOTT; KEEN; MIAO, 2019).

Os impactos do aparecimento dessa tecnologia são complexos e abrangem desde o campo tecnológico (ADEGOKE *et al.*, 2019; ROMERO *et al.*, 2018), passando por questões de políticas públicas e regulação (BAGLOEE *et al.*, 2016; IMAI, 2019), questões ambientais (KOPELIAS *et al.*, 2020), questões referentes a integração com os outros usuários do sistema de transporte (LATHAM; NATTRASS, 2019), questões de segurança viária (BRACY, BAO, MUNDY, 2019; PYRIALAKOU *et al.*, 2020), integração com ambientes urbanos (MEDINA-TAPIA; ROBUSTÉ, 2018) e chegando até a complexas questões de ética, moral e responsabilidade na ocorrência de acidentes (MORDUE; YEUNG; WU, 2020).

Em relação à segurança viária, Anderson *et al.* (2016) dizem que, se os veículos autônomos tiverem sucesso, eles devem prevenir a maioria dos acidentes hoje atribuídos a falhas humanas. Nas estradas federais do Brasil, conforme dados disponibilizados pela Polícia Rodoviária Federal (PRF) (BRASIL, 2020), cerca de 78% dos acidentes ocorridos entre 1 de janeiro de 2017 e 29 de fevereiro de 2020 possuem causas que podem ser atribuídas a falhas humanas, como “falta de atenção à condução”, “velocidade incompatível” e “desobediência às normas de trânsito pelo condutor”. Os totais de acidentes por causa registrada, nesse período, podem ser observados no Quadro 1. Portanto, em um cenário de uso generalizado dos VA no Brasil, de acordo com a estimativa de Anderson *et al.* (2016), há potencial para uma expressiva redução do número de acidentes em rodovias federais.

Quadro 1 – Número de acidentes registrados pela PRF entre 01 de janeiro de 2017 e 29 de fevereiro de 2020 por causa registrada e classificados quanto à falha humana do condutor.

Causas registradas (PRF)	Falha humana?	Número de Acidentes	% do total
Falta de Atenção à Condução	Sim	89.014	37,53%
Velocidade Incompatível	Sim	24.389	10,28%
Desobediência às normas de trânsito pelo condutor	Sim	21.833	9,20%
Ingestão de Álcool	Sim	17.930	7,56%
Não guardar distância de segurança	Sim	14.974	6,31%
Defeito Mecânico no Veículo	Não	12.742	5,37%
Pista Escorregadia	Não	9.524	4,02%
Condutor Dormindo	Sim	9.364	3,95%
Falta de Atenção do Pedestre	Não	6.720	2,83%
Animais na Pista	Não	6.020	2,54%
Ultrapassagem Indevida	Sim	4.737	2,00%
Defeito na Via	Não	3.711	1,56%
Avárias e/ou desgaste excessivo no pneu	Não	3.577	1,51%
Mal Súbito	Sim	2.465	1,04%
Restrição de Visibilidade	Não	1.985	0,84%
Objeto estático sobre o leito carroçável	Não	1.824	0,77%
Carga excessiva e/ou mal acondicionada	Não	1.266	0,53%
Fenômenos da Natureza	Não	1.020	0,43%
Sinalização da via insuficiente ou inadequada	Não	978	0,41%
Agressão Externa	Não	810	0,34%
Ingestão de álcool e/ou substâncias psicoativas pelo pedestre	Não	750	0,32%
Desobediência às normas de trânsito pelo pedestre	Não	722	0,30%
Deficiência ou não Acionamento do Sistema de Iluminação/Sinalização do Veículo	Não	598	0,25%
Ingestão de Substâncias Psicoativas	Sim	257	0,11%
<b>Total</b>	<b>Sim</b>	<b>184.963</b>	<b>77,97%</b>
	<b>Não</b>	<b>52.247</b>	<b>22,03%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da Polícia Rodoviária Federal (BRASIL, 2020).

Por mais que a utilização dos VA possa estar ligada à redução de acidentes causados por falha humana, no entanto, pesquisas mais recentes mostram preocupações em relação a novos perigos associados aos VA. Um desses trabalhos, por exemplo, fala:

Ainda que a melhoria na segurança viária seja um dos mais antecipados benefícios dos veículos autônomos (VA), pesquisadores também identificaram muitos riscos, como o potencial para falhas de sistema e interferência de *hackers*, um possível aumento na tomada de risco por parte dos usuários de VA, e riscos associados à formação de comboios em condições de tráfego misto. Esses riscos podem cancelar

ou diminuir os benefícios de remover o fator humano da segurança viária. (PYRIALAKOU *et al.*, 2020, p. 249, tradução nossa)<sup>1</sup>.

#### Outro trabalho recente também pontua:

O perigo de um veículo sendo dirigido por um computador é completamente diferente dos perigos da direção humana. Nós tememos que o computador não inclua todos os eventos que podem acontecer na rodovia. O que acontecerá se um caminhão aparecer a nossa frente, cuja cor mistura-se com a cor das nuvens no fundo? O computador poderá reconhecer o seu contorno? (SKARBK-ZABKIN; SZCZEPANEK, 2018, p. 2, tradução nossa)<sup>2</sup>.

Ainda, o trabalho de Mordue, Yeung e Wu (2020) possui afirmações chave a respeito da questão da segurança viária em relação a adoção dos VA. Nele, os autores explicam:

Enquanto muitos preveem que os veículos autônomos eventualmente farão com que os acidentes virtualmente desapareçam, alguns dos mais fortes proponentes do segmento de veículos autônomos aceitam que o caminho até alcançar esse ideal será problemático, por consequência de falhas de equipamento, defeitos de sensores e o fato de que se antecipa um significativo período em que veículos controlados por humanos coexistirão com veículos autônomos. (MORDUE; YEUNG; WU, 2020, p. 176, tradução nossa)<sup>3</sup>.

O que se percebe através dessas citações é que os benefícios relacionados à adoção dos VA na segurança viária, por mais promissores que sejam, devem ser considerados com cuidado frente aos novos perigos que poderão existir associados à tecnologia (BRACY, BAO, MUNDY, 2019; PYRIALAKOU *et al.*, 2020).

Outro aspecto importante está relacionado à redução dos custos para o transporte rodoviário de cargas. Bucsky (2018) comenta que um dos principais obstáculos para o aumento da eficiência no transporte rodoviários de cargas é o limite de horas diárias de trânsito para o condutor, que possui um impacto grande, especialmente em viagens longas. No Brasil, a Lei nº 13.103 de 2015 (BRASIL, 2015) estabelece uma jornada diária de oito horas para os motoristas, ou doze horas caso haja acréscimo de horas extras via acordo ou convenção coletiva. A mesma lei estabelece que o condutor não pode dirigir por mais de 5 horas seguidas, e que é obrigatório

---

<sup>1</sup> Texto original: “Although improved road safety is one of the most highly anticipated benefits of autonomous vehicles (AVs), researchers have also identified many risks, such as the potential for system failures and hacking, a possible increase in AV users’ risk-taking behavior, and the risks associated with platooning in mixed traffic conditions. These risks may cancel out or diminish the safety benefits expected to result from removing the human factor” (PYRIALAKOU *et al.*, 2020, p. 249)

<sup>2</sup> Texto original: “The danger of a car being driven by a computer is completely different from the dangers of human driving. We are afraid that the computer program will not include all events that may occur on the road. What will happen if a truck appears in front of us, whose colour blends with the colour of clouds in the background. Will the computer program recognize its contour?” (SKARBK-ZABKIN; SZCZEPANEK, 2018, p. 2)

<sup>3</sup> Texto original: “While many forecast that autonomous vehicles will eventually cause accidents to virtually disappear, some of the autonomous vehicle segment’s strongest proponents accept that the path to reaching that ideal will be problematic, a consequence of equipment failures, sensor malfunctions and the fact that a significant period is anticipated when human-controlled vehicles co-exist with autonomous ones.”(MORDUE; YEUNG; WU, 2020, p. 176)

um descanso de 30 minutos. A automação, nesse cenário, permitiria que o veículo viajasse por um número maior de horas por dia, reduzindo o tempo total necessário para o transporte.

Flämig (2016) também comenta que, de um ponto de vista econômico, a ausência de condutor humano, o controle da aceleração para minimizar o consumo de combustível, a alta confiabilidade e a redução do envolvimento em acidentes são razões significativas para se adotar a automação na cadeia de transporte rodoviário de cargas. Assim, a dimensão econômica dos impactos provocados pelos VA no setor de transporte rodoviário de cargas é outro fator motivador para a adoção dessa tecnologia.

Em diversas áreas envolvidas no transporte rodoviário existem pesquisas sendo realizadas para esclarecer quais serão os impactos dos VA e como se preparar para eles. No entanto, uma das áreas que ainda carece de pesquisa são os impactos dos VA na infraestrutura rodoviária em si. Steyn e Maina (2019, p. 274, tradução nossa) dizem que “ainda há pouca pesquisa em relação ao efeito da operação dos VA na estrutura dos pavimentos rodoviários”<sup>4</sup>. Liu *et al.* (2019, p. 1, tradução nossa) também afirmam que “atualmente, a pesquisa a respeito da infraestrutura rodoviária para dar suporte aos veículos autônomos conectados ainda está em sua infância”<sup>5</sup>.

Além disso, um estudo publicado pela empresa KPMG, em 2020, avaliou trinta países em relação à facilidade com que a tecnologia dos VA seria adotada e concluiu que, dentre os trinta países, o Brasil está na última posição (KPMG, 2020). Se as previsões, em países na vanguarda desse desenvolvimento, já dizem que os VA com as funções mais avançadas só serão dominantes daqui a trinta anos (LIU *et al.*, 2019), o Brasil pode demorar ainda mais para aproveitar os benefícios dos VA, caso não haja um aumento da pesquisa e de investimentos no setor.

Outro cenário relevante no Brasil diz respeito ao transporte de cargas que, de acordo com a Confederação Nacional de Transportes, é realizado predominantemente (60%) através da modalidade rodoviária (BRASIL, 2018a). Assim, o sistema rodoviário é o principal meio de transporte de cargas no Brasil e desempenha um papel vital para a economia e bem-estar da nação, o que implica em uma “busca constante de eficiência e de melhoria do nível dos serviços oferecidos, o que passa necessariamente pela absorção de novas tecnologias e novos

---

<sup>4</sup> Texto original: “there is limited research regarding the effect of AV operations on road pavement structures” (STEYN; MAINA, 2019, p. 274)

<sup>5</sup> Texto original: “Currently, the research into road infrastructure to support CAVs is still in its infancy.” (LIU *et al.*, 2019, p. 1)

procedimentos” (VALENTE *et al.*, 2016, p. 2). É de se esperar que, assim que a tecnologia dos VA seja viável para o transporte rodoviário de cargas, os transportadores no Brasil queiram adotá-la, devido às vantagens econômicas desse tipo de operação. Nessa hipótese, o setor de transporte de cargas no Brasil pode encontrar um gargalo estrutural caso as estradas não comportem esses veículos. Dentre as principais questões relacionadas à utilização das estradas pelos VA está a possibilidade de o VA realizar a leitura da rodovia. Ou seja, a rodovia deve ser interpretada pelo veículo facilmente.

Motivado por essas questões – a falta de pesquisa mundial em relação aos impactos dos VA na infraestrutura rodoviária; os potenciais benefícios econômicos dessa tecnologia para a indústria brasileira de transporte de cargas; a grande importância do modo rodoviário para o transporte de cargas no Brasil e o potencial de redução de acidentes associado - a pergunta de pesquisa formulada é: como a sinalização rodoviária pode ser avaliada, em termos da sua interpretabilidade por algoritmos de Visão Computacional (VC), para habilitar o uso de VA com a segurança adequada no setor de transporte rodoviário?

## 1.1 OBJETIVOS

Para explorar o tema e responder à pergunta de pesquisa formula-se o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação, expostos abaixo.

### 1.1.1 Objetivo geral

Proposta de método baseado em visão computacional para avaliação da interpretabilidade da sinalização viária vertical e horizontal para o tráfego de veículos autônomos em rodovias.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a. Obter um panorama das principais tecnologias e técnicas utilizadas pelos VA para navegação e orientação em rodovias.
- b. Levantar as principais necessidades estruturais relacionadas ao tráfego dos VA em rodovias através de análise narrativa e sistemática da literatura.
- c. Identificar os métodos existentes para a avaliação da interpretabilidade das rodovias através de revisão sistemática de literatura.

- d. Analisar a sensibilidade do método proposto aos parâmetros de entrada da aplicação real, aferindo assim quais fatores podem influenciar os resultados do método proposto.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Estudos estimam que, na década de 2030, veículos nos níveis iniciais de automação (que possuam controle automatizado de direção longitudinal e lateral) serão dominantes no mundo, enquanto estarão em ascensão os veículos nos níveis intermediários de automação (com monitoramento do ambiente e resposta a problemas) (LIU *et al.*, 2019). Conforme citado anteriormente, os benefícios da adoção dos veículos autônomos poderão ser extensos, reduzindo o número de acidentes das estradas, além de permitir a realização de viagens mais econômicas. No entanto, as necessidades dos veículos autônomos nas estradas rurais diferem das necessidades dos veículos convencionais, conduzido por humanos. Uma das principais necessidades para a operação segura dos VA é que o sistema possa reconhecer os limites e características da rodovia e navegar sem a necessidade de entrada humana. Ademais, existe uma carência mundial de pesquisa em relação aos impactos dos VA na infraestrutura rodoviária (LIU *et al.*, 2019; STEYN, MAINA, 2019).

Caso se concretizem as previsões de Liu *et al.* (2019) de que os veículos em níveis iniciais de automação serão dominantes a partir da década de 2030, isso deixa o Brasil com um horizonte de 10 a 20 anos para que a infraestrutura rodoviária seja preparada para receber tais veículos. Além disso, o setor de transporte rodoviário de cargas desempenha um importante papel para a economia brasileira, o que faz com que esteja em constante busca por eficiência e melhoria dos serviços, passando necessariamente pela busca por novas tecnologias (VALENTE *et al.*, 2016). Isso significa que, assim que a tecnologia dos VA estiver disponível no mercado, ela será incorporada no setor e existirá demanda para que as rodovias estejam preparadas para tais veículos. No quesito de preparação estrutural para ao crescimento dos VA, o Brasil já se encontra atrasado em relação a outros países (KPMG, 2020), existindo o risco de que a tecnologia encontre obstáculos no país devido a necessidades estruturais.

Dada a natureza complexa das mudanças que os VA poderão exigir na infraestrutura brasileira de transportes rodoviários, combinada à grande proporção do uso do transporte rodoviário de cargas em relação a outros modos no Brasil, convém que tal assunto seja abordado desde já, identificando de forma antecipada as necessidades dos VA no transporte rodoviário

de cargas, e permitindo que sejam tomadas ações no sentido de preparar as rodovias para tal evolução tecnológica.

### 1.3 LIMITAÇÕES

Dada a diversidade de formas com que os VA poderão impactar o setor de transporte de cargas, além do elevado número de variáveis existentes nesse universo, o escopo desta dissertação necessita ser limitado para viabilizar a sua realização. Assim, adotam-se as seguintes premissas neste trabalho:

- Serão detalhados os impactos da adoção de VA exclusivamente na questão da infraestrutura rodoviária, com foco na interpretação da rodovia pelo veículo, não sendo aprofundados os impactos e necessidades nas áreas de segurança viária, políticas públicas, questões sociais, éticas e morais, nem outras áreas que possivelmente serão impactadas pelos VA.
- Será priorizado o setor de transporte rodoviário de média e longa distância, em detrimento a outros setores como o transporte urbano. Por esse motivo, serão analisadas as rodovias rurais em detrimento às vias urbanas.
- Em relação à tecnologia dos VA e os impactos na infraestrutura rodoviária, serão aprofundados os aspectos de percepção da situação da rodovia, como a leitura de sinalização e a orientação e navegação dos veículos. Não serão analisadas as necessidades relacionadas a outros aspectos da infraestrutura rodoviária como o pavimento, interseções, conexão com redes de dados etc.

### 1.4 METODOLOGIA

Os objetivos dessa dissertação de mestrado são almeçados por meio da realização de pesquisa científica. Sobre pesquisa, Gil (2002, p.17) afirma:

Pode-se definir pesquisa como o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. A pesquisa é requerida quando não se dispõe de informação suficiente para responder ao problema, ou então quando a informação disponível se encontra em tal estado de desordem que não possa ser adequadamente relacionada ao problema.

Ainda sobre pesquisa e ciência, de acordo com Gomes (2001, p. 2):

Ciência é todo e qualquer conhecimento produzido sistematicamente através de um método previamente definido, apoiado em técnicas de investigação que proporcione o conhecimento acerca de um determinado objeto de estudo.

Assim, tem-se que a realização de pesquisa científica é um processo sistemático, realizado através de método previamente definido. Por este motivo, nesta seção, apresenta-se a metodologia científica adotada neste trabalho. Sobre metodologia científica, Prodanov e Freitas (2013, p. 14) afirmam que: “A Metodologia é a aplicação de procedimentos e técnicas que devem ser observados para construção do conhecimento, com o propósito de comprovar sua validade e utilidade nos diversos âmbitos da sociedade”.

Prodanov e Freitas (2013) classificam a pesquisa científica de acordo com a sua natureza, seus objetivos, seus procedimentos técnicos e da forma de abordagem do problema. Embora classifiquem a pesquisa em tipos, os autores também ressaltam que:

Esses tipos de pesquisa, de acordo com as diversas classificações, são abertos e podem ser usados de forma concomitante, isto é, uma mesma pesquisa pode adotar característica de mais de um tipo, no entanto, um deles será predominante (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 71).

Para melhor compreensão do trabalho aqui realizado e interpretação dos seus resultados, realiza-se a classificação dessa pesquisa de acordo com as categorias apresentadas por Prodanov e Freitas (2013) e por Gil (2002). Assim, a presente pesquisa classifica-se:

- Do ponto de vista de sua natureza, como **pesquisa aplicada**, na qual se “objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos” (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 51).
- Do ponto de vista de seus objetivos, como **pesquisa descritiva**, que “Visa descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relação entre variáveis” (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 52). A definição apresentada por GIL (2002, p. 42) também concorda com essa classificação: “As pesquisas descritivas têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis”.
- Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, como **pesquisa bibliográfica e experimental**. Bibliográfica uma vez que “desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos” (GIL, 2002, p. 44). Experimental, pois, nela “o pesquisador procura refazer as condições de um fato a ser estudado, para observá-lo sob seu controle” (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 57) e também “consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo,

definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (GIL, 2002, p. 47).

- Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, como **pesquisa qualitativa**. Enquanto alguns aspectos da pesquisa podem ser considerados característicos da pesquisa quantitativa, os seguintes fatores a classificam como qualitativa: a meta da pesquisa será o entendimento de um determinado fenômeno, em detrimento da predição ou confirmação de uma hipótese; a observação do pesquisador será o principal instrumento de coleta de dados, em detrimento de instrumentos como escalas, testes ou questionários; a amostra analisada será não-representativa em detrimento de uma amostra ampla e representativa; e o modo de análise será indutivo, pelo pesquisador, em detrimento de uma análise dedutiva, por método estatístico (PRODANOV; FREITAS, 2013).

No que tange a forma de abordagem do problema e a interseção entre pesquisa qualitativa e quantitativa, Prodanov e Freitas (2013, p. 71) afirmam que:

É comum autores não diferenciarem abordagem quantitativa da qualitativa, pois consideram que a pesquisa quantitativa é também qualitativa. Entendemos, então, que a maneira pela qual pretendemos analisar o problema ou fenômeno e o enfoque adotado é o que determina uma metodologia quantitativa ou qualitativa. [...] Assim, o tipo de abordagem utilizada na pesquisa dependerá dos interesses do autor (pesquisador) e do tipo de estudo que ele desenvolverá. É importante acrescentar que essas duas abordagens estão interligadas e complementam-se.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente documento está estruturado da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do trabalho, incluindo uma revisão teórica sobre os VA, conceitos e definições, histórico, tecnologias e principais impactos estimados do seu uso, além de uma fundamentação sobre a relação entre a sinalização e a segurança viária, e a fundamentação para as técnicas utilizadas para a proposição do método de avaliação da interpretabilidade da sinalização e para a sua análise de sensibilidade. No capítulo 3 realiza-se uma revisão sistemática por meio de procedimento estruturado para a coleta e análise de artigos sobre o tema. O capítulo 4 apresenta a proposta de método de avaliação da interpretabilidade das rodovias, que é aplicado em cenários reais no capítulo 5. As últimas discussões e considerações finais do trabalho são apresentadas no capítulo 6

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico para o desenvolvimento do presente trabalho. As informações aqui apresentadas foram obtidas através de um processo de revisão narrativa de literatura, na qual foram analisados diversos trabalhos relevantes para a contextualização do tema, porém sem que o processo de busca e seleção desses trabalhos fosse estruturado. Uma pesquisa sistemática de literatura (com os processos de coleta e seleção de artigos devidamente estruturados e registrados) será apresentada no próximo capítulo.

Nessa revisão narrativa, portanto, apresentam-se os VA, abordando conceitos a respeito de como funcionam e como se classificam em termos de nível de automação (seção 2.1), e um histórico do seu desenvolvimento nas últimas décadas (seção 2.2). Após isso, são apresentadas as tecnologias que permitem a operação automatizada dos veículos e como elas interagem entre si (seção 2.3). Um panorama do setor rodoviário e de como ele poderá ser afetado pelos VA é apresentado na sequência, através de uma análise com visão sistêmica e uma identificação dos principais atores no setor (seção 2.4). Também se realiza uma revisão das principais áreas em que a adoção dos VA deve impactar na sociedade, demonstrando as vantagens e as complexidades envolvidas nesse processo (seção 2.5). São também feitos comentários acerca da adequação da infraestrutura rodoviária para os VA (seção 2.6) e sobre a relação entre a interpretação da sinalização e a segurança viária (seção 2.7). Finalmente, se apresenta a fundamentação teórica para o processo de proposição de método de apoio à decisão (seção 2.8)

### 2.1 VEÍCULOS AUTÔNOMOS

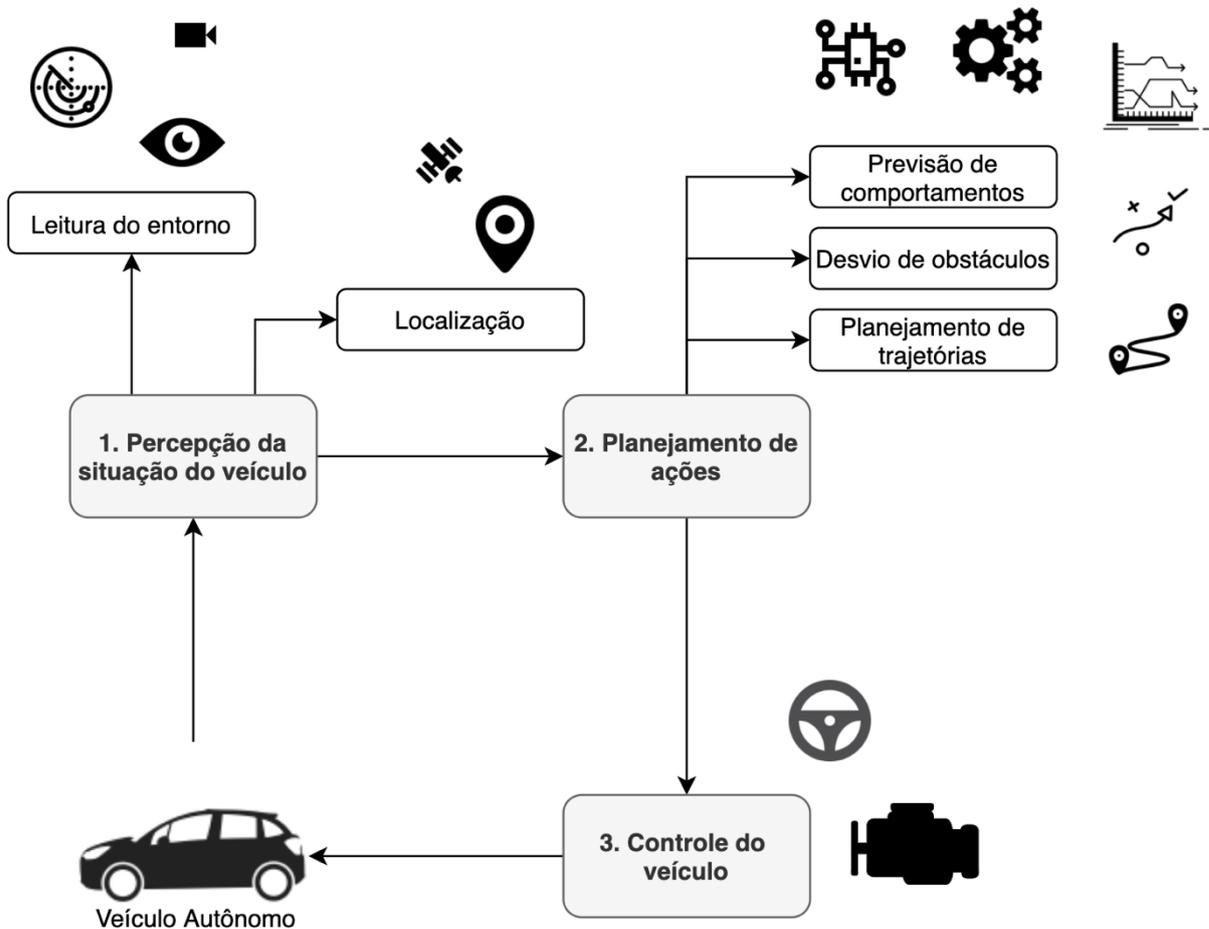
Cabe iniciar este panorama definindo o que são os VA, quais as tecnologias envolvidas e, em geral, como se compreende essa tecnologia atualmente. A agência estadunidense de segurança viária (*National Highway Traffic Safety Administration*, NHTSA), define como veículos autônomos aqueles em que pelo menos alguns aspectos de uma função de controle considerada crítica para a segurança (por exemplo: direção, aceleração ou frenagem) ocorre sem necessidade de ação direta do condutor (EUA, 2012).

Alguns autores citam um modelo de três etapas para descrever como um veículo autônomo opera. As três etapas são: 1) percepção da situação do veículo, 2) processamento de dados para planejamento das próximas ações e 3) controle do veículo para realização das ações

planejadas (BAGLOEE *et al.*, 2016; LATHAM, NATTRASS, 2019; SKARBEK-ZABKIN, SZCZEPANEK, 2018).

Nesse modelo conceitual, a primeira etapa – percepção da situação do veículo – se trata do uso de tecnologias que permitem ao veículo ler, em tempo real, a realidade espacial ao seu redor. São os “olhos” do VA. Inclui o uso de câmeras, sensores LIDAR (*Light Detection and Ranging*), sensores RADAR (*Radio Detection and Ranging*), localização via satélite, dentre outras tecnologias. A segunda etapa, processamento das informações, é o “cérebro” da operação do veículo autônomo. Nela, o veículo interpreta os dados que possui para compreender a situação em que está inserido, prever o movimento dos objetos observados e decidir qual a próxima ação a ser tomada. Nessa etapa são utilizados diversos algoritmos e métodos de processamento, incluindo redes neurais, lógica difusa, dentre outros recursos (SKARBEK-ZABKIN; SZCZEPANEK, 2018). A partir da decisão tomada pelo “cérebro” da operação, se ativa a terceira etapa do modelo conceitual: o controle do veículo para realização das ações planejadas. Se trata aqui das “mãos” do sistema, ou seja, as tecnologias que permitem ao VA controlar a aceleração, alterar a direção das rodas, acionar o sistema de freios, dentre outros. A Figura 1 contém uma ilustração desse modelo conceitual.

Figura 1 - Componentes da operação de um Veículo Autônomo



Fonte: Elaboração do autor (2021)

O modelo citado é um modelo conceitual, utilizado para descrever de forma didática a estrutura geral da operação de um veículo autônomo. As tecnologias utilizadas e como elas são implementadas, no entanto, são específicas de cada modelo. Uma síntese das principais tecnologias em uso nos VA atualmente pode ser encontrada no trabalho de Chehri e Mouftah (2019), bem como na seção 2.3, que traz um panorama das principais tecnologias em uso através da análise de trabalhos nesse tema.

### 2.1.1 Níveis de automação

Conforme a definição da NHTSA, os veículos autônomos são aqueles em que pelo menos uma função crítica é automatizada. Desta forma, os VA podem variar no número de funções automatizadas e no alcance desta automatização. Para melhor compreender e sistematizar o entendimento acerca dos possíveis níveis de automação dos VA, a Sociedade de Engenheiros Automotivos (*Society of Automotive Engineers*, SAE) dos EUA, definiu, em 2014,

uma escala de seis níveis para a automação veicular, na qual o nível zero se trata de veículos sem nenhuma função autônoma, e o nível cinco de veículos completamente autônomos. Atualmente, essa escala é o método mais amplamente aceito para classificar o nível de automação dos veículos (MORDUE, YEUNG, WU, 2020; SKEETE, 2018). O significado de cada nível de automação pode ser compreendido da seguinte forma:

- **Nível zero:** inexistência de automação. O condutor está continuamente no controle do veículo. Não existe nenhuma função de controle do veículo que seja automatizada. Destaca-se que existem, neste nível, veículos com sistemas de detecção de perigo e aviso ao condutor, porém cuja reação em si não é automatizada, mas depende de uma ação do condutor.
- **Nível um:** sistemas de assistência. Apenas uma pequena função é realizada pelo veículo de forma autônoma. Por exemplo, sistemas de piloto automático (*cruise control*), assistência na manutenção de faixa (posicionamento lateral) ou mesmo assistentes de estacionamento, em que o veículo toma controle apenas para realizar a manobra específica.
- **Nível dois:** automação parcial. O sistema autônomo realiza algumas funções dinâmicas de trânsito, mas que devem ser monitoradas ativamente pelo condutor. Por exemplo, sistemas de assistência em congestionamento, com o qual o veículo se mantém na faixa de tráfego e mantém distância constante do veículo à frente em vias congestionadas.
- **Nível três:** automação condicional. O veículo é capaz de realizar tarefas dinâmicas sem a necessidade de entrada de comandos do condutor, porém o condutor deve estar sempre disponível para retomar o controle do veículo em situações imprevistas.
- **Nível quatro:** automação elevada. O veículo é capaz de operar de forma autônoma, sem necessidade de presença do condutor, porém apenas em casos de uso pré-definidos. Por exemplo, caminhões que realizem jornadas de forma autônoma, sem presença do condutor, porém apenas em determinadas rodovias, sem adentrar ambientes urbanos, ou então apenas em dias nos quais não há chuva, neblina, ou acumulação de água na pista.
- **Nível cinco:** automação completa. O veículo nesse nível é capaz de operar qualquer rota de ponta-a-ponta, em quaisquer condições meteorológicas e de trânsito, sem a necessidade da presença do condutor. Veículos nesse nível de

automação poderão dispensar os dispositivos para controle humano (volante, pedais aceleradores e de freio).

Os autores de Liu *et al.* (2019) apresentam uma tabela que sistematiza os níveis de automação apresentados anteriormente (adaptada no Quadro 2) identificando quem é responsável por tarefas típicas em cada um dos níveis de automação.

Quadro 2 – Níveis de automação veicular

Nível	Descrição	Tarefas de direção		Resposta a falhas	Área de operação
		Controle lateral e longitudinal	Monitoramento do ambiente		
0	Inexistência de automação	Condutor	Condutor	Condutor	Inexistente
1	Sistemas de assistência	Condutor e sistema	Condutor	Condutor	Limitada
2	Automação parcial	Sistema	Condutor	Condutor	Limitada
3	Automação condicional	Sistema	Sistema	Condutor e sistema	Limitada
4	Automação elevada	Sistema	Sistema	Sistema	Limitada
5	Automação completa	Sistema	Sistema	Sistema	Ilimitada

Fonte: adaptado de Liu *et al.* (2019)

De acordo com Mordue, Yeung e Wu (2020), enquanto os níveis de automação são claramente definidos e amplamente aceitos pela indústria, um grande desafio para o setor de regulação dos transportes é a inexistência de modelos e métodos para avaliar a efetividade e a segurança das funções de automação alegadas pelos fabricantes. De acordo com os autores, até a data de publicação de seu trabalho, não existiam métodos para avaliar os veículos de forma a certificar a segurança e classificar o nível de automação, o que demonstra a necessidade de atuação das agências reguladoras no sentido de criar tais métodos.

### 2.1.2 Veículos Autônomos Conectados

A concepção dos VAC evolui da capacidade dos sistemas automatizados se comunicarem de forma mais rápida e eficiente do que condutores humanos. Esses sistemas podem compartilhar, entre os veículos em uma rodovia, informações essenciais para a segurança e operação dos VA, incluindo informações que os veículos ou os condutores não poderiam detectar por si mesmos, como a situação do tráfego nos trechos seguintes da rodovia (LIU *et al.*, 2019).

Neste cenário, a possibilidade de os veículos comunicarem-se com os outros veículos ou com a própria infraestrutura de transportes amplia as possibilidades para esse tipo de transporte. Basta que um veículo encontre uma situação inesperada, por exemplo, e aprenda de forma efetiva como contornar essa situação, para que a informação possa ser divulgada para todos os VA, fazendo com que ocorra um processo de aprendizado global.

A comunicação que pode ocorrer com um VAC é normalmente dividida em algumas categorias. A comunicação veículo-veículo (V2V) se trata da capacidade dos veículos trocarem informações entre si, compartilhando, por exemplo, seus dados de velocidade e posição, e utilizando os dados coletados de outros veículos para complementar seus modelos de percepção do ambiente. Além disso, os veículos também podem realizar o compartilhamento de informações importantes sobre o sistema, como a existência de perigos na pista ou de congestionamento à frente, o que pode fazer com que um veículo tome medidas de segurança antes mesmo de detectar de forma direta o perigo (HARDING *et al.*, 2014).

A comunicação do veículo com a própria infraestrutura de transportes também é uma possibilidade, normalmente denominada de comunicação veículo-infraestrutura (V2I). A partir dessa classe de comunicação, a própria infraestrutura de transportes pode fornecer e coletar informação dos veículos, que vão além da informação fornecida aos condutores humanos. Por exemplo, a própria infraestrutura pode divulgar para os veículos autônomos a posição, sentido e velocidade de todos os outros VA presentes em um determinado ambiente, além da existência de perigos em determinados trechos da rodovia. Outras informações que podem ser compartilhadas através da comunicação veículo-infraestrutura são, por exemplo, o traçado da rodovia à frente ou a existência de desvios e interrupções nos próximos trechos (HARDING *et al.*, 2014).

Através da aplicação desses conceitos de comunicação com os veículos autônomos, podem ser estabelecidos sistemas autônomos de transporte, em que os veículos e a infraestrutura operam de forma conjunta o tráfego em um determinado local, como interseções, por exemplo (BARTHAUER; FRIEDRICH, 2019).

Enquanto esse tipo de comunicação cria o potencial para sistemas inteligentes de informação rodoviária, Anderson *et al.* (2016, p. xx, tradução nossa) expressa dúvidas sobre esse tipo de sistema ser, ou não, necessário para que os VA possam operar:

O papel da comunicação veículo-veículo (V2V) e veículo-infraestrutura (V2I) para habilitar a operação dos VA permanece incerto. Enquanto essa tecnologia poderia facilitar a direção autônoma em várias circunstâncias, não está claro se ela é necessária. Além disso, o V2I pode exigir investimentos substanciais em

infraestrutura – por exemplo, se cada semáforo tiver que ser equipado com um rádio para comunicação com os veículos.<sup>6</sup>

## 2.2 HISTÓRICO

O desenvolvimento dos veículos autônomos está em ritmo acelerado nos últimos anos, porém o conceito de veículos com direção automatizada não é novidade. Zhang (2013); Chehri e Mouftah (2019); Elliot, Keen e Miao (2019); Bagloee *et al.* (2016); Anderson *et al.* (2016) e Skeete (2018), dentre outros, apresentam revisões acadêmicas do histórico dos veículos autônomos, que se inicia ainda na década de 1930. Um histórico mais abrangente também é apresentado por Weber (2014), como parte de um artigo não acadêmico publicado pelo *Computer History Museum*, Museu Americano da História dos Computadores. O desenvolvimento mais recente dos veículos autônomos nas principais empresas privadas é apresentado por Faggella (2020), também em um artigo não acadêmico, que realiza uma análise das ações e previsões das principais empresas que realizam testes com VA atualmente.

Entre as décadas de 1930 e 1950, a tecnologia de direção autônoma já se desenvolvia em outros setores, como a aviação. No setor automobilístico, no entanto, existiam apenas visões de como essa tecnologia seria aplicada aos automóveis (WEBER, 2014). A década de 1950 viu o primeiro protótipo de sistema de direção rodoviária autônoma no mundo, um sistema em que tanto a rodovia quanto os veículos eram aparelhados através de trilhos magnéticos e comunicação via rádio, em uma estrutura muito similar ao transporte ferroviário (os veículos andavam sobre “trilhos” magnéticos e uma central controlava a velocidade dos veículos) (WEBER, 2014).

A década de 1960 marcou a evolução dos computadores, o que alimentou visões de inteligência artificial. Esse ambiente fomentou a busca por veículos guiados por inteligência artificial, e robôs experimentais já começaram a ter sistemas de navegação mais avançados (WEBER, 2014). Um dos primeiros esforços reais para desenvolvimento da tecnologia de veículos autônomos, no entanto, apareceu na segunda metade da década de 1970, em que o Departamento de Transportes dos EUA (*United States Department of Transportation, USDOT*) iniciou um programa para o desenvolvimento de veículos autônomos (ZHANG, 2013). Ao mesmo tempo, no Japão, um carro autônomo no laboratório de engenharia mecânica Tsukuba

---

<sup>6</sup> Texto original: “The role of vehicle to vehicle (V2V) and vehicle to infrastructure (V2I) communication in enabling AV operation also remains unclear. While this technology could ease the task of automated driving in many circumstances, it is not clear that it is necessary. Moreover, V2I might require substantial infrastructure investments – for example, if every traffic signal must be equipped with radio for communicating with cars.”(ANDERSON *et al.*, 2016, p. xx)

atingiu velocidades de até 20 km/h, utilizando sistemas de VC para identificação das demarcações rodoviárias (WEBER, 2014).

O avanço da tecnologia dos computadores a partir da década de 1980 catalisou os esforços para obtenção de veículos autônomos. O USDOT introduziu diversos programas de fomento à pesquisa neste assunto, o mais notável sendo o *National Automated Highway System Research Program* – Programa Nacional de Pesquisa de Sistemas de Navegação Automatizada – cujo principal objetivo era desenvolver especificações para um conceito de rodovia integrada para direção autônoma (ZHANG, 2013).

Em 1986, a Indústria Automotiva Europeia lançou o programa PROMETHEUS, um programa de pesquisa que envolveu diversos governos e centros de pesquisa europeus, além de mais de uma dúzia de fabricantes de veículos. O objetivo era avançar a tecnologia para tornar o trânsito na Europa mais seguro, eficiente, econômico, confortável e ecológico (CHEHRI; MOUFTAH, 2019).

Já em 1987, Ernst Dickmanns demonstrou uma van, chamada “VaMoRs”, que estava equipada com câmeras e computadores para dirigir centenas de milhas de forma autônoma, com base em tecnologias de processamento de imagem. Em 1989 a van ganhou a capacidade de reconhecer obstáculos na pista. No início da década de 1990, a tecnologia alemã já era capaz de realizar trocas de faixa de maneira autônoma (WEBER, 2014).

Em 1994, no âmbito do projeto PROMETHEUS, três carros na Alemanha foram equipados com sistemas de visão com tamanho pequeno o suficiente para caber no porta-malas do carro (o que permitiria o número usual de passageiros) e que permitiam ao veículo monitorar a posição de até seis veículos próximos. Na exibição final do projeto PROMETHEUS demonstrou-se pela primeira vez em uma rodovia com tráfego normal a capacidade de um veículo autônomo realizar trocas de faixa de forma inteiramente autônoma. Também na Alemanha, em 1995, realizou-se uma das primeiras viagens de longa distância em veículo com funções autônomas, que percorreu mais de 1600 km (WEBER, 2014).

Em 1995, nos EUA, equipes da *Carnegie Mellon University* realizaram uma viagem de longa distância na qual o computador, que controlava a direção do veículo, operou em modo autônomo por 98% do tempo, enquanto o operador humano controlou a aceleração e frenagem do veículo. Em 1996, como continuação do projeto europeu PROMETHEUS, um outro projeto, chamado ARGO, também fomentou a realização de uma viagem de 1900km na Itália, na qual o veículo operou de forma autônoma em 94% do tempo (BIMBRAW, 2015).

Nos EUA, na mesma época, a pesquisa estava concentrada na criação de sistemas autônomos, em que rodovias e veículos agiriam de forma conectada. Em 1997, ocorreu uma

das primeiras demonstrações públicas desse tipo de sistema, realizada na Califórnia pelo programa *California Partners for Advanced Transit and Highways* (PATH). O programa demonstrou o trânsito em comboio de oito veículos autônomos guiados por ímãs incorporados na rodovia e coordenados com comunicação V2V (ANDERSON *et al.*, 2016).

Em 2004, o Departamento de Defesa dos EUA criou um desafio com prêmio de um milhão de dólares para o desenvolvimento de veículos militares autônomos. Os veículos foram testados em um circuito construído no deserto. No primeiro ano do desafio, nenhum dos competidores foi capaz de completar o circuito. O desafio se repetiu em 2005, em que a vencedora foi a equipe liderada por Sebastian Thrun, que mais tarde se tornou o co-fundador de projetos de veículos autônomos da *Google*. Em 2007, o desafio de direção autônoma dos EUA foi estendido para ambientes urbanos, através de cenários também construídos. Os desafios americanos resultaram na criação de parcerias entre academia e indústria, das quais se destacam a parceria entre a *General Motors* e a *Carnegie Mellon University*, e entre a *Volkswagen* e a *Stanford University* (ANDERSON *et al.*, 2016).

Em 2008, o *PriboT*, um veículo autônomo criado como protótipo pela *Google* para entrega de pizza, atravessou a ponte de São Francisco, no estado da Califórnia, em um teste controlado de rua. Esse foi um dos primeiros testes de veículos autônomos em ambientes urbanos, e o seu sucesso inspirou a criação do programa de veículos autônomos da *Google*, que mais tarde se tornou um dos principais programas de pesquisa em veículos autônomos no mundo (WEBER, 2014).

Em 2012, o estado de Nevada nos EUA emitiu uma placa especial para a *Google*, marcando o primeiro veículo autônomo devidamente licenciado no mundo (Figura 2). Em 2013, a frota autônoma da *Google* atingiu mais de quinhentas mil milhas (aproximadamente oitocentos mil quilômetros) percorridas em ruas públicas, sem haver nenhum acidente atribuído à tecnologia de direção autônoma. Essa foi uma importante marca para o desenvolvimento da tecnologia, pois o fato de ter percorrido essa distância sem acidentes fomentou discussões a respeito de segurança viária e de como a tecnologia poderia auxiliar na sua melhoria (WEBER, 2014).

Figura 2 - Primeira placa de trânsito emitida para um veículo autônomo.



Fonte: Weber (2014)

Ainda em 2013, a tecnologia de veículos autônomos começou a parecer mais promissora também para outras fabricantes, que começaram a demonstrar real interesse e iniciaram programas próprios de desenvolvimento de veículos autônomos. Nesse ano, por exemplo, *Audi* e *Toyota* revelaram suas visões para o desenvolvimento de veículos autônomos em um evento anual em Las Vegas, marcando o aumento da concorrência no desenvolvimento tecnológico dos veículos autônomos (ANDERSON *et al.*, 2016).

Em 2015, a frota autônoma da *Google* completou mais de um milhão de milhas percorridas (aproximadamente um milhão e seiscentos quilômetros). Em toda a distância percorrida, registraram-se quatorze acidentes. Em todos os casos, no entanto, a direção autônoma não foi considerada culpada. Ou o veículo estava em modo manual, ou outro veículo envolvido foi responsável pelo acidente (BAGLOEE *et al.*, 2016).

Entre 2015 e 2017, uma grande quantidade de fabricantes começou a intensificar os investimentos na pesquisa para o desenvolvimento de veículos autônomos (FAGGELLA, 2020). A maioria desses investidores expressaram ambiciosas visões para disponibilizar, ainda em 2020, veículos autônomos para uso dos consumidores. Dentre os principais investidores que apareceram nessa época, está a *General Motors*, que voltou ao cenário através da aquisição da *startup Cruise*. Além disso, posteriormente, a *General Motors* também comprou uma parte da *Lyft*, empresa de transporte compartilhado sob demanda, com o objetivo de disponibilizar um sistema autônomo de transporte sob demanda ainda em 2019. Outro importante investidor que apareceu nessa época foi a *Ford*, que investiu um bilhão de dólares na *startup* de inteligência artificial *Argo AI*. Um representante executivo da *Ford* disse em entrevista nessa época que a

empresa pretendia possuir um veículo com nível quatro de automação ainda em 2021 (FAGGELLA, 2020).

No ano de 2016, ocorreu um dos primeiros acidentes em que a inteligência do veículo autônomo foi considerada culpada: um carro da *Google* falhou em prever o comportamento de um ônibus próximo e atingiu a sua lateral enquanto estava em modo autônomo (BAGLOEE *et al.*, 2016). No mesmo ano, ocorreu a primeira fatalidade de um passageiro de um veículo operando em modo autônomo, em um veículo da empresa *Tesla*. De acordo com a empresa: “nem o piloto automático nem o condutor perceberam a lateral branca de um caminhão devido ao céu claro, e os freios não foram acionados<sup>7</sup>” (SKEETE, 2018, p. 30, tradução nossa). Em 2018, ocorreu a primeira morte de um pedestre atribuída à direção autônoma: um atropelamento envolvendo um VA da empresa *Uber*. A tragédia provocou a suspensão do programa de testes da *Uber*, e despertou intensa discussão sobre ética e responsabilidade nos veículos autônomos (SKEETE, 2018).

Já em 2019, as fabricantes que haviam entrado no mercado de veículos autônomos próximo de 2015 começaram a assumir um discurso menos otimista em detrimento das afirmações ambiciosas que faziam no início dos programas de pesquisa. Empresas como a *Ford* e a *General Motors* não cumpriram os objetivos declarados no início dos programas de pesquisa, e afirmaram que uma estratégia de desenvolvimento tão rápido de uma tecnologia tão crítica como os veículos autônomos não é a mais adequada, pois o problema é muito complexo e lida com questões críticas de segurança. O entendimento disseminado na indústria em 2019, portanto, foi de que ainda seriam necessários muitos anos de pesquisa até que se obtivessem veículos em níveis mais elevados de automação, especialmente em nível 5 (FAGGELLA, 2020).

Analisando esse histórico apresentado, percebe-se que a pesquisa para desenvolvimento de veículos autônomos não é um assunto novo na indústria automobilística, nem na academia. O que se coloca como novo fator, na atualidade, é o crescimento da capacidade computacional e a sofisticação das tecnologias de inteligência artificial, que fazem com que o caminho para os veículos autônomos seja mais visível, embora não menos complexo. A respeito da criação de sistemas integrados, em que a rodovia seria equipada por equipamentos análogos a trilhos, pode-se verificar que protótipos dessa tecnologia já funcionavam com sucesso na década de 1950, indicando que a barreira para a adoção generalizada desse tipo de

---

<sup>7</sup> Texto original: “Neither autopilot nor the driver noticed the white side of the tractor-trailer against a brightly lit sky, so the brake was not applied.” (SKEETE, 2018, p. 30)

sistema (que traria extensas vantagens na segurança viária, por exemplo) não é apenas a disponibilização da tecnologia para tal, mas sim algum outro fator, como a complexidade de se modificar de forma crítica um sistema tão amplamente utilizado como o rodoviário. Pode-se estimar que é devido a essa mesma barreira que os veículos autônomos se desenvolveram de forma mais acentuada nas últimas décadas: a tecnologia de hoje está permitindo que os veículos desenvolvam a direção autônoma sem necessidade da disponibilização de um sistema integrado de comunicação, mas sim através da interpretação do sistema rodoviário já existente.

### 2.3 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS ADOTADAS NOS VA

Ao realizar um estudo acerca das necessidades dos VA na infraestrutura rodoviária, é necessário que se compreenda quais são as tecnologias através das quais tais veículos interagem com o ambiente, e de que forma eles realizam as tarefas de direção automatizada. Isso é ainda mais importante em se tratando das tecnologias usadas pelos veículos para realizar a leitura da situação da rodovia para seu próprio posicionamento e navegação. A compreensão das formas com que os sistemas de direção automatizada efetuam a percepção do ambiente é essencial para que se saiba quais mudanças podem ser necessárias para habilitar a operação de tais veículos nas rodovias brasileiras.

Na literatura, pode-se encontrar revisões abrangentes acerca de uma variedade de aspectos da pesquisa em VA. Ma *et al.* (2020) apresentam uma revisão das principais aplicações de algoritmos de inteligência artificial no desenvolvimento dos VA, assim como Devi *et al.* (2020) que exploram os algoritmos de aprendizado de máquina. Skrickij, Šabanovič e Žuraulis (2020) trazem uma revisão de trabalhos sobre os desafios e expectativas para a adoção dos VA. Uma revisão de forma específica para os VAC pode ser encontrada no trabalho de Ersal *et al.* (2020). O trabalho de Da Silva *et al.* (2020) abordou de forma específica a produção bibliográfica global sobre os VA com o objetivo de compreender as principais lacunas entre pesquisa acadêmica e as demandas de mercado para a adoção dos VA. Finalmente, Yurtsever *et al.* (2020) realizaram uma extensa revisão das principais tecnologias utilizadas pelos veículos para implementação de sistemas de direção autônoma.

Outros trabalhos que também realizaram revisões acerca das tendências no desenvolvimento dos veículos autônomos são os trabalhos de Kuutti *et al.* (2018); Dingyi, Haiyan e Kaiming (2018); Divakarla *et al.* (2019); Arifin *et al.* (2019); Campbell *et al.* (2018) e Sarker *et al.* (2020). O trabalho de Yurtsever *et al.* (2020) é o mais abrangente dentre os trabalhos de revisão analisados, além de ser um trabalho recente e estar alinhado com a finalidade desta seção. Nele, os autores apresentam um panorama das tecnologias utilizadas nos

diversos aspectos ligados à operação de um VA, e realizam análises e conclusões em relação aos desafios tecnológicos atualmente existentes para a criação e evolução desses sistemas. Nesse aspecto, uma conclusão importante a que os autores chegam é de que ainda existem importantes lacunas a serem preenchidas no desenvolvimento tecnológico para que os VA atinjam os níveis mais elevados de automação, o que enseja um olhar mais realista para a disponibilização da tecnologia nos próximos anos.

Enquanto a promessa de direção automatizada é atraente e já comercializada para os consumidores, essa revisão mostrou que ainda existem claras lacunas na pesquisa. Diversos modelos para arquitetura foram propostos, desde completamente modulares a completamente ponta-a-ponta, cada um com suas limitações. Ainda não existe consenso quanto à melhor modalidade de sensoriamento para localização, mapeamento e percepção e ainda falta precisão e eficiência aos algoritmos [...]. Rodovias em condições não ideais ainda são um problema em aberto, assim como as condições climáticas intemperantes. O campo de comunicação veículo a veículo ainda está em sua infância, enquanto sistemas centralizados baseados em nuvem para controle de informações nunca foram implementados, devido à complexa infraestrutura necessária. Interação humano-máquina ainda é um campo pouco estudado com vários problemas em aberto<sup>8</sup> (YURTSEVER *et al.*, 2020, p. 58462, tradução nossa).

Uma vez que a revisão realizada pelos autores é extensa e relevante para a aplicação do presente trabalho, serão trazidas nessa seção as principais classificações e referências utilizadas no citado trabalho, a fim de fornecer um panorama das tecnologias atualmente em uso.

### 2.3.1 Arquitetura interna do sistema

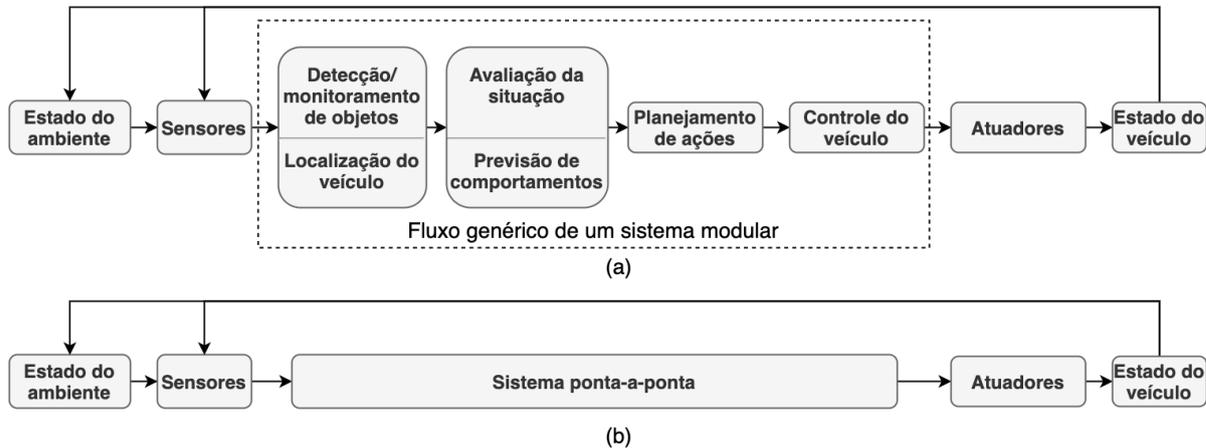
Conforme apresentado anteriormente, um VA realiza a tarefa de condução automatizada através de um fluxo que inclui: leitura da situação do veículo, planejamento das próximas ações e controle do veículo para realização das ações planejadas. A forma com que tais componentes são implementados na prática, no entanto, pode variar. Nesse sentido, pode-se classificar os sistemas de direção de duas formas: sistemas modulares, divididos em módulos que recebem um determinado conjunto de informações, realizam uma etapa específica do

---

<sup>8</sup> Texto original: “While the promise of automated driving is enticing and already marketed to consumers, this survey has shown there remains clear gaps in the research. Several architecture models have been proposed, from fully modular to completely end-to-end, each with their own shortcomings. The optimal sensing modality for localization, mapping and perception is still disagreed upon, algorithms still lack accuracy and efficiency, and the need for a proper online assessment has become apparent. Less than ideal road conditions are still an open problem, as well as dealing with intemperate weather. Vehicle-to-vehicle communication is still in its infancy, while centralized, cloud-based information management has yet to be implemented due to the complex infrastructure required. Human-machine interaction is an under-researched field with many open problems” (YURTSEVER *et al.*, 2020, p. 58462).

processo e encaminham o resultado aos próximos módulos, ou sistemas ponta-a-ponta, nos quais a relação entre a informação lida pelos sensores e o conjunto de comandos a serem realizados pelos atuadores mecânicos é modelada de forma direta (YURTSEVER *et al.*, 2020).

Figura 3 - Diagramas do fluxo de operação de VA com sistemas modulares (a) ou ponta-a-ponta (b)



Fonte: Adaptado de Yurtsever *et al.* (2020).

De acordo com Yurtsever *et al.* (2020), nos sistemas modulares, cada etapa do processo de direção é realizada por módulos específicos. Isso traz a vantagem de que as tarefas isoladas, como a detecção de objetos através de imagens ou a localização do veículo no espaço através de sinais de satélite, são problemas que já possuem soluções bem formuladas em outros campos como a robótica e a VC. Assim, pode-se utilizar de técnicas e algoritmos já otimizados para a realização de cada uma das tarefas que compõem a direção automatizada.

Outra vantagem dos sistemas modulares, destacada por Yurtsever *et al.* (2020), é a possibilidade de se acrescentar módulos sobre sistemas já existentes, o que possibilitaria, por exemplo, a criação de módulos com restrições de segurança, nos quais medidas emergenciais seriam possibilitadas independentemente do funcionamento dos outros módulos do sistema. No entanto, os autores citam que uma grande desvantagem dos sistemas modulares é o potencial para propagação de erros, como ocorreu no acidente envolvendo um veículo da empresa *Tesla*, em 2016, no qual um módulo de percepção do ambiente classificou a lateral branca de um caminhão como “céu”, erro que foi propagado a todos os outros sistemas e levou à fatalidade.

A alternativa aos sistemas modulares é a adoção de sistemas ponta-a-ponta, nos quais as ações do veículo são planejadas diretamente em função da leitura dos sensores. Isso é realizado através de algoritmos de aprendizado de máquina, nos quais os modelos de inteligência artificial são treinados de diversas formas a controlar os comandos do veículo a partir da leitura dos sensores. As vantagens desse tipo de sistema estão no menor número de

componentes, o que pode reduzir a possibilidade de propagação de erros e aumentar a velocidade de reação do veículo. De acordo com Yurtsever *et al.* (2020), no entanto, os sistemas ponta-a-ponta podem dificultar a adoção de medidas padronizadas de segurança, além de não permitirem uma interpretação direta das etapas de decisão do sistema.

A abordagem modular é a mais utilizada nos VA atualmente, uma vez que divide a condução do veículo em etapas com abordagens mais simples e permite o aproveitamento de conhecimento já existente nos diversos módulos do sistema. Sistemas de direção ponta-a-ponta nunca foram utilizados em aplicações reais, exceto algumas demonstrações limitadas (YURTSEVER *et al.*, 2020).

### 2.3.2 Sensores e outros equipamentos

Outro aspecto importante para compreender a operação dos VA é o tipo de *hardware* utilizado nesses veículos. Nesse sentido, os sensores de percepção do entorno são uma das principais frentes de desenvolvimento tecnológico dos VA, uma vez que a percepção e interpretação ágil é crucial para a operação segura desses veículos. Os sensores que realizam a leitura do ambiente externo ao veículo são chamados de sensores exteroceptivos, pois respondem a estímulos externos ao veículo, como a luminosidade. Também são cruciais para a operação dos VA os sensores chamados de proprioceptivos, que são aqueles que respondem a características internas ao sistema, como aceleração, velocidade e rotação do veículo, por exemplo.

Além dos sensores exteroceptivos e proprioceptivos, também são importantes componentes dos VA: os equipamentos de comunicação, os atuadores mecânicos e as unidades computacionais. Para todos os casos, independentemente da tecnologia sendo utilizada, a redundância é essencial para manter a segurança do veículo contra erros pontuais de sistemas isolados (YURTSEVER *et al.*, 2020). Isso significa utilizar, para a mesma tarefa, mais de uma tecnologia ou sensor possível, de forma a cruzar os resultados obtidos e detectar possíveis erros.

Em relação aos sensores exteroceptivos, existem quatro tecnologias amplamente utilizadas para percepção do ambiente: as câmeras, os sensores LIDAR, os sensores RADAR e os sensores ultrassônicos. As câmeras são equipamentos passivos (pois não emitem sinal) com a capacidade de realizar a detecção das cores dos objetos. A identificação de cores é crucial para a condução dos veículos, especialmente para a detecção de sinalização viária, como semáforos e placas. As câmeras, atualmente, são a principal tecnologia para detecção de cores.

As câmeras, no entanto, estão sujeitas a diversas fragilidades, como as condições de iluminação do entorno. Além disso, a detecção confiável da profundidade dos objetos através de câmeras exige a utilização do processamento de múltiplas imagens, obtidas por câmeras com posicionamento variado (YURTSEVER *et al.*, 2020). Uma vantagem da utilização de câmeras sobre outras tecnologias é que a área de VC (interpretação automatizada de imagens obtidas por câmeras) é uma área bem desenvolvida e com diversos algoritmos disponíveis para utilização. Além disso, as câmeras foram a principal tecnologia utilizada para percepção do ambiente nos primeiros veículos com funcionalidades autônomas (GONZALEZ *et al.*, 2016).

Outra tecnologia para realizar a detecção dos objetos no entorno do veículo são os sensores RADAR e LIDAR. Eles são alternativas especialmente úteis para cobrir as deficiências do uso de câmeras (YURTSEVER *et al.*, 2020). Esses sensores funcionam da seguinte forma: o equipamento emite ondas de rádio (RADAR) ou de luz (LIDAR) que são refletidas pelos objetos do entorno e detectadas pelos sensores. A medição do tempo para retorno do sinal, com o conhecimento da direção de que o sinal foi recebido e da velocidade de sua propagação, indica a distância entre o equipamento e os objetos do entorno (DIVAKARLA *et al.*, 2019).

Adicionalmente, sensores ultrassônicos também são amplamente utilizados em sistemas de assistência de direção. Eles emitem ondas sonoras de alta frequência e realizam a medição de ecos para determinar a distância de objetos. Esse tipo de sensor é encontrado em sistemas de assistência de estacionamento, por exemplo (SARKER *et al.*, 2020).

### **2.3.3 Localização**

Em se tratando das tecnologias com as quais os VA interagem com o ambiente, é importante compreender como esses veículos se localizam no entorno. Isto é, de que formas o veículo sabe a sua posição atual em relação ao ambiente. Tal tarefa é comumente realizada por um conjunto de tecnologias, que atuam em diferentes níveis de detalhe e convergem na determinação da posição precisa do veículo.

Uma das principais tecnologias utilizadas para esse fim é a localização por satélites GPS (*Global Positioning System*). De acordo com Kuutti (2018), os sistemas GPS são os mais comumente utilizados para aplicações veiculares, pois são baratos e facilmente acessíveis. No entanto, o autor também destaca que a localização por GPS sofre com baixa confiabilidade, uma vez que existem múltiplas limitações como bloqueio dos sinais e detecção de sinais refletidos. Além disso, os sistemas GPS possuem precisão inadequada para as necessidades dos VA. Por esse motivo, para obter sistemas de localização mais robustos e precisos, a pesquisa

recente tem se concentrado no desenvolvimento de sistemas de localização utilizando sensores mais avançados (como RADAR e LIDAR) ou então realizando a fusão de dados de diversos sistemas (KUUTTI *et al.*, 2018).

De acordo com Kuutti (2018), a utilização de sensores mais avançados para a navegação do veículo pode, de fato, aumentar a precisão da posição determinada para o veículo. No entanto, tal utilização também é acompanhada de um aumento no custo computacional. Para realizar a localização através desses sensores, é necessário aplicar algoritmos de detecção de características do ambiente, como marcos na paisagem, obstáculos ou outros usuários da via. Por esse motivo, o custo computacional para realizar a localização por meio desses sistemas pode inviabilizar a sua aplicação na operação usual dos VA. Outro obstáculo para o uso dessas tecnologias para a localização do veículo é que elas só são capazes de detectar objetos e marcos no campo de visão do veículo, ou seja, pontos importantes que estejam atrás de outros objetos não serão detectados, reduzindo o desempenho do sistema em tempo real (KUUTTI *et al.*, 2018).

Como alternativa de sistema para localização são os sistemas de fusão de diversos sensores. Nesses sistemas, se utiliza do fato de que diversos sensores e tecnologias diferentes estão medindo a mesma característica do veículo, e se combina o resultado dos sensores para obter um sistema mais preciso e confiável (CAMPBELL *et al.*, 2018). Uma das principais fusões de tecnologias utilizadas para localização dos veículos é a fusão entre o GPS e as Unidades de Medição Inerciais (UMI). As UMI são unidades embarcadas nos veículos que utilizam um conjunto de acelerômetros e giroscópios para medir acelerações lineares e velocidades angulares do veículo, respectivamente (KUUTTI *et al.*, 2018). O princípio da fusão do GPS com UMI é calcular a posição do veículo de forma relativa através das acelerações medidas pela UMI, e corrigir os erros acumulados através de medições absolutas realizadas via sensores GPS. No entanto, a utilização de sistemas que utilizam fusão GPS com UMI, por si só, não é suficiente para a localização dos veículos, pois não oferecem precisão suficiente (YURTSEVER *et al.*, 2020)

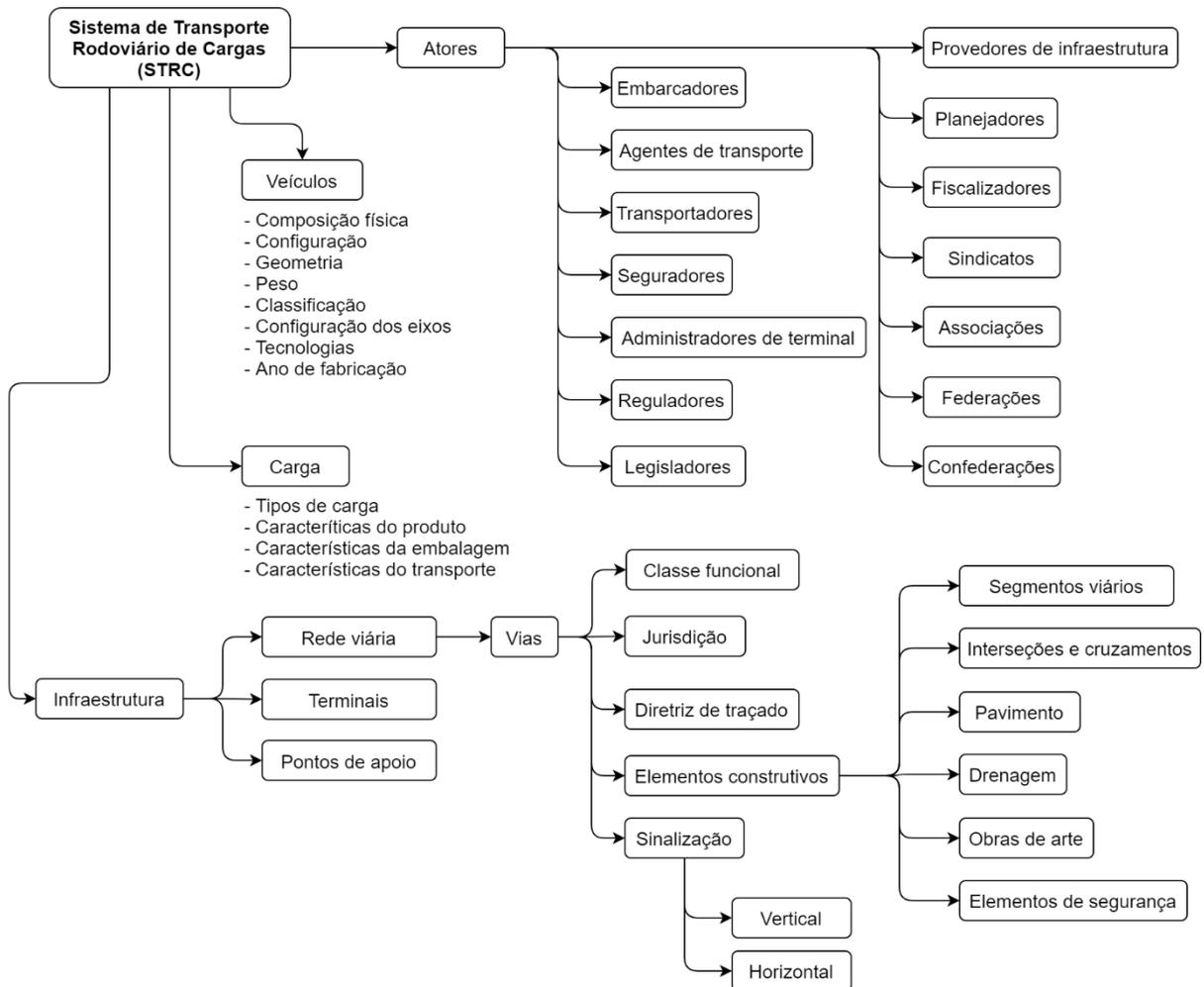
Tanto a utilização de sensores avançados para localização quanto a utilização da fusão GPS/UMI são tecnologias que, por si só, possuem deficiências para a localização precisa do veículo no ambiente. No entanto, os sistemas podem ser usados em conjunto, de forma a complementar um ao outro. Nos sistemas de localização mais avançados, a fusão GPS/UMI é utilizada para estimação da posição inicial e aliada a LIDAR e outros sensores para localização precisa do veículo (YURTSEVER *et al.*, 2020).

## 2.4 VISÃO SISTÊMICA DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Os VA são uma inovação que irá impactar a forma com que se realiza uma tarefa crítica para os sistemas logísticos e para o setor rodoviário como um todo: a tarefa de condução do veículo. No entanto, dada a importância dessa atividade para os sistemas logísticos e rodoviários, poderão existir complexas demandas e impactos em relação à adaptação do sistema para a absorção da nova tecnologia. Por esse motivo, cabe que seja ampliado o escopo da discussão realizada até aqui, adotando uma visão holística do sistema rodoviário, para que se possa identificar os principais atores e processos, e como eles poderão ter que reagir à evolução dos VA.

Alguns trabalhos acadêmicos podem auxiliar na identificação dos atores, processos e relações existentes no setor de transporte rodoviário. Um trabalho pertinente para esse assunto é o artigo publicado por Villela e Tedesco (2011), no qual as autoras realizam uma análise da estrutura do Sistema de Transporte Rodoviário de Cargas (STRC), com base em diversas literaturas anteriores e em uma pesquisa realizada com especialistas do setor. No estudo, as autoras apresentam um detalhamento dos componentes do STRC, que estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Componentes do STRC



Fonte: adaptado de Villela e Tedesco (2011)

Através do detalhamento apresentado por Villela e Tedesco (2011), pode-se verificar que o STRC possui uma diversidade de componentes e atores, que interagem entre si no funcionamento do sistema. Pode-se perceber a existência de diversos tipos de atores no sistema, que incluem transportadores, embarcadores, seguradores, legisladores, dentre outros. No contexto da evolução dos VA, trata-se de uma alteração na natureza do funcionamento do componente “Veículos”, porém que poderá exigir o acionamento de diversos outros componentes do sistema para comportar tal mudança.

O detalhamento apresentado na Figura 4 permite visualizar os componentes do STRC e questionar acerca do envolvimento de cada componente no processo da evolução tecnológica para os VA. Por exemplo, verificando o componente “Atores”, pode-se identificar diversas entidades que poderão ter de legislar sobre o uso dos VA ou criar regulamentações técnicas para a construção e uso desses veículos. No componente “Infraestrutura”, têm-se uma possível

alteração dos requisitos técnicos para a sua construção e manutenção em reação à existência dos VA.

O sistema de transporte rodoviário também pode ser analisado do ponto de vista do controle da segurança viária. Neste âmbito, o trabalho de Salmon, Read e Stevens (2016) realizou uma análise sistêmica dos atores envolvidos na manutenção da segurança viária no estado de Queensland, Austrália. Neste levantamento, os autores utilizaram um modelo inicialmente criado para a análise da ocorrência de acidentes, o modelo STAMP, criado por Leveson (2004). Embora o modelo original tenha sido criado para a análise de acidentes, Salmon, Read e Stevens (2016) afirmam que o modelo é sustentado pela teoria de sistemas e controle, e utilizam o modelo genérico apresentado como base para analisar o sistema de trânsito de Queensland.

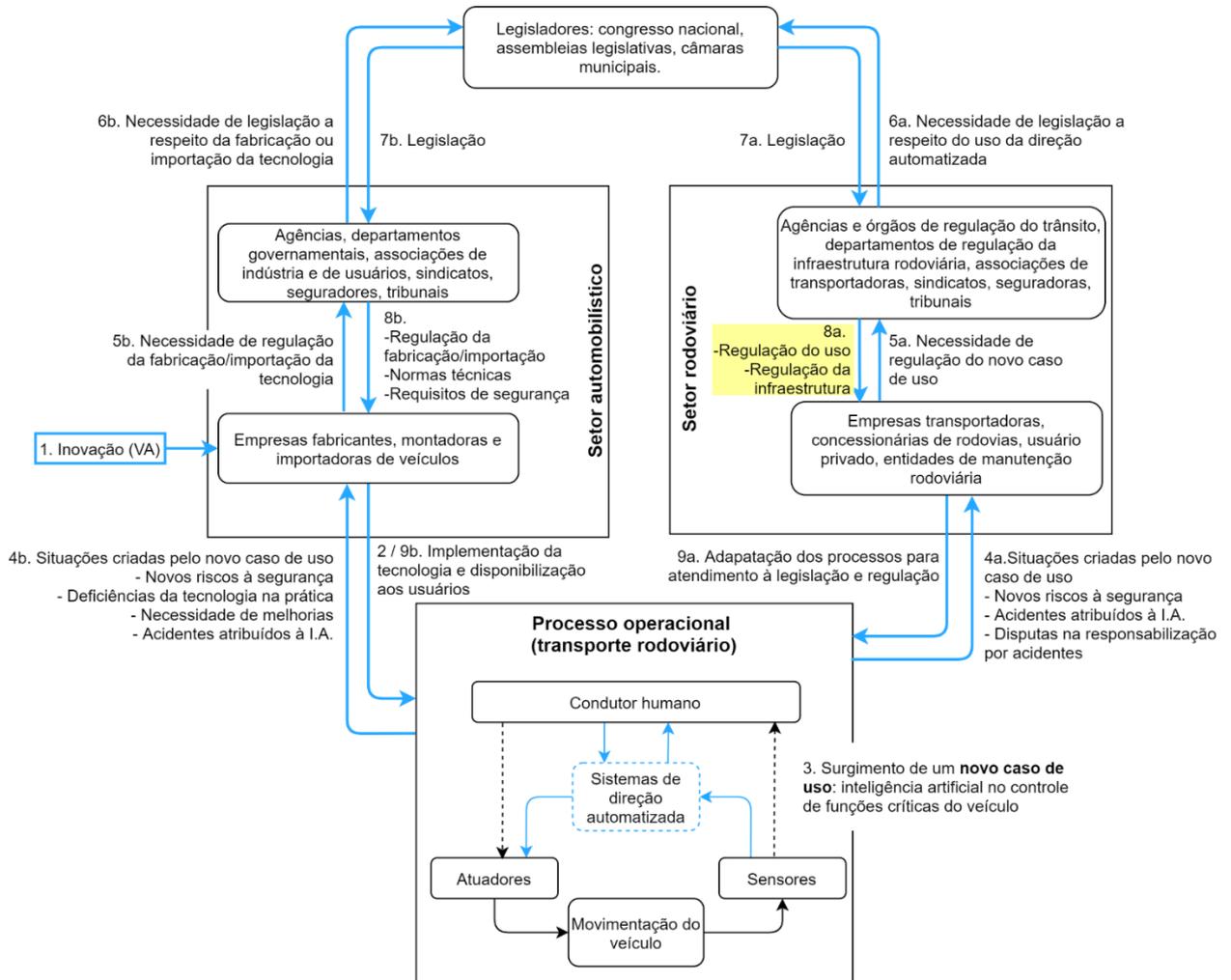
O modelo genérico STAMP, criado por Leveson (2004), é um modelo abrangente que descreve as relações entre diversos atores responsáveis por um “processo social técnico”. O sistema de transporte rodoviário pode ser considerado um “sistema social técnico” complexo, composto por vários elementos inter-relacionados (SALMON; READ; STEVENS, 2016), portanto, o modelo STAMP pode ser utilizado para compreender a estrutura e as relações do transporte rodoviário. O modelo STAMP em uma forma genérica está adaptado e traduzido para o português na Figura 5.



O fluxo apresentado se inicia no item “1. Inovação (VA)”, destacado com um retângulo azul na Figura 6. Trata-se da evolução tecnológica dos VA, cujo ponto de inserção no sistema são as empresas fabricantes, montadoras ou importadoras de veículos, que desenvolvem a tecnologia e a integram a seus produtos. As empresas então disponibilizam a seus usuários a tecnologia dos VA (item 2). No processo operacional (transporte rodoviário), a disponibilização da tecnologia cria um caso de uso. Enquanto antes o condutor humano era unicamente responsável pela movimentação do veículo, agora existem sistemas automatizados que detém o controle de funções críticas do veículo (aceleração, direção etc.). Isso cria uma dinâmica na qual a Inteligência Artificial (IA) é responsável pela análise da situação do veículo e acionamento dos atuadores, e o condutor passa a ser responsável pelo monitoramento do funcionamento do sistema (em níveis intermediários de automação) ou mesmo deixa de fazer parte do sistema (no nível 5 de automação). Tal dinâmica pode ser compreendida como um novo caso de uso no processo operacional (item 3).

Em reação à existência do novo caso de uso, dá-se início a dois fluxos (partindo dos itens 4a e 4b). No fluxo “a”, as novas situações criadas pela introdução de um novo caso de uso são transmitidas às empresas responsáveis pelo transporte (item 4a). Tais situações incluem: a existência de novos riscos à segurança, a ocorrência de acidentes atribuídos à IA e a existência de disputas na responsabilização pela ocorrência de acidentes. Uma vez que essas situações são novas, haverá a necessidade da criação de regulamentações acerca do uso da direção automatizada (item 5a). As agências reguladoras e outras entidades responsáveis pela determinação das regras para os novos casos, no entanto, também sentirão a necessidade da existência de legislação que abranja tais casos (item 6a), legislação essa que deverá ser criada pelo poder legislativo e transmitido de volta às entidades (item 7a)

Figura 6 – Modelo STAMP adaptado para análise da reação do setor à introdução dos VA



Fonte: elaborado pelo autor a partir do modelo apresentado por Leveson (2004)

Como consequência da criação de legislação acerca do novo caso de uso introduzido pela inovação dos VA, as agências reguladoras e associações poderão estabelecer regulamentações técnicas acerca do uso da tecnologia dos VA na prática (item 8a). Tais regulamentações incluem, por exemplo, a definição de em quais rodovias os VA podem ser utilizados, em quais condições climáticas, e quais os requisitos necessários durante a utilização. Havendo regulação específica sobre o tema, caberá às empresas, concessionárias, entidades de manutenção rodoviária e outras adaptar os processos de transporte para atender à legislação e à regulamentação criada e permitir o uso da nova tecnologia.

No segundo fluxo, denominado de fluxo “b”, as novas situações encontradas durante a operação dos VA na prática são transmitidas às empresas e entidades responsáveis pela fabricação ou importação dos veículos (item 4b). Nesse caso, são transmitidos os novos riscos à segurança, as deficiências encontradas da tecnologia na prática, necessidades de melhoria na

tecnologia disponibilizada e relatos de acidentes atribuídos à nova tecnologia. Tal como no fluxo “a”, também será criada uma demanda para a criação de padrões para a regulação da tecnologia existente nos veículos, para a garantia da segurança (item 5b). Essa demanda será transmitida às agências e associações responsáveis pela discussão e padronização dos processos da indústria automobilística. Essas entidades também demandarão legislações específicas sobre o assunto (item 6b), que deverá ser criada pelo poder legislativo e transmitida de volta às entidades (item 7b).

Em reação às novas legislações, as entidades de regulação do setor poderão estabelecer padrões técnicos e requisitos a serem seguidos pelas empresas de fabricação ou importação de veículos para a disponibilização de VA (item 8b). Tais regulações podem incluir, por exemplo, requisitos de segurança ou desempenho a serem atendidos pelos sistemas. Em reação a tais regulações, as empresas deverão então adequar a tecnologia disponibilizada para os usuários em seus veículos (item 9b).

O fluxo apresentado foi estimado pelo próprio pesquisador com base no modelo STAMP como uma forma de compreender a relação entre os atores envolvidos no controle da segurança viária e como tais atores poderão ter de reagir à existência dos VA. A natureza exata das relações dependerá das características específicas da tecnologia disponibilizada. Por exemplo, situações com níveis intermediários de automação podem ser resolvidas através da manutenção do condutor humano como responsável também pelas ações do sistema automatizado, o que poderia exigir, por exemplo, que estivessem sempre disponíveis sistemas para retomada do controle humano do veículo em qualquer situação, ou então que o condutor tivesse conhecimento do modelo de operação do sistema automatizado. Nos casos de automação mais avançada, no entanto, o condutor humano poderá ser removido do modelo, ficando apenas o sistema de direção automatizada responsável pelo controle do veículo. Esta situação será bem mais complexa, e exigirá, por exemplo, o direcionamento da responsabilidade pelas ações do veículo a algum outro ente.

Um dos objetivos do presente trabalho é apresentar um método para a avaliação da interpretabilidade das rodovias pelos algoritmos de visão computacional. Comparando este objetivo à visão sistêmica apresentada na Figura 6, o método proposto poderia se localizar no item 8a. Ou seja, ele poderá auxiliar na regulação das condições necessárias para a utilização dos VA na prática. Nesse caso, a partir da aplicação do método que será posteriormente proposto, poderão ser definidas as rodovias específicas nas quais a operação dos VA é permitida (através de um processo de certificação, por exemplo). Essa determinação poderá mobilizar as entidades de manutenção rodoviária para que as rodovias sejam adequadas para este tráfego, o

que por sua vez deve ser motivado por uma demanda dos usuários das rodovias para a utilização dos VA.

Assim se pode visualizar, a partir dos modelos sistêmicos apresentados, os componentes e atores envolvidos no transporte rodoviário e quais as possíveis reações desse sistema ao aparecimento dos VA. Também se pode visualizar a inserção do método aqui proposto como uma alternativa para a regulação do uso dos VA nas rodovias brasileiras, que visará garantir a capacidade dos veículos interpretarem a sinalização viária de forma correta.

#### **2.4.1 Principais atores do setor rodoviário na esfera federal no Brasil**

Ainda na discussão sobre a estruturação sistêmica do transporte rodoviário e de como tal sistema poderá ser afetado pelo aparecimento dos VA, é importante mapear quais são as principais entidades nesse arranjo institucional, uma vez que as reações do sistema às novas situações introduzidas pelo novo caso de uso recairão em tais entidades e dependerão das ações lideradas por elas. Tais instituições incluem aquelas relacionadas à infraestrutura de transportes, mas também de planejamento, fiscalização e controle do trânsito.

Inicia-se esse panorama através da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 (BRASIL, 1988), que estabeleceu a divisão de competências entre as entidades federativas para a legislação e a exploração de atividades relacionadas ao transporte. Nela, a União recebe a competência exclusiva para legislar sobre o trânsito e o transporte (Art. 22, inciso XI). A União também possui a competência de explorar (diretamente ou por meio de autorização, concessão ou permissão) o serviço de transporte rodoviário interestadual e internacional de passageiros (Art. 21, inciso XII, item e). Essa atribuição não é definida para o transporte rodoviário de cargas, o que demonstra uma grande diferença na natureza desses transportes, visto que o serviço do transporte rodoviário de cargas não é atribuição pública, e é, portanto, aberto ao livre mercado. Tal aspecto difere, por exemplo, do setor ferroviário, cuja exploração (independentemente da natureza do transporte) é atribuição da união quando realizado entre portos brasileiros e fronteiras nacionais, ou transpondo os limites de Estado ou Território (Art. 22, inciso XII, item d).

Percebe-se assim que a União é a entidade pública competente para legislar sobre o trânsito e o transporte, o que é realizado por meio de seu poder legislativo, exercido pelo Congresso Nacional, que por sua vez é composto pela Câmara dos Deputados e pelo Senado Federal. Nesse cenário, as reações legislativas ao surgimento dos VA deverão passar pelo Congresso Nacional. Não obstante, a União também se desdobra em outras entidades

responsáveis pela implementação das políticas públicas para o desenvolvimento dos sistemas de transporte, cuja atuação estará diretamente relacionada às reações institucionais aos VA.

São três as principais leis que desenham a estrutura institucional dos transportes e do trânsito no Brasil. A Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 (BRASIL, 1997), estabelece o Código de Trânsito Brasileiro (CTB). Nela, as regras relativas ao trânsito de qualquer natureza nas vias terrestres do território nacional são definidas. Além disso, a lei nº 9.503 também criou o Sistema Nacional de Trânsito, conjunto de órgãos e entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios que exercem as atribuições do poder público relacionadas ao trânsito. São parte desse sistema o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) e a PRF, dentre outras entidades.

A Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001 (BRASIL, 2001) criou as principais entidades de regulação e de infraestrutura dos transportes, além de dispor sobre a ordenação dos transportes aquaviários e terrestres no país. Foram criadas por essa lei, por exemplo, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), além de outras entidades. A Lei nº 12.379, de 6 de janeiro de 2011 (BRASIL, 2011), por sua vez, criou o Sistema Nacional de Viação (SNV), o qual é constituído pela infraestrutura física e operacional dos vários modos de transporte de pessoas e bens. O SNV é composto pelo Sistema Federal de Viação (SFV) e pelos sistemas de viação dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios (Art. 2º). O SFV, por sua vez, é ainda subdividido em subsistemas rodoviário, ferroviário, aquaviário e aeroviário. A lei também estabelece (Art. 5º) que compete à União a administração do SFV, a qual é exercida diretamente (por meio de órgãos da administração federal) ou mediante concessão, autorização, arrendamento ou parceria público-privada.

Por meio dessas disposições pode-se compreender a distribuição das competências relacionadas à legislação do trânsito e à administração do sistema rodoviário federal. Cabe citar que, de acordo com a Constituição Federal, são reservadas aos Estados todas as competências que não lhes sejam vedadas pela própria Constituição. Portanto, a administração dos sistemas rodoviários estaduais ou a exploração dos transportes intermunicipais, por exemplo, são de competência de cada estado, e possuem legislações específicas. Não obstante, a legislação acerca do trânsito é de competência exclusiva da União, não sendo possível que os estados estabeleçam regras de trânsito diferentes do CTB, por exemplo.

As atividades relacionadas à administração dos transportes atribuídas à União são exercidas por meio da administração pública, que é o “conjunto de órgãos instituídos para consecução dos objetivos do governo” (MEIRELLES, 2010, p. 65). A administração pública

pode ser direta (entidades ligadas diretamente ao Estado e aos órgãos do poder público) ou indireta (entidades com personalidade jurídica própria e com autonomia administrativa e financeira). A administração pública é, portanto, exercida por diversas entidades, cada uma com atribuições e esfera de atuação bem definidas. Abaixo, são identificadas algumas das principais entidades públicas relacionadas à regulação, fiscalização e administração dos sistemas de transporte e do trânsito rodoviário.

#### *2.4.1.1 Ministério da Infraestrutura*

O Ministério da Infraestrutura é um órgão da administração direta que faz parte da Presidência da República e é responsável pelas políticas nacionais de transporte e de trânsito, além de outras atribuições relacionadas ao desenvolvimento dos transportes. Suas competências estão estabelecidas no Art. 35 da Lei nº 13.844 de 18 de junho de 2019 (BRASIL, 2019). Sua criação substituiu o anterior Ministério dos Transportes, com diferenças em relação às atribuições. O Ministério da Infraestrutura é ainda composto por diversos departamentos, conselhos, comissões e secretarias, dos quais faz parte o CONTRAN. Diversas outras entidades da administração pública direta e indireta relacionada aos transportes também são vinculadas ao Ministérios da Infraestrutura.

#### *2.4.1.2 Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN)*

A SENATRAN é uma entidade subordinada à Secretaria Nacional de Transportes Terrestres (SNTT) do Ministério da Infraestrutura. É o órgão máximo executivo do Sistema Nacional de Trânsito (BRASIL, 2021), e possui autonomia administrativa e técnica e jurisdição sobre todo o território brasileiro. O objetivo principal da SENATRAN é fiscalizar a legislação de trânsito e executar as normas e diretrizes estabelecidas pelo CONTRAN. Além disso, o Departamento também coordena os órgãos responsáveis pelo controle e fiscalização da execução da Política Nacional de Trânsito.

#### *2.4.1.3 Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)*

O DNIT é uma autarquia criada pela Lei nº 10.233/2001, vinculada ao Ministério da Infraestrutura, e que substituiu o antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). A atribuição do DNIT é implementar a política formulada para a administração da infraestrutura do SFV, incluindo a sua operação, manutenção, restauração e ampliação. No setor

rodoviário, portanto, a atribuição do DNIT é de manutenção da infraestrutura rodoviária pública federal, ou seja, das rodovias federais não concedidas. Além da manutenção da infraestrutura, o DNIT também é responsável pelo estabelecimento de padrões, normas e especificações técnicas para o projeto, construção e operação das rodovias.

#### *2.4.1.4 Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT)*

A ANTT também é uma autarquia, porém integrante da administração federal indireta, possuindo, portanto, autonomia administrativa, financeira e funcional, além de mandato fixo e não coincidente para seus dirigentes (PINHEIRO; RIBEIRO, 2017). A ANTT é responsável pela regulação da exploração da infraestrutura rodoviária federal e da prestação de serviços de transporte terrestre. No setor rodoviário, a ANTT é responsável por regular as concessões da exploração da infraestrutura e os serviços de transporte interestadual de passageiros. Assim, a ANTT é responsável por fiscalizar os contratos de concessão da exploração das rodovias, nos quais as concessionárias são as responsáveis pela manutenção, restauração e ampliação da infraestrutura. No que tange ao transporte de cargas, a ANTT é responsável pela manutenção do Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Carga (RNTRC), registro obrigatório para os transportadores.

#### *2.4.1.5 Concessionárias de exploração rodoviária*

A Constituição Federal estabeleceu que as competências da União para exploração da infraestrutura de transportes poderiam ser executadas tanto de forma direta, como é o caso das rodovias públicas administradas pelo DNIT, quanto por meio do regime de concessão. No caso das rodovias em regime de concessão, a administração dos trechos é repassada à iniciativa privada, que possui obrigações acerca da manutenção da infraestrutura e da operação rodoviária e que pode, em contrapartida, cobrar tarifas de pedágio para cobrir os custos e obter lucro. Esta relação é estabelecida por meio de contratos de concessão, que normalmente abrangem longos períodos (cerca de trinta anos) e possuem escopos bem definidos em termos das obrigações da concessionária e das condições para a cobrança de pedágio. Assim, nesses trechos, a atividade de manutenção e adequação da infraestrutura, bem como a operação rodoviária, que originalmente são atribuições da União, passam a ser atribuições da empresa contratada. As concessionárias, portanto, são representantes dos poderes da União na execução dessas atribuições. O regime de concessão é regulado pela ANTT, sendo ela responsável não somente

por criar as regras para as concessões, mas também por fiscalizar a atividade das concessionárias.

#### *2.4.1.6 Polícia Rodoviária Federal (PRF)*

A PRF é uma instituição policial federal que faz parte do Sistema Nacional de Trânsito. Suas atribuições, definidas pelo Art. 20 da Lei nº 9.503/1997 são relacionadas à manutenção da segurança nas rodovias federais, incluindo o seu patrulhamento ostensivo. Outras atribuições da PRF incluem a coleta de dados estatísticos e a elaboração de estudos acerca dos acidentes de trânsito e as suas causas, além de ser responsável pelo atendimento das ocorrências de acidente nas rodovias federais.

#### *2.4.1.7 Síntese dos principais atores no setor rodoviário*

A relação dos principais atores no arranjo institucional do sistema rodoviário federal pode ser sintetizada através da Figura 7. Este arranjo descreve, portanto, as entidades que deverão ser impactadas pelo aparecimento dos VA no transporte rodoviário, no que tange à normatização do trânsito e a adequação da infraestrutura. Estas entidades, cada uma em seu escopo, serão desafiadas com os novos problemas provenientes da nova possibilidade de tráfego com direção automatizada, e serão responsáveis pela determinação das regras e limitações em esfera federal para o uso dos VA nas rodovias.

Figura 7 – Síntese dos principais atores institucionais do setor rodoviário em esfera federal



Rodovias Federais



Fonte: elaboração do autor (2021)

## 2.5 POSSÍVEIS IMPACTOS DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS NA SOCIEDADE

Existem diversas previsões a respeito dos possíveis impactos que a tecnologia dos VA pode ter na sociedade. Dentre esses, existem impactos positivos, como a redução do número de mortes nas estradas. No entanto, existem pesquisadores que demonstram ceticismo em relação aos benefícios dos VA, pois compreendem que podem existir danos à sociedade que não são

atualmente visíveis (MORDUE, YEUNG, WU, 2020; PYRIALAKOU *et al.*, 2020; SKARBEEK-ZABKIN, SZCZEPANEK, 2018). Nesta seção, pretende-se apresentar um panorama dos impactos – positivos e negativos – atribuídos ao uso dos veículos autônomos como forma generalizada de transporte.

Serão apresentados, na sequência, estudos que discutem a questão da segurança viária, do meio ambiente, da capacidade da rodovia e da redução de custos operacionais do transporte. Esses fatores, no entanto, não exaurem o total dos impactos dos VA na sociedade. Pela complexidade do tema, não se incluiu nessa discussão, por exemplo, os impactos sociais gerados pela substituição dos condutores profissionais de veículo por tecnologias automatizadas. Outro assunto especialmente complexo são as questões éticas: quem é responsável por um acidente em que a inteligência artificial foi considerada culpada? Os seus desenvolvedores? O dono do veículo? Essas questões não possuem respostas fáceis. Podem ser encontrados, na literatura, diversos trabalhos em que as formas com que os VA impactarão a sociedade são exploradas (ANDERSON *et al.*, 2016; BRACY, BAO, MUNDY, 2019; CHEHRI, MOUFTAH, 2019; IMAI, 2019; MONIOS, BERGQVIST, 2019; MORDUE, YEUNG, WU, 2020; STEYN, MAINA, 2019).

### **2.5.1 Redução do número de acidentes**

Um dos principais argumentos para o desenvolvimento dos veículos autônomos é a redução dos acidentes nas rodovias. A lógica desse argumento é a seguinte: hoje, uma grande proporção dos acidentes rodoviários no Brasil e no mundo são atribuídos a falhas humanas: distração, velocidade excessiva, desobediência à sinalização, direção sob influência de álcool, dentre outras (ANDERSON *et al.*, 2016; BAGLOEE *et al.*, 2016; BRASIL, 2020). Como os veículos autônomos operam de forma completamente automatizada, eles estarão em constante alerta para os perigos de outros veículos e poderão ter a obediência à legislação de trânsito codificada em seus algoritmos. Com isso, será reduzida a oportunidade para falha humana no tráfego. Portanto, uma grande parte dos acidentes rodoviários não mais existirão, o que significaria uma extrema redução das mortes nas rodovias, nos custos em saúde pública, e nas interrupções da operação da rodovia (ANDERSON *et al.*, 2016; BAGLOEE *et al.*, 2016).

Os impactos dos veículos autônomos na segurança viária, sob essa ótica, seriam realmente imensos. No entanto, conforme apresentado anteriormente, alguns autores alertam para o aparecimento de novos fatores causadores de acidentes rodoviários, que poderiam

contrapor os benefícios obtidos pela automação (MORDUE, YEUNG, WU, 2020; PYRIALAKOU *et al.*, 2020; SKARBEEK-ZABKIN, SZCZEPANEK, 2018).

Uma das principais preocupações atuais em relação aos novos perigos introduzidos pelos VA é sobre o que deve acontecer com os veículos que sofrem algum tipo de falha de sensores ou algoritmos, às quais todo sistema computacional está sujeito. Como os veículos devem reagir? O que acontece se a falha causar o desligamento de todo o sistema de direção? Essa preocupação dá origem a um importante conceito na indústria de VA, o conceito de *graceful degradation*, ou “degradação graciosa” em tradução literal (ANDERSON *et al.*, 2016). Se trata de criar protocolos e mecanismos que garantam que os veículos que estejam em estado de falha do sistema não representem perigo aos outros veículos no fluxo rodoviário. Sobre isso, Anderson *et al.* (2016, p. xix–xx, tradução nossa) comenta:

Para permitir a operação autônoma sem um condutor em alerta para backup, a tecnologia deverá ser capaz de degradar de tal forma que uma catástrofe seja evitada. Por exemplo, se algum elemento do sistema falhar em meio a uma curva em tráfego intenso, deve haver um sistema de recuperação suficientemente robusto tal que, mesmo com a falha, o veículo possa chegar ao repouso de forma segura. Desenvolver esse nível de confiabilidade é desafiador.<sup>9</sup>

Conforme exposto pelo autor, a abordagem do problema não é simples. Existem previsões para a disponibilização de áreas de escape nas rodovias, que poderiam ser utilizadas pelos veículos para recuperação e reinício do sistema em casos de falha (LIU *et al.*, 2019). No entanto, apenas essa alternativa não deve resolver o problema por completo, uma vez que a falha ainda pode acontecer em ambientes em que tal área não esteja disponível, ou então o veículo pode nem mesmo conseguir se deslocar de forma segura à área de escape.

## 2.5.2 Fatores ambientais

Não é apenas a questão da segurança viária que motiva os desenvolvimentos dos VA. Outro principal benefício diz respeito ao impacto ambiental da adoção dos veículos autônomos. Sobre esse assunto, Kopelias *et al.* (2020) apresentam uma revisão atualizada dos principais impactos dos veículos autônomos no meio-ambiente. Dentre os principais benefícios nesse aspecto estão: a redução da emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), cujas estimativas variam de 7 a 94% a depender dos fatores levados em consideração; a redução da emissão de gases do efeito

---

<sup>9</sup> Texto original: “In order to permit autonomous operation without an alert backup driver at the ready, the technology will need to degrade gracefully, in such a way that a catastrophe is avoided. For example, if some element of the system fails in the middle of a curve in busy traffic, there must be a sufficiently robust back-up system so that even with the failure, the vehicle can maneuver to a safe stop. Developing this level of reliability is challenging.” (ANDERSON *et al.*, 2016, p. xix–xx)

estufa, que pode variar de 5 a 60%, e a redução do consumo de combustível, que pode variar de 30 a 90%.

Dentre os fatores estimados para causar essas mudanças estão o fato de que os veículos autônomos tendem a priorizar tecnologias de propulsão elétrica, em detrimento da combustão, e a possibilidade de programar os veículos para realizar uma direção ecológica, que prioriza a economia de energia, reduzindo acelerações e frenagens desnecessárias. A redução dos níveis de acidente nas rodovias também provocaria uma redução dos itens de segurança necessários nos veículos, permitindo que os veículos fossem projetados com estruturas mais leves, o que também impactaria no consumo de combustível (KOPELIAS *et al.*, 2020).

Kopelias *et al.* (2020) também chamam atenção para o fato de que, enquanto os números relacionados aos aspectos ambientais parecem promissores, existem outros fatores que podem atrasar ou até suspender a obtenção dessas reduções. Um dos fatores chave mais importantes nessa questão é o nível de penetração dos VA no mercado. A substituição dos veículos convencionais para veículos autônomos será gradual, e se espera que existam problemas de compatibilidade e de operação devidos à composição mista da frota. Os benefícios dos VA para o meio ambiente, portanto, de acordo com os autores, deve ser modesto no início de sua adoção, e intensificar conforme a tecnologia se torna mais adotada no mundo.

A questão levantada por Kopelias *et al.* (2020) a respeito do nível de penetração dos VA no mercado é uma questão fundamental quando se trata dos seus possíveis efeitos na sociedade. O trabalho de Pyrialakou *et al.* (2020) investigou a percepção do público em relação à segurança dos VA a partir da ótica de outros usuários do sistema de transporte – motoristas, ciclistas e pedestres. Um dos principais achados desse estudo foi que as percepções do público em relação à segurança da tecnologia de veículos autônomos são influenciadas tanto de forma positiva quanto de forma negativa pelo nível de conhecimento e experiência pessoal de cada pessoa com a tecnologia. Ou seja, o contato com a tecnologia dos VA, principalmente nas cidades em que a tecnologia está sendo testada em público, pode trazer impressões tanto positivas quanto negativas em relação à segurança da tecnologia, em especial quando se trata do ponto de vista dos outros usuários do sistema de transporte. O estudo também prevê que a percepção do público em relação à tecnologia será o motor – ou o freio – do desenvolvimento e da penetração da tecnologia na sociedade.

### 2.5.3 Melhoria na capacidade de fluxo das rodovias

Um outro impacto dos VA na operação rodoviária é em relação à capacidade de fluxo das rodovias. Estima-se que, com a adoção dos VA, principalmente em se tratando de VAC, a capacidade das rodovias será aumentada, pois os veículos poderão coordenar o tráfego em forma de comboios, eliminando os atritos laterais e frontais entre os veículos (já que estariam viajando na mesma velocidade) e reduzindo a distância entre os veículos, uma vez que a automação permitiria coordenar os comboios para que a aceleração e frenagem ocorresse de forma coordenada, não necessitando de distância de segurança entre os veículos (ANDERSON *et al.*, 2016). Em relação a isso, um estudo analisou os efeitos dos VAC na estabilidade e capacidade das rodovias; Talebpour e Mahmassani (2016) consideraram diferentes proporções de uso dos veículos autônomos nas rodovias, e através de simulação de tráfego comprovaram a mesma afirmação dos trabalhos mais recentes – que os benefícios seriam modestos ao início, e cresceriam em paralelo ao crescimento da adoção dos VA pela sociedade.

Liu *et al.* (2019) propuseram um plano de três fases para a adoção gradual dos VA pela sociedade. Na primeira fase, que é a que se inicia atualmente, os veículos autônomos representam menos de 20% da frota. Os veículos autônomos de nível 1 a 2 ainda estão em processo de provar a sua eficiência, e os veículos autônomos de níveis 3 a 4 ainda devem provar sua confiabilidade. Os veículos convencionais ainda são dominantes, e os de nível 1 e 2 estão em uso apenas por entusiastas da tecnologia. As políticas públicas devem estar focadas em regular o teste dos veículos autônomos em ambientes públicos.

A segunda fase proposta pelos autores se iniciaria na década de 2030. Nela, estima-se que entre 30 e 50% dos veículos sejam VA, e que os veículos de nível de automação 1 e 2 já tenham alcançado a maturidade tecnológica. Os veículos de nível 3 a 4, após terem se provado confiáveis, estarão em processo de demonstrar sua eficiência. Os veículos autônomos de nível 1 e 2 devem estar dominando o mercado nessa fase, e os veículos convencionais (nível 0) em um processo de eliminação gradual. Nessa fase, os veículos de nível 5 devem começar a aparecer no sistema, porém ainda estarão em processo de comprovar sua confiabilidade. As políticas públicas, na opinião dos autores, nessa fase, deverão estar focadas na divisão dos direitos da rodovia e na reforma das leis de trânsito para adequação aos veículos autônomos (LIU *et al.*, 2019).

Ainda de acordo com Liu *et al.* (2019), a terceira e última fase da adoção dos veículos autônomos deve se iniciar apenas na década de 2050. Nela, os veículos com nível de automação de 1 a 4 já terão tecnologia bem amadurecida. Os veículos de nível 3 e 4 devem estar dominando

o mercado, os veículos convencionais devem ter quase desaparecido e os de nível 1 e 2 estarão em processo de eliminação gradual. Assim, de acordo com a previsão dos autores, percebe-se que os benefícios que dependem de uma alta taxa de utilização dos VA, como é o caso do aumento da capacidade das rodovias, podem ser atingidos apenas nos últimos estágios da evolução dessa tecnologia, que ainda devem demorar cerca de três décadas.

#### **2.5.4 Redução de custos operacionais ligados ao transporte de cargas**

O gerenciamento de frotas para transporte rodoviário de cargas possui diversos custos operacionais associados. Para os transportadores, é imprescindível que se tenha conhecimento e controle desses custos, uma vez que “é notório que a frota representa, exceto nos casos de carga própria, a grandeza da empresa. É com seus veículos que ela obtém receita, desenvolve serviços e amplia seus negócios” (VALENTE *et al.*, 2016, p. 33). Assim, a tecnologia dos VA é de especial interesse para os transportadores caso ela possa reduzir os custos da manutenção e operação da frota.

De acordo com Valente *et al.* (2016), os custos associados à operação de frotas podem ser classificados em custos fixos, que englobam gastos que em geral não variam em função do nível de atividade da empresa ou do grau de utilização dos veículos; custos variáveis, que são proporcionais à utilização dos veículos; e custos indiretos, que incluem componentes administrativos necessários para manutenção do sistema de transporte da empresa. Dentre os custos fixos, pode-se destacar a depreciação dos veículos, a remuneração do capital investido e a remuneração de pessoal, como motoristas, ajudantes etc. Os custos variáveis podem incluir, dentre outros, o custo de combustível, óleo lubrificante, lavagem dos veículos, material rodante (pneus, câmaras, recapagens etc.), peças e acessórios, dentre outros. Os custos indiretos por sua vez incluem a remuneração de pessoal de armazéns e escritórios, publicidade, aluguel de imóveis etc.

A adoção dos veículos autônomos na cadeia logística irá impactar diversos componentes do custo operacional das transportadoras. Conforme citado anteriormente, um dos fatores significativos para a determinação dos custos é o limite de horas diárias que o condutor pode trabalhar (BUCKSKY, 2018; FLÄMIG, 2016). Em estágios avançados da adoção dos VA, o número de horas de operação diária dos veículos pode ser aumentado, aumentando a eficiência do transporte. No entanto, conforme também discutido anteriormente, a tecnologia dos VA ainda tem um longo caminho a percorrer até que seja factível a operação do veículo sem supervisão de um condutor humano.

Outra variável que será impactada pela automação é o consumo de combustível. Os veículos com direção autônoma poderão ter os seus comportamentos de aceleração e direção otimizados, o que reduzirá em até 10% o consumo de combustível dos veículos (ANDERSON *et al.*, 2016). A redução da probabilidade de acidentes, conforme discutido anteriormente, também é um fator significativo na redução dos custos para as empresas de transporte.

Além disso, a tecnologia dos VA está bastante associada aos Veículos Elétricos (VE). As duas tecnologias, VA e VEs, reforçam-se mutuamente, ao passo em que o avanço de uma puxa o desenvolvimento da outra (MONIOS; BERGQVIST, 2019). Os impactos da adoção de VE no transporte de cargas podem ser ainda mais dramáticos do que os VA, uma vez que se terá uma grande alteração nas características mecânicas dos veículos e, portanto, nos custos envolvidos na sua operação. Assim, cabe citar que a adoção de Veículos Autônomos Elétricos (VAE) poderá ter um grande impacto nos custos operacionais, criando incentivos para a utilização das tecnologias de automação veicular.

## 2.6 PREPARAÇÃO DAS RODOVIAS PARA OS VA

As diferentes necessidades dos VA frente à navegação e orientação ao longo das rodovias levantam questionamentos acerca das possibilidades de preparação da infraestrutura em si para a navegação de tais veículos. Embora a tecnologia tenha avançado no sentido de permitir que os veículos se orientem nas rodovias atuais, à medida em que os VA ocuparem uma maior proporção do fluxo, a preparação da rodovia de forma específica poderá trazer benefícios para a segurança viária, além de permitir maior facilidade na adoção dos sistemas de direção autônoma. Saeed (2019) elaborou uma tese de doutorado na qual examina o nível de preparação (*readiness*) da infraestrutura rodoviária, e quais as principais mudanças necessárias nesse processo. Em seu trabalho, Saeed (2019) categoriza os tipos de mudanças que poderão ser necessárias na infraestrutura rodoviária para permitir o funcionamento dos VA, citando cinco possíveis tipos de alteração da infraestrutura: manutenção aprimorada, introdução de novos elementos, remoção de elementos existentes, redistribuição de elementos e redesenho de elementos.

Em termos da manutenção rodoviária, antecipa-se que, para que seja possível o tráfego de VA nas rodovias, seja necessário que a sinalização horizontal e vertical seja mantida em excelentes condições, para que os algoritmos de VC possam corretamente identificar e interpretar os diferentes elementos. Além disso, o pavimento também deverá ser mantido em boas condições para que os VA possam interpretar com precisão a situação da superfície para

o tráfego. Esses aspectos poderão exigir um enrijecimento nas demandas para manutenção e restauração das rodovias para que se mantenha a capacidade de tráfego dos VA.

A mesma estimativa acerca da manutenção dos elementos rodoviários também é apresentada por Johnson (2017), porém nesse caso o autor também destaca as necessidades ligadas à comunicação entre veículo e infraestrutura, que é um dos aspectos importantes dos benefícios estimados pelos VA. Em termos de comunicação, poderá ser necessária a introdução de novos equipamentos, como dispositivos de comunicação de curto alcance, para prover informação aos veículos. No entanto, a simples necessidade de alimentação elétrica desses dispositivos já poderá ser um limitante para a sua instalação nas rodovias, uma vez que elas transpassam regiões heterogêneas, nas quais nem sempre se poderá garantir a existência de serviço de energia elétrica, por exemplo. Isso se torna ainda mais problemático em se tratando de dispositivos que necessitem estar conectados a um servidor central, em que também seria necessária a existência de conexão com redes de dados em toda a extensão da rodovia.

A instalação de novos elementos rodoviários, portanto, especialmente aqueles voltados à comunicação entre veículo e infraestrutura, poderá exigir a disponibilização de infraestrutura básica de comunicação em toda a extensão das rodovias, além de também exigir a adoção de rotinas de manutenção intensificadas, uma vez que tais dispositivos poderão ter uma vida útil reduzida em relação aos outros equipamentos rodoviários.

No que diz respeito à alteração dos elementos existentes na rodovia, seja através da criação de novos elementos ou a sua remoção/redistribuição, Saeed (2019) antecipa que nos períodos em que os VA estarão em trânsito compartilhado com veículos convencionais poderá ser necessário criar elementos dedicados apenas aos VA, enquanto ainda serão necessários os elementos usuais. Para exemplificar, o autor cita que poderá ser necessário estabelecer faixas dedicadas de tráfego nas quais os VA poderão trafegar em modo autônomo, ou mesmo faixas exclusivas para caminhões em modo autônomo, nas quais esses poderão trafegar em comboios.

A preparação da rodovia para os VA será também dependente do nível de automação atingido pelos veículos e do nível de integração e comunicação desejado pelos veículos. Além disso, antecipam-se alguns desafios importantes nesse setor, como a compatibilização de infraestrutura para veículos com condutor humano e para VA. Ainda nos níveis iniciais da adoção dos VA, para permitir que os veículos possam navegar com segurança ao longo da rodovia mesmo antes da construção de sistemas integrados de informação compartilhada, será necessário que a sinalização viária seja mantida em excelentes condições. Já para a adoção de

sistemas inteligentes, principalmente em rodovias rurais, é significativo o desafio de prover energia e conectividade ao longo das rodovias.

## 2.7 IMPORTÂNCIA DA INTERPRETAÇÃO DA SINALIZAÇÃO VIÁRIA PARA A SEGURANÇA.

A condição da sinalização viária é frequentemente associada com a melhoria da segurança viária e com a redução no número de acidentes. Um estudo publicado pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), em 2018, mostrou que “Os maiores índices de mortes por acidentes nas rodovias federais em 2017 ocorreram em trechos identificados com avaliação negativa (“Regular”, “Ruim” e “Péssimo”)” (BRASIL, 2018b, p. 79). Nesse estudo, os trechos com sinalização em piores condições apresentam também maior índice de óbitos por acidente (13 mortes a cada 100 acidentes), do que os trechos com sinalização em condições ótimas (8,5 mortes a cada 100 acidentes).

Outros estudos também salientam a importância da sinalização vertical e horizontal das vias para a redução dos conflitos de trânsito, destacando ainda a sinalização horizontal como mais crítica para a segurança nos casos de baixa visibilidade (MOUKARZEL, 1999, *apud* BARRETO, 2015), e apontando que a inadequação da sinalização viária é um dos fatores contribuintes para a ocorrência de acidentes (GOLD, 1998, *apud* BARRETO, 2015).

Além disso, em se tratando da sinalização vertical, por exemplo, a definição do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (CONTRAN, 2007b, p. 21) aponta que a finalidade da sinalização viária é permitir comportamentos que aumentem a segurança viária:

A sinalização vertical tem a finalidade de fornecer informações que permitam aos usuários das vias adotar comportamentos adequados, de modo a aumentar a segurança, ordenar os fluxos de tráfego e orientar os usuários da via.

Para o caso específico das placas verticais de regulamentação, além de ter a finalidade de aumentar a segurança, elas também são uma transmissão oficial das condições, proibições, obrigações ou restrições no uso das rodovias. Ou seja, o desrespeito à sinalização vertical de regulamentação existente em uma rodovia constitui uma infração de trânsito, além de gerar riscos à segurança (CONTRAN, 2007b).

Assim, a desconsideração das mensagens contidas na sinalização viária pode fazer com que um veículo trafegue em condições incompatíveis com a rodovia, gerando não somente situações de infração de trânsito, mas principalmente possibilitando situações com alto risco à segurança. Portanto, assim como a existência e a clareza da sinalização viária é associada com o aumento da segurança, em se tratando dos VA, é crucial que eles possam detectar e

corretamente interpretar as placas existentes na rodovia para compreender as suas regras e identificar a condição correta de tráfego. Conforme apresentado anteriormente, existem grandes desafios para a disponibilização de dispositivos de comunicação entre infraestrutura e veículo em toda a extensão das rodovias, de forma que a interpretação da sinalização existente é atualmente necessária para viabilizar a automação veicular.

Neste sentido, uma das principais preocupações durante a evolução dos VA, especialmente enquanto eles ainda não atingem os níveis mais elevados de automação, será determinar condições nas quais a sua operação é segura. Isso ocorre pois, nos níveis intermediários de automação, o veículo não possui capacidade de trafegar em todos os locais sem a interferência do condutor humano. Isso cria a demanda para que o setor público estabeleça políticas para segurança viária, através das quais se determinaria, por exemplo, em quais rodovias é seguro que os veículos operem em modo autônomo, e em quais o condutor humano deveria estar no controle (JOHNSON, 2017). Nesse sentido, é necessário que se analise a situação das rodovias para verificar se a sinalização vertical e horizontal existente é possível de ser interpretada pelos VA. Alguns estudos têm sido realizados no sentido de identificar relações entre as características físicas da sinalização viária e a sua capacidade de detecção por VA.

Burghardt *et al.* (2020) realizaram uma pesquisa na qual analisam diferentes materiais para a construção de sinalização horizontal e os seus efeitos na retrorrefletividade da sinalização. Ao contextualizar o problema, os autores apresentam motivos pelos quais a sinalização necessita ter retrorrefletividade alta. Dentre um dos principais motivos está a necessidade dos VA de identificar a sinalização de forma clara, mesmo em situações de visão desfavorável. Neste sentido, os autores também mencionam algumas situações que, normalmente, são resolvidas de forma corriqueira pelos condutores humanos, mas que podem gerar riscos para os VA.

Dentre as situações levantadas, Burghardt *et al.* (2020) destacam: a ausência de sinalização horizontal em áreas não residenciais, o que pode ser especialmente frequente em áreas de baixo tráfego; a obstrução da sinalização por elementos como neve, terra, outros veículos, vegetação etc.; a variação nas características da sinalização, que pode exigir uma complexa programação por parte do VA para compreender as variações existentes e seus significados; a existência de defeitos no pavimento que possam alterar o resultado percebido pelo VA e ainda a variação da qualidade da sinalização em um trecho, que não gera problemas para os condutores humanos, mas pode confundir os algoritmos de VC. Desta forma, os autores

destacam a necessidade de se utilizar materiais de alta qualidade para manutenção da visibilidade da sinalização horizontal ao longo do tempo, uma vez que situações que não costumam gerar problemas de segurança para condutores humanos podem gerar riscos para os VA.

Pike, Barrete e Carlson (2018) realizaram um estudo técnico com a finalidade de avaliar diferentes características da sinalização horizontal e como elas impactam a capacidade dos sistemas de VC detectá-las. Foram construídas diferentes pistas de teste, com diferentes características de sinalização horizontal, e sistemas de detecção foram testados sobre as pistas. Os autores puderam identificar diversos fatores que impactam de forma positiva ou negativa a capacidade do sistema de VC identificar a sinalização.

Como resultado do estudo realizado por Pike, Barrete e Carlson (2018), portanto, verificou-se que a velocidade é um fator que influencia de forma negativa a leitura da sinalização horizontal, efeito que foi mais significativo durante o dia do que durante a noite. A captação da luz de veículos trafegando no sentido oposto também foi detectado como um fator que pode influenciar de forma negativa a leitura da sinalização, embora os autores reconheçam que esse fator não foi analisado de forma extensiva em seu estudo. Além disso, os pesquisadores também identificaram que a existência de reflexos de outros veículos ou mesmo do sol é um problema mais intenso quando a pista se encontra em condições molhadas. Em relação às características da sinalização em si, os autores verificaram que as faixas seccionadas são mais difíceis de serem detectadas do que as faixas contínuas, embora na maioria dos casos a diferença seja pequena. Em conclusão, os autores comentam que, dentre as características da sinalização horizontal, o critério chave para determinar se a sinalização será corretamente identificada pelo VA é o contraste entre a faixa e o pavimento adjacente. Isso quando não existirem outros fatores que impeçam a interpretação, como reflexos, obstruções etc.

Em se tratando da detecção da sinalização vertical, Wali *et al.* (2019) apresentam uma revisão dos diversos tipos de algoritmos de VC mais recentes, e discutem os principais obstáculos e desafios desse tipo de detecção. Os autores comentam que o desempenho desses sistemas é altamente dependente das condições do entorno da placa, e que os algoritmos são especialmente sensíveis a situações que afetem a visibilidade, sejam elas temporárias ou permanentes. Dentre os fatores que podem interferir na detecção da sinalização, os autores citam a obstrução da placa por obstáculos, o desgaste da superfície da placa, a existência de danos físicos ou mesmo a existência de placas próximas, o que pode confundir o algoritmo de detecção. As situações comentadas estão ilustradas na Figura 8.

Figura 8 – Exemplos de situações que podem afetar a detecção da sinalização vertical



Fonte: Wali *et al.* (2019)

Dessa forma, percebe-se que existem diversas situações que tornam a leitura da sinalização viária uma tarefa complexa para os VA. Além disso, a correta interpretação da sinalização está diretamente atrelada à segurança viária, e erros nesse sentido podem gerar riscos para o VA e para outros usuários da rodovia. Portanto, a capacidade dos VA interpretarem de forma correta a sinalização viária em determinados trechos deve ser um fator determinante para a permissão de esses veículos operarem de forma autônoma nesses trechos. Isso cria a demanda para que as rodovias sejam devidamente conservadas, caso se deseje permitir o tráfego de VA, mas também para que se realize uma avaliação das rodovias existentes no sentido de identificar trechos em que seriam necessárias intervenções caso o tráfego de VA fosse desejado.

## 2.8 CONSTRUÇÃO DE MÉTODO DE APOIO À DECISÃO

A Teoria da Decisão pode ser aplicada para o estudo dos métodos de apoio à decisão. Segundo Gomes (2020, p.15), “Denomina-se Teoria da Decisão o estudo dos paradigmas subjacentes à decisão e seus fundamentos analíticos”. Ao longo do processo de tomada de decisão, “os métodos multicritérios servem para selecionar, ordenar, classificar ou descrever detalhadamente as alternativas mediante as quais se tomará a decisão” (Gomes, 2020, p.33).

De acordo com Chankong e Haimés (1983), os métodos multicritérios são formas de avaliar a preferência de um tomador de decisão. De acordo com os autores, existem três formas de realizar essa avaliação: através de avaliação direta, eliminação sequencial ou proximidade espacial. Dentre esses, o mais proeminente é o primeiro que, de acordo com os autores, se baseia na premissa de que a preferência do tomador de decisão pode ser quantificada, aferida, e representada na forma de uma função real, chamada de função utilitária (CHANKONG e HAIMES, 1983). Os autores ainda comentam que, após identificar o conjunto de atributos relevantes para a decisão, os cinco passos a serem seguidos são: 1) verificar a existência de uma função utilitária, 2) selecionar uma forma apropriada para a função utilitária, 3) construir funções componente adequadas para compor a função utilitária para a tomada de decisão, 4)

determinar as constantes de escala apropriadas e 5) verificar a consistência das funções e fazer a análise final da decisão (CHANKONG e HAIMES, 1983, p. 180).

Em relação ao primeiro passo, trata-se de verificar a estrutura da decisão a ser tomada, e verificar se ela pode ser representada por uma função utilitária ou não. O terceiro passo trata-se da construção das funções componente da função utilitária, ou seja, as funções que quantificam cada critério considerado. O passo 4 trata de determinar as constantes de escala apropriadas para a combinação das funções componentes na função utilitária da decisão.

O último passo na criação de um método multicritérios, portanto, conforme Chankong e Haimes (1983), se trata da avaliação da consistência das funções propostas para o processo de decisão. A análise da consistência das funções propostas no processo de criação de um método de apoio à decisão pode ser realizada pelo método de avaliação da correlação estatística através do coeficiente de correlação  $r$ . Sobre esse coeficiente, Taylor explica:

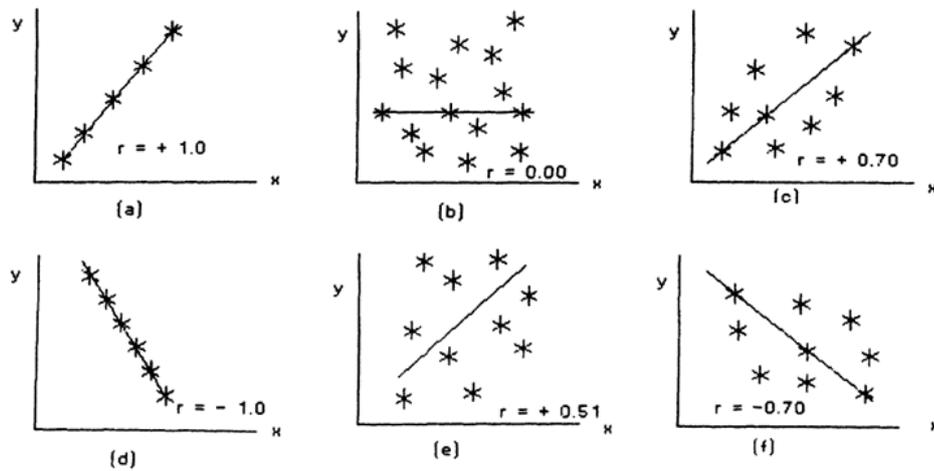
O valor de correlação  $r$  requer tanto uma magnitude quanto uma direção de positivo ou negativo. Pode receber valores de -1 a 1, onde os valores são absolutos e não-dimensionais sem unidades envolvidas. Um coeficiente de correlação de zero indica que não existe associação entre as variáveis consideradas. Quanto mais perto o coeficiente  $r$  chega de  $\pm 1$ , independente do sentido, mais forte é a associação existente indicando uma relação mais linear entre as duas variáveis. A intensidade da correlação não é dependente da direção ou do sinal. Assim,  $r = 0,90$  e  $r = -0,90$  são iguais no grau de associação das variáveis. Um coeficiente de correlação positivo indica que um aumento na primeira variável corresponde a um aumento na segunda, implicando uma relação direta entre as variáveis. Uma correlação negativa indica uma relação inversa onde quando uma variável aumenta, a outra diminui. (TAYLOR, 1990, p. 36, tradução nossa)<sup>10</sup>

Para realizar tal análise, primeiramente, realiza-se uma listagem das possíveis variáveis e uma recuperação dos dados observados em alguma aplicação de referência. Após listar as variáveis, o coeficiente  $r$  é calculado entre cada uma das variáveis e o valor resultante da função utilitária proposta, e os valores de  $r$  indicam a relação entre cada par de variáveis. Taylor (1990) exemplifica como o coeficiente  $r$  varia em função da relação entre as variáveis através da Figura 9.

---

<sup>10</sup> Texto original: “The correlation  $r$  value requires both a magnitude and a direction of either positive or negative. It may take on a range of values from -1 to 1, where the values are absolute and nondimensional with no units involved. A correlation coefficient of zero indicates that no association exists between the measured variables. The closer the  $r$  coefficient approaches  $\pm 1$ , regardless of the direction, the stronger is the existing association indicating a more linear relationship between the two variables. The strength of the correlation is not dependent on the direction or the sign. Thus,  $r = 0.90$  and  $r = -0.90$  are equal in the degree of association of the measured variables. A positive correlation coefficient indicates that an increase in the first variable would correspond to an increase in the second variable, thus implying a direct relationship between the variables. A negative correlation indicates an inverse relationship whereas one variable increases, the second variable decreases.” (TAYLOR, 1990, p. 36).

Figura 9 – Exemplos de relações entre duas variáveis ( $x$  e  $y$ ) e o valor resultante do coeficiente  $r$ .



Fonte: Adaptado de Taylor (1990)

Através de análise da correlação entre as variáveis analisadas e a comparação com a correlação esperada entre as variáveis, pode-se assim ter uma medida da consistência das funções propostas para o método de decisão multicritérios, avaliando se o método apresenta o comportamento pretendido durante a sua concepção.

### 3 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

O capítulo anterior apresentou uma fundamentação teórica acerca do assunto abordado nesta dissertação. Dentro do contexto apresentado, objetiva-se aprofundar o conhecimento acerca dos requisitos dos VA em termos da infraestrutura rodoviária, mais especificamente acerca da interação dos veículos com a sinalização vertical e horizontal. Esse aprofundamento é feito através da revisão sistemática de literatura, que culmina na proposição de um método para avaliação da interpretabilidade das rodovias em função do desempenho de algoritmos de VC.

A Revisão Sistemática (RS) se faz necessária pois, por mais abrangente que se tenha almejado apresentar a pesquisa narrativa, ainda existe a possibilidade de viés do pesquisador na busca e na seleção dos materiais abordados, processo que não foi detalhado até agora. A revisão sistemática, por sua vez, tem as qualidades de ser reproduzível e produzir um resultado imparcial, conforme explicam Donato e Donato (2019, p. 227):

A RS é reproduzível e tende a ser imparcial. Visa reduzir o viés através do uso de métodos explícitos para realizar uma pesquisa bibliográfica abrangente e avaliar criticamente os estudos individuais. Assim, em contraste com a revisão tradicional ou narrativa, a RS responde a uma questão de investigação bem definida e é caracterizada por ser metodologicamente abrangente, transparente e replicável.

Assim, neste capítulo, será realizada a revisão sistemática do tema abordado, diretamente relacionado com o objetivo desta dissertação. Serão dois eixos de pesquisa abordados neste capítulo: 1) qual o impacto previsto do crescimento do uso dos veículos autônomos em termos das suas necessidades de infraestrutura e de como ela deverá ser preparada em ambientes rurais? 2) de que forma as rodovias podem ser classificadas em termos de quão adequadas são para o tráfego de veículos autônomos?

De forma a maximizar a reprodutibilidade do processo e reduzir a possibilidade de viés na escolha das etapas seguidas na revisão sistemática, optou-se por utilizar uma metodologia de construção de conhecimento denominada *Knowledge Development Process - Constructivist* (PROKNOW-C), desenvolvida proposta por Ensslin *et al.* (2010d, apud AFONSO *et al.*, 2012). Trata-se de um processo com critérios pré-determinados de busca e seleção de trabalhos, cuja utilização auxilia na obtenção do corpo referencial mais relevante possível para o tema de pesquisa abordado.

Afonso *et al.* (2012, n. p.) explicam o método em linhas gerais:

A metodologia [...] consiste em uma série de procedimentos sequenciais que se iniciam desde a definição do mecanismo de busca de artigos científicos a ser utilizado, seguindo por uma série de procedimentos pré-estabelecidos até atingir a fase de filtragem e seleção do portfólio bibliográfico relevante sobre o tema.

O procedimento inicia após a definição dos eixos de pesquisa a serem investigados. A partir de cada eixo de pesquisa, o primeiro passo é a seleção de palavras-chave utilizadas nos mecanismos de busca, que abrangem palavras relacionadas ao tema de pesquisa. Após isso, realiza-se uma definição das bases de dados utilizadas para a busca dos documentos. Com as bases de dados escolhidas, são realizados testes de aderência das palavras-chave, através de pesquisa nos bancos de dados e leitura de alguns artigos a fim de validar a escolha. Caso sejam identificadas palavras-chave mais adequadas para o tema, ou se constate que as palavras inicialmente escolhidas tenham pouca aderência, retorna-se ao primeiro passo para redefinir as palavras-chave utilizadas na pesquisa (AFONSO *et al.*, 2012).

Ao final desta primeira etapa, então, realiza-se a pesquisa e o armazenamento de todos os artigos resultantes no banco de dados bruto, que será posteriormente filtrado. Após a construção do banco de dados bruto, se realiza uma etapa de remoção de artigos repetidos, provenientes de múltiplas pesquisas realizadas. O segundo filtro é realizado a partir da leitura do título dos artigos, onde devem ser descartados os artigos que não tratem especificamente do tema de pesquisa (AFONSO *et al.*, 2012).

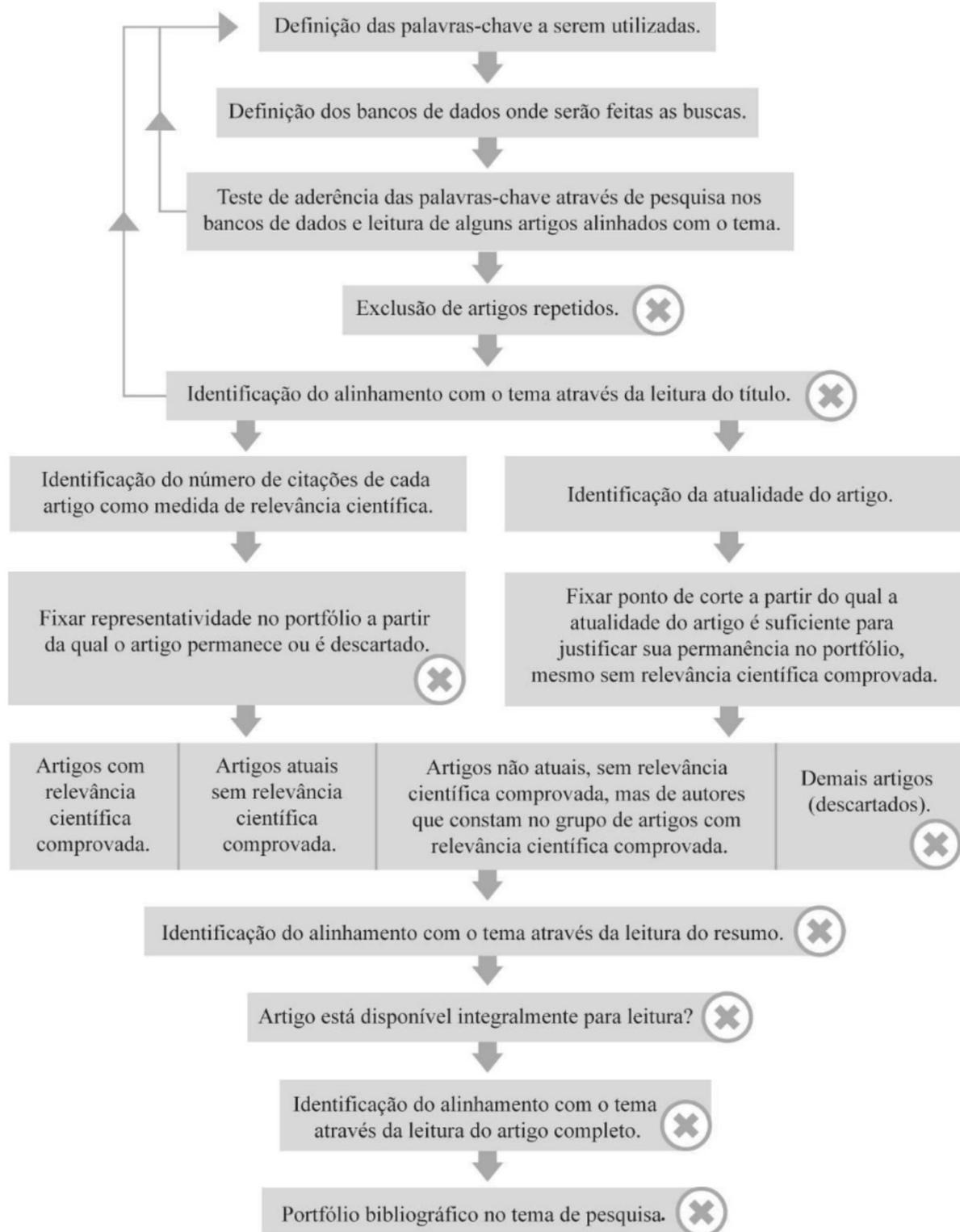
Após isso, inicia-se uma etapa de análise da relevância científica dos trabalhos selecionados, composta por diversos passos. O primeiro passo é a busca da quantidade de citações de cada artigo, através da ferramenta “Google Acadêmico”. A partir desta informação, o pesquisador deve definir um ponto de corte a partir do qual os artigos serão considerados como possuindo relevância científica confirmada, o que pode ser realizado através de uma análise da distribuição do número de citações em todo o banco de dados. Os artigos classificados como relevantes passam então por uma leitura dos resumos, de forma a eliminar do banco de dados os artigos que não estejam alinhados ao tema pesquisado. Após esta leitura e filtro, cria-se um banco de autores, que consiste na listagem dos autores dos artigos com relevância científica confirmada (AFONSO *et al.*, 2012).

Os artigos que na etapa anterior não foram marcados como possuindo relevância científica confirmada passam por outra etapa de verificação. Primeiramente, se analisa o ano de publicação, e consideram-se relevantes todos os artigos publicados em, no máximo, dois anos. Para os artigos publicados há mais tempo, deve-se verificar se algum dos autores faz parte do banco de autores dos trabalhos com relevância científica confirmada. Caso afirmativo, o artigo é considerado com relevância confirmada. Ao final dessa etapa, realiza-se a leitura do resumo de todos os artigos com relevância confirmada que ainda não tenham sido lidos, e eliminam-se os artigos não aderentes ao tema da pesquisa (AFONSO *et al.*, 2012).

A última etapa consiste na consolidação de todos os artigos considerados relevantes nas etapas de seleção, e na pesquisa pela disponibilidade dos artigos integrais para consulta (até então trabalhou-se somente com os títulos e resumos). Caso algum artigo não esteja disponível, ele é descartado da relação do pesquisador. Procede-se então com a leitura de todos os artigos integralmente disponíveis e a definição do alinhamento de cada artigo com o tema de pesquisa. Os artigos que após a leitura integral sejam considerados não alinhados à pesquisa, são descartados, e os demais passam a compor o portfólio bibliográfico do pesquisador no tema de pesquisa (AFONSO *et al.*, 2012).

O processo está resumido na Figura 10. Essa metodologia será aplicada, portanto, para levantar informações sobre ambos os eixos de pesquisa. Os idiomas utilizados para a revisão sistemática serão o Inglês e o Português, porém com foco nas pesquisas em Inglês, devido à maior quantidade de pesquisas publicadas nesse idioma ao redor do mundo e ao fato de que o assunto abordado não está limitado à realidade Brasileira, mas possui significativa quantidade de artigos publicados em outros países, como verificado através da revisão narrativa apresentada para fundamentação teórica.

Figura 10 – Resumo do processo de seleção de portfólio bibliográfico PROKNOW-C



Fonte: Ensslin *et al.* (2010d) apud Afonso *et al.* (2012)

### 3.1 SELEÇÃO DAS BASES DE DADOS

Embora a metodologia preveja a seleção das palavras-chave antes da seleção das bases de dados, realizou-se primeiramente a seleção das bases de dados, de forma a permitir que a seleção das palavras-chave pudesse ser diretamente validada e refinada em função das buscas realizadas. Através de um critério de abrangência internacional e nacional e de disponibilidade de acesso, selecionaram-se as seguintes bases de dados:

- Scopus,
- Web of Science,
- EBSCOhost,
- Springer,
- Scielo,
- Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD).

Dentre as bases de dados selecionadas, foi realizada a pesquisa na língua portuguesa nas bases Scielo e BDTD, enquanto foi utilizada a língua inglesa para as demais. No que tange a possibilidade de acesso, as bases Scopus, Scielo e BDTD são de acesso livre, e o acesso às demais é disponibilizado através da utilização de rede privada virtual (*Virtual Private Network*, VPN) fornecida pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Quanto à natureza dos trabalhos indexados, a BDTD é uma biblioteca que disponibiliza teses e dissertações realizadas em todo o Brasil, enquanto as demais disponibilizam, primariamente, artigos científicos publicados em periódicos.

### 3.2 SELEÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE

Objetiva-se pesquisar acerca dos possíveis impactos dos veículos autônomos na preparação da infraestrutura rodoviária. Para tanto, é importante que sejam incluídas palavras-chave relacionadas aos veículos autônomos e relacionadas à preparação infraestrutura rodoviária. Serão propostas várias palavras sinônimas para cada termo de pesquisa. Por exemplo, para representar o termo “rodovia”, serão utilizadas as palavras *road*, *roadway*, *highway*, *motorway*, *carriageway* e *freeway*. Essas palavras são associadas através da utilização do operador *OR*, que permite que sejam encontrados resultados com qualquer uma das palavras selecionadas. Através da utilização dos operadores de pesquisa avançada, serão criadas frases de pesquisa que incluam as diversas palavras possíveis para cada termo. Os operadores utilizados serão:

- *OR*: operador “ou”, seleciona resultados que possuam um termo ou outro;

- *AND*: operador “e”, seleciona apenas resultados que possuam ambos os termos;

As frases de pesquisa serão inicialmente testadas em todas as bases de dados, de forma a refinar a sua construção e incluir/excluir palavras encontradas durante a validação e que sejam relevantes ou não.

A primeira frase de pesquisa foi construída com base nos termos levantados durante a pesquisa narrativa, realizada anteriormente. Durante a construção das frases de pesquisa, observou-se um número elevado de resultados em inglês, o que permitiu que a pesquisa fosse realizada de forma mais específica através da adição de mais termos. No caso da pesquisa em português, a pesquisa por artigos científicos na base Scielo foi ampliada através da remoção dos termos relacionados à rodovia, deixando apenas os termos relacionados a veículos autônomos. Assim, as frases de pesquisa utilizadas foram as seguintes:

- Em inglês: “(Autonomous OR automated OR self-driving) AND (vehicles OR cars OR trucks) AND (road OR roadway OR highway OR motorway OR carriageway OR freeway) AND (infrastructure OR signs OR markings OR requirements OR needs)”
- Em português (Scielo): “(veículo OR carro OR caminhão OR automóvel) AND (autônomo OR robótico OR automatizado)”
- Em português (BDTD): “(veículo OR carro OR caminhão OR automóvel) AND (autônomo OR robótico OR automatizado) AND (rodovia OR via OR estrada OR autoestrada OR rua OR avenida OR sinalização)”

A pesquisa com essas frases de pesquisa foi realizada nas bases de dados selecionadas, onde se percebeu que as frases estavam adequadas, uma vez que os artigos estão relacionados ao tema e a quantidade de resultados foi boa. No caso das pesquisas em português (Scielo), embora tenham sido obtidos poucos resultados, foram testadas outras frases de pesquisa mais abrangentes, como “veículos autônomos”, em que se verificou que o número de resultados não foi aumentado.

O número inicial de resultados obtidos na base “Springer” foi de 62.618. Uma vez que tal número é excessivo para a leitura dos títulos, foram adicionados os seguintes filtros nessa base de dados: apenas documentos do tipo “artigo”, a partir do ano de 2011 (últimos dez anos), e pertencentes à disciplina “Engenharia”. Com os novos filtros, o total de artigos selecionados na “Springer” ficou em 3.192. Já para a base de dados EBSCOhost, a página de resultados indicou que haviam sido encontrados 2.052 resultados, porém mediante exportação de arquivo

para importação no banco de dados, foram obtidos 1.671 registros. Foram considerados, portanto, os registros obtidos pela exportação. A quantidade de resultados obtidos em cada base de dados, portanto, está apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 – Número de resultados obtidos por base de dados

<b>Base de dados</b>	<b>Resultados</b>
Scopus	4.927
Web of Science	2.680
EBSCOhost	1.671
Springer	3.192
Scielo	11
BDTD	153
<b>TOTAL</b>	<b>12.634</b>

Fonte: elaboração do autor (2021)

### 3.3 PROCESSO INICIAL DE FILTRAGEM

Os resultados das buscas realizadas foram inseridos em um banco de dados, através do qual realizou-se o tratamento para eliminação dos registros repetidos, através da comparação do título dos artigos. Para isso, realizou-se primeiramente uma normalização no texto dos títulos de forma a desconsiderar espaços e símbolos especiais (qualquer caractere exceto as letras de “A” a “Z” foram removidos) e desconsiderar a diferença entre letras maiúsculas e minúsculas (todas as letras foram consideradas maiúsculas. Assim, por exemplo, o título:

- “They have to be better than human drivers!” Motorcyclists’ and cyclists’ perceptions of autonomous vehicles

Foi normalizado para:

- THEYHAVETOBEBETTERTHANHUMANDRIVERSMOTORCYCLISTS  
ANDCYCLISTSPERCEPTIONSOFAUTONOMOUSVEHICLES

De forma que outras possíveis representações desse título também sejam consideradas como duplicações do mesmo artigo, tais como:

- They have to be better than human drivers: Motorcyclists and cyclists perceptions of autonomous vehicles
- “They have to be better than human drivers!” Motorcyclists and cyclists perceptions of autonomous vehicles
- “They Have To Be Better Than Human Drivers!” Motorcyclists’ And Cyclists’ Perceptions Of Autonomous Vehicles

Essa normalização foi realizada através da ferramenta computacional utilizada para o gerenciamento do banco de dados (Postgres). Após a comparação dos títulos normalizados e a

eliminação dos registros duplicados, restaram 9.354 registros no banco de dados. Outra verificação para registros duplicados também foi realizada através do identificador digital dos documentos (DOI), na qual foram eliminados 39 registros, restando 9.315 documentos no banco de dados.

Neste momento se iniciou a leitura do título dos artigos de forma a identificar o seu alinhamento com os eixos de pesquisa. Durante esta leitura, foi realizada mais uma validação das palavras-chave utilizadas na pesquisa, através da constatação do número de resultados aderentes obtidos dentre os resultados totais. Isso foi feito após a leitura de 1000 títulos, em que se constatou que 166 trabalhos tinham aderência com os eixos de pesquisa, através do título. Com isso, considerou-se que a escolha de palavras-chave foi conveniente, e procedeu-se com a análise do restante da base de dados.

Para auxiliar o processo de leitura dos títulos, foi desenvolvido em linguagem *Python* um software de auxílio à revisão, o qual apresenta, um a um, os dados básicos do artigo (como título, tipo, base de conhecimento, ano etc.), aciona a leitura automatizada dos títulos (através da ferramenta *text-to-speech* disponibilizada no sistema operacional Windows), e permite que o artigo seja selecionado ou não através do pressionamento de uma tecla única no teclado, avançando automaticamente para o próximo título.

O processo de leitura dos títulos foi subdividido. Primeiramente, realizou-se uma leitura rápida de toda a base de dados, na qual foram eliminados todos os títulos cujo assunto não estava relacionado à pesquisa. Exemplos de artigos eliminados nessa primeira etapa são aqueles cujo tema eram aeronaves automatizadas, ou veículos industriais. Após a realização desse primeiro filtro, restaram 799 documentos.

Os 799 títulos restantes foram novamente revisados, desta vez considerando o conteúdo dos títulos e comparando com o objetivo da presente pesquisa. Nessa etapa foram eliminados os artigos que, por exemplo, apresentavam novos algoritmos de visão computacional para detecção de placas. Esses algoritmos, por mais que estejam relacionados ao tema, não estão alinhados com a finalidade da pesquisa, que busca artigos cujo foco esteja na infraestrutura rodoviária, e não nos algoritmos que integram os VA.

Após finalizar o processo de leitura dos 9.315 títulos em duas etapas e descartar primeiramente os trabalhos sem relação com o tema de pesquisa, e após isso os trabalhos sem aderência com o objetivo da pesquisa, restaram 349 documentos no banco de dados.

### 3.4 AVALIAÇÃO DA RELEVÂNCIA CIENTÍFICA

O primeiro passo para a avaliação da relevância científica é a obtenção do número de citações para todas as publicações ainda restantes no banco de dados, o que foi realizado através do “Google Acadêmico”. Com isso, o próximo passo foi uma análise da distribuição do número de citações para cada artigo, a fim de escolher o ponto de corte em relação ao número de citações para consideração dos artigos com relevância científica. Para isso, avaliou-se a distribuição do número de citações por artigo, e estabeleceu-se um ponto de corte de 12 citações ou mais para decidir a relevância científica dos artigos. Desse filtro resultou a seleção de 83 artigos.

Após a leitura dos resumos desse primeiro grupo, foram selecionados 40 artigos relevantes para o tema da pesquisa. Dessa lista, foi criado o banco de autores, composto por 136 autores. Na sequência, foram selecionados mais dois grupos de artigos, dentre aqueles que ainda não tiveram sua relevância científica comprovada: o grupo dos artigos mais recentes, cuja atualidade justifica a relevância científica, e o grupo dos artigos ainda não selecionados cujos autores faziam parte do banco de autores. Para o critério de atualidade, selecionou-se os artigos publicados entre 2019 e 2021, adicionando 150 artigos à seleção. Pelo critério dos autores estarem no banco de autores, foram selecionados mais 8 artigos à seleção. Assim, foram adicionados no total mais 158 artigos para a leitura do resumo e identificação da relevância científica.

Após a leitura dos 158 resumos, foram selecionados mais 46 artigos com concordância com os objetivos da pesquisa, que se somam aos 40 selecionados anteriormente para totalizar 86 artigos com aderência identificada até o momento, que passarão para a próxima fase: coleta dos artigos integrais.

Dos 86 documentos selecionados para leitura, 69 estavam disponíveis na internet de forma integral. Os documentos foram, portanto, baixados e lidos em sua íntegra, de forma a fazer o último filtro referente ao alinhamento do artigo com a pesquisa, em função do seu conteúdo integral. Desse último filtro restaram 31 documentos, que passaram a integrar o portfólio bibliográfico dessa revisão, analisado na sequência.

### 3.5 RESULTADO DA COLETA DE TRABALHOS

Os 31 trabalhos selecionados para integrar o portfólio bibliográfico da pesquisa estão apresentados no Quadro 4. A Figura 11 mostra a distribuição do número de trabalhos selecionados por ano de publicação.

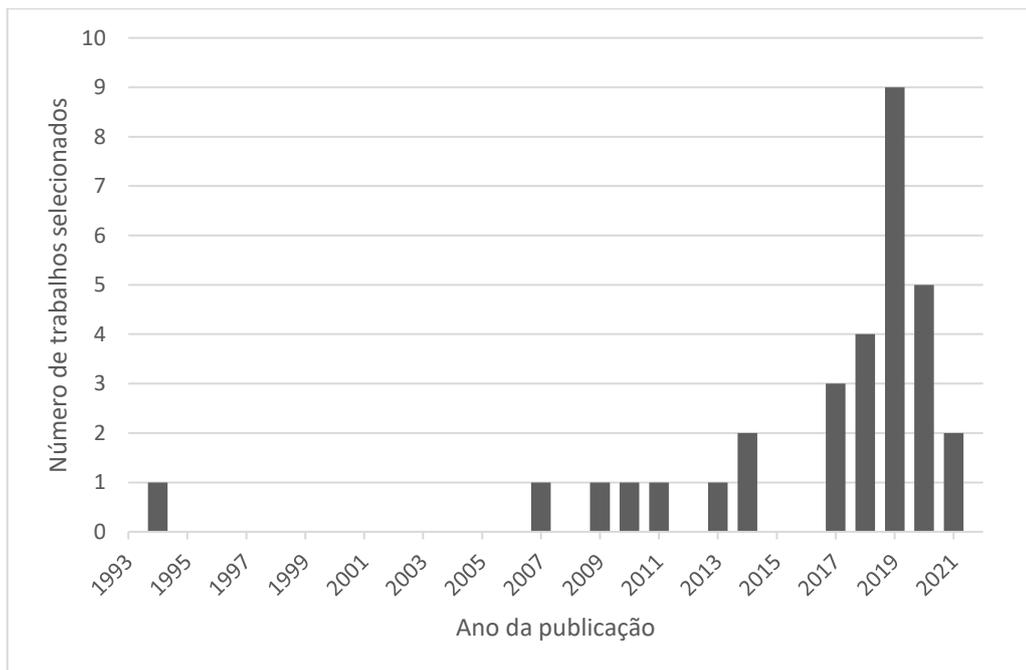
Quadro 4 – Trabalhos selecionados durante a revisão sistemática

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Ano</b>
Campbell, N. W.; Pout, M. R.; Priestly, M. D.J.; Dogless, E. L.; Thomas, B. T.	Autonomous road vehicle navigation	1994
Özgüner, Ü.; Stiller, C.; Redmill, K.	Systems for safety and autonomous behavior in cars: The DARPA grand challenge experience	2007
Shladover, S.	Cooperative (rather than autonomous) vehicle-highway automation systems	2009
Rupp, J. D.; King, A. G.	Autonomous driving - A practical roadmap	2010
Vanholme, B.; Gruyer, D.; Glaser, S.; Mammars, S.	A legal safety concept for highly automated driving on highways	2011
Vanholme, B.; Gruyer, D.; Lusetti, B.; Glaser, S.; Mammars, S.	Highly automated driving on highways based on legal safety	2013
Mogelmoose, A.; Liu, D.; Trivedi, M. M.	Traffic sign detection for U.S. roads: Remaining challenges and a case for tracking	2014
Nitsche, P.; Mocanu, I.; Reinthaler, M.	Requirements on tomorrow's road infrastructure for highly automated driving	2014
Chen, Z.; He, F.; Yin, Y.; Du, Y.	Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks	2017
Janai, J.; Guney, F.; Behl, A.; Geiger, A.	Computer vision for autonomous vehicles: Problems, datasets and state-of-the-art	2017
Prakken, H.	On the problem of making autonomous vehicles conform to traffic law	2017
Farah, H.; Erkens, S. M. J. G.; Alkim, T.; van Arem, B.	Infrastructure for Automated and Connected Driving: State of the Art and Future Research Directions	2018
Makridis, M.; Mattas, K.; Ciuffo, B.; Raposo, M. A.; Thiel, C.	Assessing the Impact of Connected and Automated Vehicles. A Freeway Scenario	2018
Serna, C. G.; Ruicheck, Y.	Classification of Traffic Signs: The European Dataset	2018
Van Brummelen, J.; O'Brien, M.; Gruyer, D.; Najjaran, H.	Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow	2018
Axelrod, C. W.	Autonomous Vehicles Meet Inhospitable Roadways	2019
Bracy, J. M. B.; Bao, K. Q.; Mundy, R. A.	Highway infrastructure and safety implications of AV technology in the motor carrier industry	2019
Gozdecki, J.; Loziak, K.; Dziech, A.; Chmiel, W.; Kwiecien, J.; Derkacz, J.; Kadluczka, P.	Communication system for Intelligent Road Signs network	2019
Guo, J.; Cheng, X.; Chen, Q.; Yang, Q.	Detection of occluded road signs on autonomous driving vehicles	2019
Lengyel, H.; Szalay, Z.	Test Scenario for Road Sign Recognition Systems with Special Attention on Traffic Sign Anomalies	2019
Liu, Y.; Tight, M.; Sun, Q.; Kang, R.	A systematic review: Road infrastructure requirement for Connected and Autonomous Vehicles (CAVs)	2019
Lu, X.; Madadi, B.; Farah, H.; Snelder, M.; Annema, J. A.; Arem, B. V.	Scenario-Based Infrastructure Requirements for Automated Driving	2019
Payerl, C.; Schmidt, D.; Hressnig, P.; Bernsteiner, S.	Validation of Automated Driving Functions Using Vehicle and Infrastructure Data	2019
Temel, D.; Chen, M. H.; AlRegib, G.	Traffic Sign Detection under Challenging Conditions: A Deeper Look Into Performance Variations and Spectral Characteristics	2019
Burghardt, T. E.; Mosböck, H.; Pashkevich, A.; Fiolic, M.	Horizontal road markings for human and machine vision	2020
Sayin, M. O.; Lin, C. W.; Kang, E.; Shiraishi, S.; Başar, T.	Reliable Smart Road Signs	2020
Storsæter, A. D.; Pitera, K.; McCormack, E. D.	The automated driver as a new road user	2020

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Ano</b>
Welde, Y.; Qiao, F.	Effects of Autonomous and Automated Vehicles on Stopping Sight Distance and Vertical Curves in Geometric Design	2020
Yu, X.; Marinov, M.	A study on recent developments and issues with obstacle detection systems for automated vehicles	2020
Gouda, M.; Mirza, J.; Weiß, J.; Castro, A. R.; El-Basyouny, K.	Octree-based point cloud simulation to assess the readiness of highway infrastructure for autonomous vehicles	2021
Saeed, T. U.; Alabi, B. N. T.; Labi, S.	Preparing Road Infrastructure to Accommodate Connected and Automated Vehicles: System-Level Perspective	2021

Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura 11 – Número de trabalhos selecionados por ano



Fonte: elaboração do autor (2021)

### 3.6 ANÁLISE DA LITERATURA COLETADA

Os artigos listados foram analisados do ponto de vista dos eixos de pesquisa relacionados inicialmente, a saber: 1) qual o impacto previsto do crescimento do uso dos veículos autônomos em termos das suas necessidades de infraestrutura e de como ela deverá ser preparada em ambientes rurais? 2) de que forma as rodovias podem ser classificadas em termos de quão adequadas são para o tráfego de veículos autônomos?

Em relação ao primeiro eixo de pesquisa, diversos artigos levantam essa questão e realizam previsões e propostas acerca de como a infraestrutura pode ser preparada para melhor se adequar às necessidades dos veículos autônomos. Nesse sentido, alguns artigos trazem a concepção de que a infraestrutura rodoviária pode ser classificada em dois grandes tipos: infraestrutura digital, que inclui os equipamentos e sensores instalados em pista com a finalidade de interagir com os veículos autônomos ou mesmo prover informação a esses de

forma ativa, utilizando dispositivos de comunicação; e infraestrutura física, que corresponde ao pavimento, sinalização horizontal e vertical, obras-de-arte, e todo o restante da infraestrutura que já existe atualmente (FARAH *et al.*, 2018; GOUDA *et al.*, 2021; LU *et al.*, 2019).

Observa-se diversos artigos que tratam de dispositivos, necessidades e propostas acerca da infraestrutura digital de suporte aos VA. Esse tipo de estrutura inclui, por exemplo, placas inteligentes (GOZDECKI *et al.*, 2019; SAYIN *et al.*, 2020) ou unidades de comunicação V2I instaladas às margens da rodovia (FARAH *et al.*, 2018; LU *et al.*, 2019; NITSCHKE, MOCANU, REINTHALER, 2014). Quando se trata da infraestrutura física, um tema mencionado frequentemente é a instalação de faixas ou rotas dedicadas exclusivamente aos VA (AXELROD, 2019; BRACY, BAO, MUNDI, 2019; CHEN *et al.*, 2017; FARAH *et al.*, 2018; SHLADOVER, 2009). Outro tema estudado com frequência nesse sentido são as diferenças do condutor humano para o VA em termos das restrições geométricas no momento do projeto da rodovia, principalmente em relação às distâncias de visibilidade e de parada necessárias (GOUDA *et al.*, 2021; STORSÆTER, PITERA, MCCORMACK, 2020; WELDE, QIAO, 2020).

Ainda sobre a classificação da infraestrutura como digital ou física, o trabalho de Saeed, Alabi e Labi (2021) propõe um esquema de classificação da infraestrutura rodoviária em quatro classes. A classe 1 corresponde às instalações de base, que também podem ser chamadas de infraestrutura física, que hoje compõem 100% da infraestrutura rodoviária e são os elementos utilizados no modelo atual de condução humana: pavimento, pontes, túneis, barreiras, sinalização etc. A classe 2 corresponde a novos tipos de infraestrutura física que surjam devido às necessidades operacionais dos VA, como as faixas exclusivas para VA, que podem ter características diferentes (como a largura reduzida) devido à exclusividade do tráfego de VA. A infraestrutura de classe 3 é o conjunto de infraestrutura dedicada aos veículos de níveis elevados de automação, como sensores instalados nos pavimentos ou nas placas, ou equipamentos dedicados à comunicação entre a infraestrutura e veículos conectados. A classe 4 corresponde à infraestrutura que terá as dimensões dos elementos de projeto reduzidas ou aumentadas em função da prevalência dos VA no fluxo de veículos, como larguras de faixa alteradas, pavimentos mais espessos apenas nos trilhos das rodas ou rodovias com quantidade reduzida de sinalização convencional.

Saeed, Alabi e Labi (2021) argumentam que a infraestrutura rodoviária irá evoluir para as classes mais elevadas conforme a taxa de utilização dos VA cresça em relação aos veículos convencionais, prevendo que a infraestrutura de classe 4, por exemplo, será dominante somente

quando os veículos autônomos de nível 5 forem predominantes. A proposta dos autores também aborda o segundo eixo de pesquisa: como as rodovias podem ser classificadas em termos da sua preparação para os VA. Utilizando-se da classificação proposta, as rodovias poderiam ser classificadas em termos do tipo de equipamento e de infraestrutura existente em cada trecho rodoviário. Esse tipo de classificação, no entanto, seria útil apenas nos estágios mais avançados da tecnologia, uma vez que se espera que todas as rodovias atualmente sejam consideradas de classe 1, e as rodovias de classe 2 sejam aquelas já com infraestrutura específica para os VA.

Nitsche, Mocanu e Reinthaler (2014) realizaram um estudo acerca dos requisitos para a infraestrutura rodoviária frente ao aumento do uso dos VA. Os objetivos do trabalho foram de investigar a interação entre os VA e a infraestrutura rodoviária, a fim de levantar possíveis fragilidades. O destaque para esse artigo está no fato de que ele estuda a infraestrutura de classe 1, conforme a classificação proposta por Saeed, Alabi e Labi (2021), ou seja, fatores relacionados à infraestrutura existente hoje e como ela pode ser adequada ou não aos VA. Para realizar o estudo, os autores realizaram revisão de literatura e aplicaram uma pesquisa *online* com 54 especialistas de áreas relacionadas ao tema.

O estudo de Nitsche, Mocanu e Reinthaler (2014) concluiu que os principais desafios relacionados à infraestrutura para os VA são os ambientes urbanos complexos, as áreas em fase de obras temporárias e a visibilidade prejudicada pelas condições climáticas. Para a manutenção do veículo na faixa, a visibilidade e a qualidade da sinalização horizontal são particularmente importantes, enquanto os sistemas de controle de velocidade requerem que as placas de limite de velocidade sejam claras e facilmente detectáveis. O estudo realizado aborda uma das principais problemáticas abordadas neste trabalho, que é a compatibilidade entre os VA e a infraestrutura rodoviária utilizada atualmente.

Em geral, como resultado da revisão sistemática realizada neste capítulo, têm-se que a observação realizada anteriormente – de que existe pouca pesquisa em termos de como preparar a infraestrutura para os VA – se mantém. Embora existam diversos artigos propondo novos tipos de infraestrutura e de equipamentos para atender aos VA e aos VAC, essas propostas normalmente se encaixam nas classes 2, 3 ou 4 do esquema de classificação da infraestrutura discutido anteriormente (SAEED; ALABI; LABI, 2021), ou seja, serão aplicáveis somente quando os VA representarem uma grande proporção dos veículos, justificando as modificações na infraestrutura e os investimentos em melhoria das estradas.

Pode-se observar, assim, uma tendência de que a pesquisa na área da infraestrutura rodoviária para os VA concentre-se em aspectos avançados desse tema, que provavelmente só serão adotados em ampla escala nos estágios mais tardios da transição entre o modelo

convencional e os VA. Existe atualmente uma demanda para que sejam realizados estudos acerca das necessidades dos VA em termos da infraestrutura viária de forma mais imediata, considerando que eles terão inicialmente de trafegar em rodovias convencionais, preparadas para os condutores humanos, e na possível ausência de equipamentos específicos para comunicação com os VA. Nesse espeque, lembrando também dos objetivos desta dissertação, destaca-se a afirmação de Storsæter, Pitera e McCormack (2020, p. 2, tradução nossa):

Atualmente, os fatores de projeto e manutenção continuam prejudicando a detecção de elementos de inventário, incluindo a oclusão, desgaste ou danos ocorridos nas placas e na sinalização horizontal, assim como a instalação imprópria desses elementos. Alguns desses problemas podem ser mitigados com a melhoria do *hardware* e *software* dos equipamentos de detecção automatizada. A outra peça do quebra-cabeças pode residir em realizar certas mudanças nos elementos rodoviários, como o tipo de tinta ou a escolha de textura, enquanto outras podem ser relacionadas a questões de manutenção como o controle de vegetação ou a repintura das faixas.

Ao longo prazo, espera-se que os elevados níveis de automação produzam condutores automatizados que sejam superiores aos condutores humanos. Apesar dessa expectativa, pouco esforço tem sido dedicado em assegurar que a infraestrutura rodoviária funcione para os novos condutores automatizados.<sup>11</sup>

Em relação à proporção de trabalhos nacionais e internacionais sobre os VA e sobre a infraestrutura rodoviária, durante todo o processo da revisão sistemática observou-se um baixo número de trabalhos nacionais sobre esse assunto. Não foram encontrados artigos científicos nacionais tratando da questão explorada nessa pesquisa, uma vez que os 11 resultados obtidos na base Scielo não tiveram relevância verificada. Através da busca na BDTD, foram encontradas 11 dissertações tratando de temas relacionados aos VA e infraestrutura rodoviária, porém essas, também, não tiveram a relevância científica confirmada. Disso, pode-se inferir que a pesquisa sobre VA no Brasil ainda é muito escassa, especialmente no tema abordado por esta dissertação (impacto na preparação da infraestrutura rodoviária). Os trabalhos nacionais que abordam os VA limitam-se a aspectos operacionais da tecnologia dos veículos, como problemas de visão computacional ou algoritmos de navegação. Pode-se citar uma dissertação que tratou dos impactos dos VA na capacidade das rodovias (KAPPLER, 2020), porém esse

---

<sup>11</sup> Texto original: “Currently, maintenance and design factors remain that hinder the detection of inventory elements, including occlusion of signs, fading or damage to road signs and markings as well as improper installation [...]. Some of these issues can be mitigated by improving the automated detection equipment’s hardware and software. The other piece of the puzzle might lie in making certain changes to roadway elements, such as paint type or texture choice, while others could be related to maintenance issues, e.g. trimming vegetation, or repainting road markings.

In the long term, higher levels of automation are widely expected to produce automated drivers that are superior to human drivers. Despite this expectation, little effort has been put into ensuring that the road infrastructure will work for the new automated road user.” (STORSÆTER; PITERA; MCCORMACK, 2020, p. 2)

trabalho, embora seja relacionado indiretamente à infraestrutura rodoviária, não aborda as perguntas levantadas nessa revisão.

Constatou-se, no entanto, que as bases de dados disponibilizadas no Brasil para pesquisa de artigos em português não incluem uma referência considerada importante na área, que é a revista TRANSPORTES, da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET). A revista é multidisciplinar no campo dos transportes e é uma das principais publicações nessa área no Brasil. Portanto, a revista poderia conter publicações que não foram incluídas na revisão, mas que fossem relevantes para o tema dessa pesquisa. A fim de verificar essa hipótese, realizou-se a leitura do título dos trabalhos publicados nessa revista entre 2017 e 2021, buscando trabalhos relacionados aos VA. Foram publicados pela revista, neste período, 240 artigos. Através da leitura de todos os títulos, não foi localizado nenhum artigo tratando diretamente sobre os veículos autônomos ou seus impactos nos aspectos relacionados aos transportes. Essa constatação, juntamente com os resultados obtidos na revisão sistemática, contribui para a hipótese de que, na área de transportes no Brasil, a temática dos VA ainda é, amplamente, inexplorada.

Assim, com base nos resultados verificados nesta revisão, bem como nas leituras realizadas durante a revisão não-estruturada apresentada nos capítulos anteriores, pode-se ter uma dimensão da pesquisa sobre a relação entre os VA e a infraestrutura rodoviária nacional e internacionalmente. No âmbito internacional, existem poucos artigos explorando a relação entre os VA e as necessidades ligadas à infraestrutura rodoviária física (rodovia, placas, geometria etc.), embora esse tema não seja completamente inexplorado e existam bastante artigos tratando da infraestrutura digital de comunicação com uma infraestrutura inteligente. Nacionalmente, o cenário é ainda mais escasso, não tendo sido identificado nenhum trabalho nacional que abordasse o tema da preparação da infraestrutura para os VA.

#### **4 MÉTODO PROPOSTO PARA A AVALIAÇÃO DA INTERPRETABILIDADE DAS RODOVIAS POR SISTEMAS DE VISÃO COMPUTACIONAL**

Conforme discutido nos itens iniciais desta dissertação, a tecnologia de automação veicular está avançando de forma acelerada nas últimas décadas. Embora o conceito de automóveis que trafeguem sem condutores não seja uma ideia nova, o desenvolvimento tecnológico recente nas áreas de sensores, algoritmos de inteligência artificial e veículos elétricos tem impulsionado essa visão, fazendo com que diversas empresas tenham protótipos avançados e já tenham acumulado uma significativa experiência no teste dos VA. Além disso, a mesma tecnologia também permite que as fabricantes disponibilizem aos seus clientes sistemas avançados de assistência à condução, que são um passo na direção da automação veicular, mas que ainda dependem da atenção de um condutor habilitado para garantir a segurança. De qualquer forma, a despeito dos desafios ainda existentes e das lacunas tecnológicas, os VA estão em crescimento, e as tecnologias de automação tenderão a ser mais frequente nos veículos nas próximas décadas.

É unânime na literatura analisada neste trabalho o entendimento de que o crescimento dos VA passará por um período de transição do sistema rodoviário como um todo, em que serão vistos, primeiramente, veículos nos níveis iniciais de automação; e somente após um período significativo é que os veículos nos níveis mais elevados deverão ser mais dominantes nas estradas. Frente a esse cenário, esta dissertação busca compreender, do ponto de vista da engenharia civil rodoviária, como as estradas podem ser preparadas para que não sejam um empecilho no desenvolvimento dos VA. Nesta discussão, muito tem se falado acerca da preparação ativa da infraestrutura para suportar os VA; através, por exemplo, da instalação de equipamentos de comunicação V2I. Porém, frente à grande dimensão da malha rodoviária nacional e às dificuldades já enfrentadas atualmente para a manutenção da condição das rodovias, esta dissertação busca explorar as relações entre a necessidade dos VA relacionadas à interpretação da sinalização e as rodovias existentes atualmente.

Assim, para que os VA possam trafegar com segurança nas rodovias, supõe-se que eles deverão ter a capacidade de ler as rodovias como elas existem hoje, já que a dependência da preparação ativa da infraestrutura para o seu trânsito deverá atrasar em muito, ou até impossibilitar, a ampla adoção dos VA como alternativa viável para o transporte rodoviário. A instalação de equipamentos específicos para a comunicação com os VA nas rodovias, nesse cenário, deverá ser abordada quando esses veículos forem amplamente adotados pelos usuários

da rodovia, momento no qual haverá maior benefício a toda a sociedade em se potencializar o trânsito dos VA.

Se questiona, então, se as rodovias – e, mais especificamente, se a sinalização viária – existente são ou não adequadas para o tráfego dos VA. Para aprofundar esse questionamento, exploramos nos capítulos anteriores as necessidades dos VA em relação à rodovia e as formas com que esses veículos realizam a leitura e a compreensão do ambiente ao seu entorno. Como resultado dessas discussões, se propõe outra suposição: a de que o tráfego seguro dos VA nas rodovias atuais está diretamente associado à sua capacidade de visualizar e interpretar a sinalização viária.

Para realizar a leitura da sinalização viária é necessário identificar as cores e as formas de cada sinalização. Assim, mesmo que haja diversas tecnologias para a percepção veicular (LIDAR, RADAR, sensores ultrassônicos, comunicação V2I etc.), a interpretação da sinalização existente ainda depende fortemente das câmeras. Os algoritmos de VC, portanto, são a principal peça dos VA para ler a rodovia. Esses algoritmos, no entanto, possuem diversas fragilidades associadas à condição de visibilidade da sinalização, sendo pouco eficazes em situações de chuva, neblina ou qualquer outra obstrução à visão da sinalização.

Assim, a capacidade de interpretação da rodovia, considerada como sendo a principal medida da possibilidade de o VA trafegar com segurança em uma determinada rodovia, depende não somente dos algoritmos e sensores utilizados no veículo, mas também das condições de visibilidade da sinalização. Embora essas condições possam ser limitadas por situações climáticas, também existem situações pertinentes à infraestrutura em si – como o material utilizado, a condição das placas, a degradação ao longo do tempo, sua posição em relação ao veículo ou a existência de obstruções à visualização – que interferem na capacidade do VA visualizar a sinalização viária.

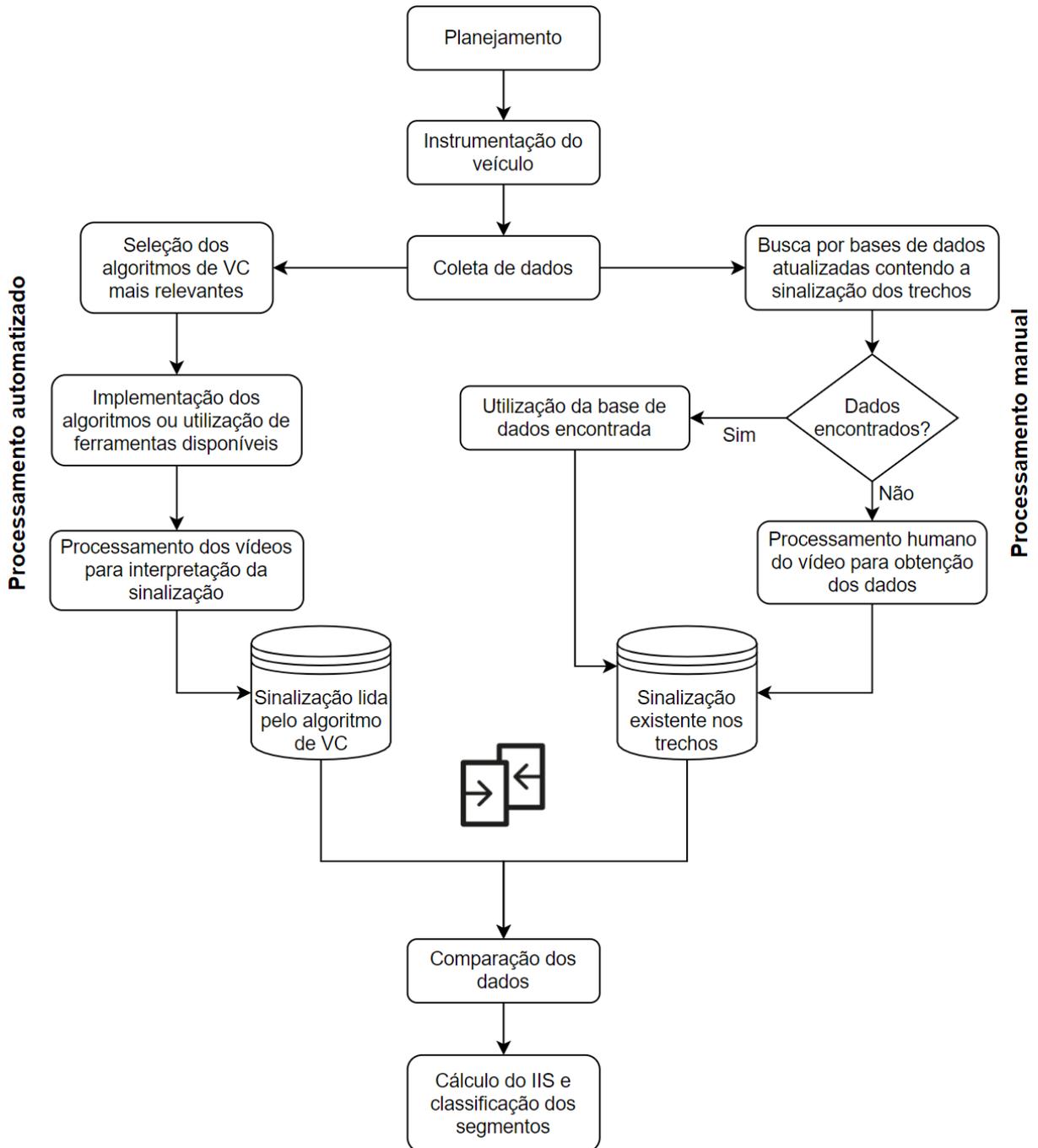
Dessa forma, se propõe um método de aplicação prática para avaliar o quão visível é – para um VA – a sinalização de um determinado trecho de rodovia e, conseqüentemente, o quão provável é que os VA possam trafegar com segurança nesse trecho. Essa medida é denominada de “interpretabilidade da rodovia por sistemas de visão computacional”, e se propõe, adiante, um processo para classificar essa interpretabilidade através de um índice numérico.

Os fatores que determinam a probabilidade de um algoritmo de VC ter sucesso na leitura de um determinado cenário são complexos e não são completamente conhecidos. Por esse motivo, o método proposto toma como base a aplicação prática desses algoritmos na rodovia em condições climáticas favoráveis, e a comparação dos resultados obtidos pelo

algoritmo com bases de dados que informem a condição correta existente da sinalização viária no trecho. Essa comparação resulta no cálculo de algumas variáveis que, combinadas, resultam em um índice que se denomina “Índice de Interpretabilidade da Sinalização” (IIS). O IIS, portanto, é um valor que classifica a probabilidade de que um VA poderá interpretar corretamente um determinado trecho de rodovia, e pode ser utilizado para avaliar a condição da infraestrutura rodoviária e identificar possíveis ações para melhorar a condição da sinalização do ponto de vista do suporte ao tráfego dos VA.

Seguindo essa filosofia, se propõe um processo que inicia com um planejamento e instrumentação de um veículo, passa pela coleta de dados com o veículo instrumentado e pelo processamento manual e automatizado dos dados da rodovia, e finaliza com a comparação entre duas bases de dados: uma representando a sinalização existente no trecho rodoviário, e outra representando a sinalização conforme interpretada pelo sistema automatizado. O processo proposto está exposto na Figura 12, e as etapas serão explicadas na sequência.

Figura 12 - Fluxograma das etapas propostas para aplicação do método para avaliação de trechos



Fonte: Elaboração do autor (2021)

#### 4.1 PLANEJAMENTO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO

A primeira etapa para aplicação do método para avaliação dos trechos rodoviários através do IIS é o planejamento do estudo a ser realizado. Nessa etapa, devem ser definidos parâmetros importantes como: o trecho a ser analisado, o trajeto que será percorrido pelo veículo, o tempo necessário para a coleta, dentre outros parâmetros necessários para a aplicação prática. É importante considerar, nessa etapa, que o método proposto visa classificar a

sinalização do trecho rodoviário em termos da sua interpretabilidade. Por esse motivo, objetiva-se que os fatores que possam influenciar na leitura da sinalização pelos algoritmos sejam ao máximo limitados para aqueles fatores devidos à infraestrutura em si, e não devidos ao veículo, equipamento ou algoritmo utilizado, clima ou outros fatores temporais. Assim, na fase de planejamento da coleta de dados, deve-se considerar que a coleta deverá ser realizada em clima e condições de visibilidade favoráveis (pista seca, pouca incidência solar direta na câmera, ausência de neblina, velocidade constante etc.). Destaca-se que a aplicação do método durante a noite também é possível, sendo nesse caso recomendado que a filmagem seja realizada com câmera adequada para a visão noturna, que o algoritmo utilizado para VC nas etapas posteriores tenha a capacidade de interpretar imagens noturnas e que o clima durante a filmagem também não apresente condições de visibilidade reduzida.

#### 4.2 INSTRUMENTAÇÃO DO VEÍCULO

Deve-se realizar a instrumentação de um veículo para a coleta de dados, utilizando câmeras em configurações semelhantes às utilizadas pelos VA. Embora os veículos não sejam uniformes no modelo das câmeras utilizadas ou na posição de sua instalação, deve-se adotar uma configuração que represente os casos mais comuns. Para a possibilidade de processamento dos dados e comparação com a sinalização existente, também é necessário que os vídeos coletados sejam georreferenciados, ou seja, que o equipamento colete dados de GPS juntamente com o vídeo, possibilitando a localização de cada item de sinalização no espaço.

Os equipamentos utilizados e a sua forma de instalação no veículo devem ser compatíveis com o algoritmo de visão computacional que será utilizado para a análise. Assim, deve-se verificar quais são as necessidades do algoritmo utilizado em termos da resolução da câmera, posição da câmera no veículo e seu ângulo de visão, quantidade de quadros por segundo, além de outras restrições ambientais e temporais que possam existir para o algoritmo utilizado.

#### 4.3 COLETA DE DADOS

A fase de coleta de dados deve ser realizada em condições controladas, nas quais a interpretação da sinalização seja favorável. Com isso, pretende-se que a condição da sinalização em si seja determinante para a sua interpretação, e não as condições climáticas ou temporais do momento da coleta de dados. Para isso, primeiramente, a coleta deve ser realizada durante o

dia, em clima favorável à visibilidade da sinalização. Ou seja, não deve haver obstruções à visão devidas ao clima, como neblina, chuva, neve etc. Em relação ao horário, deve-se realizar a coleta em horário nos quais o sol esteja a um ângulo elevado em relação ao horizonte, para evitar que haja problemas de incidência solar direta na câmera ou reflexos na pista. A pista deve estar seca, de forma a não haver reflexos da luz solar ou de outros veículos. A velocidade de tráfego do veículo de coleta de dados deve ser o mais constante possível, e próxima da velocidade operacional da rodovia. Os faróis do veículo deverão estar acesos.

Nessas condições devem ser coletados os vídeos georreferenciados, de forma que o trecho que se quer analisar seja filmado em sua totalidade, e os quadros do vídeo coletado possam ser automaticamente relacionados com a sua posição geográfica.

#### 4.4 PROCESSAMENTO AUTOMATIZADO

Após coleta dos dados, deverá ser realizada a etapa de execução dos algoritmos de VC e análise automatizada da sinalização. Isso deve ser feito para a sinalização vertical e horizontal, de acordo com critérios específicos. Para a sinalização vertical, os algoritmos devem realizar duas etapas: detectar a existência da placa em uma determinada localização e identificar o tipo da placa existente (classificação). Isso deve ser realizado para a sinalização vertical de advertência e de regulamentação.

Para a sinalização horizontal, devido a sua natureza contínua, devem ser estabelecidos casos de análise, que são quadros selecionados a um intervalo constante de distância na pista. O intervalo para avaliação da sinalização horizontal pode ser parametrizado no planejamento da análise, sendo recomendado valores entre 20 e 100 metros. Cada caso de análise, portanto, será representado pelo quadro selecionado da filmagem realizada. Para cada quadro, o algoritmo deverá identificar a posição das linhas da sinalização horizontal e classificar o seu tipo. Será priorizada a detecção dos bordos da pista trafegada, ou seja, das duas linhas imediatamente à esquerda e à direita do veículo.

Em relação aos algoritmos utilizados para essa análise, deverão ser selecionados os algoritmos mais comuns na indústria dos VA. Embora existam diversas alternativas a serem adotadas para essa análise, não devem ser utilizados os algoritmos de ponta na área de VC, caso eles não sejam de fato utilizados pelos VA, uma vez que existem restrições acerca da aplicabilidade dos algoritmos de VC nos veículos. Pode-se utilizar mais de um algoritmo para realizar essa tarefa, devendo, nesse caso, ser realizado o cálculo do índice de forma específica para cada algoritmo utilizado.

#### 4.5 PROCESSAMENTO MANUAL

O processamento manual das imagens coletadas visa obter os dados de referência para comparação dos resultados obtidos pelos algoritmos adotados. Para realizar isso, primeiramente, deve-se verificar a disponibilidade de bases de dados georreferenciadas que indiquem a composição da sinalização viária do trecho em análise. Nesse ponto, é importante que a base de dados seja recente e que ela represente a situação “*as built*” da sinalização viária no momento da análise, e não a sinalização projetada para o trecho, por exemplo. Caso se possua essa base de dados, deve-se utilizá-la de forma a obter os dados de referência para a sinalização existente no trecho. A cautela para a seleção da base de dados é necessária pois os fatores que impedem a leitura da sinalização pelos algoritmos são questões temporais como o desgaste, vandalismo, crescimento de vegetação, dentre outros.

No entanto, caso tal base de dados não esteja disponível, deve-se realizar uma análise manual dos vídeos coletados (os mesmos vídeos que são processados pelos algoritmos de VC) de forma a detectar e classificar a sinalização viária do trecho em análise, construindo assim a base de dados de referência. Para fazer esse processamento, um operador humano deve analisar os mesmos dados de entrada dos algoritmos para realizar a detecção e classificação da sinalização. As tarefas que deverão ser efetuadas pelo operador humano são: para a sinalização vertical, identificar os pontos onde existem placas e indicar o tipo da placa existente no local; para a sinalização horizontal, analisar os mesmos casos de estudo analisados pelos algoritmos, localizar as faixas existentes na imagem e classificar o seu tipo. A classificação da sinalização, tanto vertical quanto horizontal, deve ser realizada conforme os manuais do CONTRAN (2007a, 2007b, 2007c).

#### 4.6 CÁLCULO DO IIS

O cálculo proposto para o IIS inicia com o cálculo de uma lista de variáveis, que representam quantitativos do desempenho dos algoritmos em função da situação real da rodovia. Essas variáveis são obtidas através da comparação da base de dados de referência com a base de dados obtida pelos algoritmos. Durante essa comparação entre as bases de dados, no que tange à análise da sinalização vertical, se propõe uma classificação dos tipos de sinalização vertical em função do nível do risco à segurança associado à não-detecção da placa. Com essa classificação, também se expressa a filosofia do método de classificação, que é proposto a partir do ponto de vista da infraestrutura rodoviária e da garantia da segurança do tráfego dos VA.

Em função das bases de dados e da classificação adotada para a sinalização vertical, obtêm-se os valores para as variáveis de entrada. Após isso, realiza-se uma ponderação dos valores obtidos, momento no qual são utilizados pesos para representar a importância de cada variável no valor final do índice. Os pesos a serem utilizados podem ser configurados priorizando as variáveis em função dos objetivos específicos da análise. Em uma aplicação prática do método, cabe a aplicação de métodos de pesquisa com profissionais e especialistas da área a fim de levantar a importância dos critérios e os pesos mais adequados para cada variável. A mesma observação também vale para a classificação das placas, que pode ser ajustada em função dos objetivos da aplicação do método.

#### **4.6.1 Divisão dos tipos de sinalização vertical em classes de risco**

A partir da motivação da segurança viária, portanto, adota-se, na construção do presente método, uma estratégia de priorização dos possíveis erros durante a operação dos VA que gerem maior risco à segurança viária. Neste âmbito, por exemplo, a placa “permitido estacionar” não tem a mesma importância que a placa “proibido ultrapassar”, uma vez que o possível risco associado à falha na detecção da primeira não se compara ao risco associado à falha na detecção da segunda.

Nessa base, se propõe a classificação da sinalização vertical em classes de risco (CR). Para as placas de regulamentação, são estabelecidas cinco classes: da classe de risco zero (CR0), para a qual não existe risco associado à falha na detecção da placa, à CR quatro (CR4) para a qual a correta detecção da placa é absolutamente essencial para a segurança. Para a sinalização de advertência, adota-se uma classificação com duas classes: placas de advertência críticas (C) ou não-críticas (NC). As placas de advertência críticas são aquelas que podem exigir alguma ação imediata do veículo, como o aviso de final de faixa ou de interseção adiante. Não são críticas as placas de advertência que não exijam nenhuma ação específica do veículo, como “largura máxima permitida”.

Nota-se que, da forma com que a classificação da sinalização de advertência foi proposta, se está adotando a premissa de que o veículo autônomo já saberá, se antemão, o traçado da rodovia que está percorrendo e qual a sua posição atual. Essa suposição parte da constatação de que o traçado das rodovias é uma característica raramente alterada ao longo da sua vida, e de que já existem sistemas de navegação com a capacidade de saber onde o veículo está localizado na rodovia e qual o traçado a frente. Caso essa suposição seja descartada e o veículo autônomo tenha a necessidade de conhecer o traçado da rodovia através da sinalização



falha na detecção da sinalização vertical ou horizontal pelo algoritmo de detecção automatizada. Para a sinalização vertical, as variáveis são estabelecidas de acordo com a classificação de risco. Para a sinalização horizontal, são criadas variáveis para a situação do erro na identificação do tipo da faixa entre pistas em mesmo sentido e pistas em sentidos opostos (devido à diferença no risco associado), além de uma variável para representar um ponto crítico na leitura da faixa horizontal: a consideração da possibilidade, ou não, de ultrapassar, em função do tipo da faixa.

A avaliação da sinalização horizontal, conforme comentado anteriormente, é feita em função de quadros de análise, enquanto a avaliação da sinalização vertical é feita em função do número de placas existentes no trecho. A possibilidade de falsos positivos indicados pelo algoritmo é considerada em uma situação na qual essa ocorrência geraria risco à segurança: caso o veículo identifique uma placa de limite de velocidade (tipo R-19) não-existente, o que poderia induzir o veículo a entender que a velocidade do trecho é diferente da real.

Com base nas situações mencionadas acima, portanto, considerando a comparação entre a base de dados de referência e a base de dados obtida pelo algoritmo de VC, são propostas as seguintes variáveis referentes à interpretabilidade da sinalização vertical:

- **Proporção de falhas na identificação das placas de regulamentação da CR  $i$  ( $F_{CRI}$ ):** número de placas de regulamentação da CR  $i$  que não foram corretamente identificadas (não detectadas ou com erro na classificação), chamado de "número de falhas na detecção de placas da CR  $i$ " ( $NF_{CRI}$ ) dividido pelo número total de placas de regulamentação ( $NP_R$ ) no trecho analisado (caso não haja placas de regulamentação no trecho,  $F_{CRI} = 0$ );
- **Proporção de falhas na identificação de placas de advertência críticas ( $F_{AC}$ ):** número de placas de advertência consideradas críticas que não foram corretamente identificadas (não detectadas ou com erro na classificação), chamado de "número de falhas na detecção de placas de advertência críticas" ( $NF_{AC}$ ) dividido pelo número total de placas de advertência consideradas críticas ( $NP_{AC}$ ) no trecho analisado (caso não haja placas de advertência críticas no trecho,  $F_{AC} = 0$ );
- **Proporção de falsos positivos de limite de velocidade por extensão ( $T_{FP}$ ):** número total de falsos-positivos obtidos no algoritmo de visão computacional do tipo R-19: "Velocidade máxima permitida", dividido pela extensão total do trecho analisado, em km;

Para obtenção do valor do índice referente à sinalização vertical ( $IIS_V$ ) para um determinado trecho rodoviário, portanto, realiza-se uma soma ponderada dos valores obtidos para cada variável. Nesse processo de soma ponderada os valores obtidos para cada variável são multiplicados pelo peso correspondente à variável e somados. Os pesos adotados para esse processo foram estimados pelo autor através da consideração do risco associado a cada um dos tipos de falha representados pelas variáveis utilizadas, e da atribuição de pesos maiores para as falhas que possam gerar mais risco à segurança.

Uma vez que as variáveis representam quantitativos de falha na detecção da sinalização, o valor da soma é subtraído de um valor inicial de referência, de tal forma que os maiores valores representem rodovias com menos ocorrências de falhas e, portanto, em melhores condições. O valor obtido é então dividido por outro valor fixo de referência, cuja finalidade é fazer com que o valor final do índice seja uma pontuação com valores aproximados entre 0 e 10. Para a sinalização vertical, esse processo está expresso na equação 1.

$$IIS_V = \frac{15 - (F_{CR1} + 4F_{CR2} + 6F_{CR3} + 13F_{CR4} + 6F_{AC} + 6T_{FP})}{1,5} \quad (1)$$

O mesmo processo descrito anteriormente é também aplicado para a sinalização horizontal. Nesse caso, as variáveis utilizadas são:

- **Proporção de falhas na identificação das linhas horizontais entre faixas do mesmo sentido ( $F_{HMS}$ ):** número de quadros nos quais houve um erro na identificação do tipo de linha horizontal entre duas faixas de mesmo sentido, dividido pelo número total de quadros de análise da sinalização horizontal no trecho analisado;
- **Proporção de falhas na identificação das linhas horizontais entre faixas de sentidos opostos ( $F_{HSO}$ ):** número de quadros nos quais houve um erro na identificação do tipo de linha horizontal entre duas faixas de sentidos opostos, dividido pelo número total de quadros de análise da sinalização horizontal no trecho rodoviário;
- **Proporção de erros críticos na detecção da sinalização horizontal ( $E_C$ ):** número de quadros de análise para os quais a sinalização identificada pelo algoritmo de visão computacional indicou a possibilidade de ultrapassagem (com linha seccionada), porém a sinalização real da rodovia proíbe a ultrapassagem

(linha contínua), dividido pelo número total de quadros de análise da sinalização horizontal no trecho rodoviário.

O cálculo do índice referente à sinalização horizontal ( $IIS_H$ ) é representado pela equação 2.

$$IIS_H = 10 - (0,5F_{HMS} + 3F_{HSO} + 7E_C) \quad (2)$$

O valor final para o IIS de um determinado trecho rodoviário é então adotado como a média aritmética dos valores obtidos para os índices  $IIS_V$  e  $IIS_H$  (equação 3).

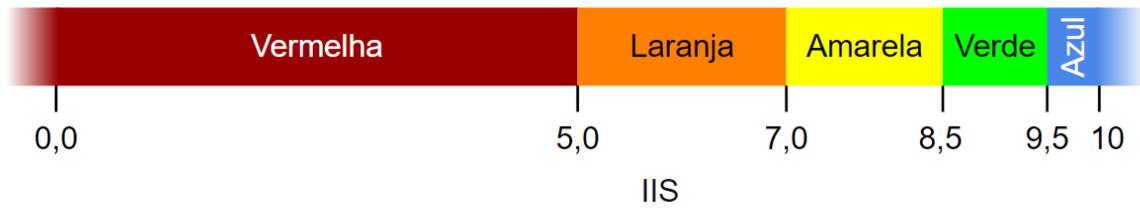
$$IIS = \frac{IIS_V + IIS_H}{2} \quad (3)$$

As constantes nas equações 1 e 2 representam os valores de referência que foram estimados durante o processo de pesquisa realizado nesse trabalho. Os valores para os pesos adotados para cada variável, bem como os valores de referência para a pontuação (15, 1,5, 10) podem ser estimados através de metodologias específicas de pesquisa e de determinação de pesos para variáveis. Podem ser especialmente úteis, neste tipo de aplicação, as metodologias multicritério de apoio à decisão, como a *Analytic Hierarchy Process* (AHP). As análises para determinação dos pesos também podem ser realizadas para contextos específicos, podendo determinados critérios serem mais ou menos importantes em determinadas aplicações. Assim, os valores constantes presentes nas equações 1, 2 e 3 são propostas elaboradas a partir dos dados observados durante esta pesquisa, podendo ser ajustadas em função de aplicações específicas ou em função de estudos mais aprofundados sobre o tema.

#### 4.7 AVALIAÇÃO DOS TRECHOS ANALISADOS

A última etapa de aplicação do método proposto é a avaliação dos trechos analisados. Trata-se da análise da pontuação resultante em cada trecho analisado. Esta análise pode ser feita diretamente pelo resultado do valor resultante do IIS. Além disso, também se propõe uma escala de faixas de interpretabilidade, apresentada na Figura 13, que podem auxiliar a classificar rapidamente os trechos com melhor interpretabilidade. As equações para o IIS foram ajustadas para que os resultados sejam situados entre zero e dez. No entanto, a depender da composição da sinalização do trecho viário, o valor exato resultante pode extrapolar esses limites. Caso o resultado do IIS para um determinado trecho seja exatamente o valor considerado como limite entre as faixas, considera-se a melhor faixa.

Figura 13 – Faixas de interpretabilidade, em função do resultado obtido para o IIS



Fonte: elaboração do autor (2021)

Como resultado desse processo, portanto, serão identificados trechos mais críticos em termos da interpretabilidade da sinalização, o que permitirá a análise dos fatores que levam a essa pontuação, bem como a priorização de investimentos para manutenção da sinalização viária. Além disso, a avaliação dos trechos também poderá ser utilizada, no futuro, para identificar trechos em que o tráfego dos VA é seguro, informação que poderá ser utilizada também para fins regulatórios, certificando determinadas rodovias, por exemplo, como seguras para o tráfego de VA.

## 5 APLICAÇÃO PRÁTICA EM RODOVIAS FEDERAIS E ESTADUAIS NO ESTADO DE SANTA CATARINA

O método proposto para a avaliação da interpretabilidade da sinalização viária para veículos autônomos por meio do IIS, apresentado no capítulo anterior, foi aplicado em trechos de rodovias federais e estaduais localizados no estado de Santa Catarina. Essa aplicação prática tem dois objetivos principais. Primeiramente, se busca verificar o funcionamento do método proposto e realizar ajustes em sua concepção com base no resultado observado nos casos práticos (na prática, o método foi desenvolvido em paralelo com a aplicação prática, de forma que os resultados observados foram utilizados para moldar a proposta). Outro objetivo foi o de avaliar a sinalização viária existente nos trechos em termos da sua interpretabilidade.

Foram avaliados, nessa aplicação prática, 14 segmentos rodoviários de extensões distintas, que somam 235,6 km. O processo realizado de análise foi o seguinte: primeiramente, foram obtidos vídeos gravados com um veículo instrumentado, de acordo com o proposto no capítulo anterior. Os vídeos foram cedidos pelo Laboratório de Transportes e Logística, da Universidade Federal de Santa Catarina (LabTrans/UFSC). As imagens de cada trecho foram, então, processadas na plataforma *Road Object Recognizer*, também desenvolvida e mantida pelo LabTrans/UFSC. O acesso à ferramenta e aos vídeos foram cedidos de forma específica para esta pesquisa, pelo LabTrans/UFSC. Na plataforma, são utilizadas diferentes técnicas para realizar diferentes tarefas no processamento automatizado do vídeo. Para a detecção da presença das placas se utiliza uma rede neural; a classificação do tipo de cada placa é realizada por meio de um algoritmo de correspondência de modelos (*template matching*); e a identificação e classificação da sinalização horizontal é realizada por um algoritmo de processamento de imagens. Como resultado do processamento automatizado dos vídeos, foram obtidos registros que indicavam: 1) a posição geográfica de cada placa, 2) o tipo identificado da placa, de acordo com os manuais do CONTRAN e 3) o tipo identificado da faixa horizontal imediatamente à esquerda do veículo a cada 20 metros.

Após o processamento automatizado dos vídeos, que simula a visão computacional dos veículos autônomos, realizou-se um processamento manual das imagens coletadas, a fim de obter a base de dados da sinalização existente na realidade. Para realizar esse processamento, foram realizadas, para cada vídeo, as seguintes etapas: 1) cadastro de todas as placas que ocorrem no vídeo e da sua posição geográfica, obtida a partir do selo de tempo (*timestamp*) do quadro em que a placa está mais visível e dos dados geográficos do vídeo (os vídeos são georreferenciados). 2) Observação dos mesmos quadros analisados pelo algoritmo para

identificação do tipo da sinalização horizontal existente no quadro analisado. Como resultado desse processamento manual, foram obtidas as informações no mesmo formato que o obtido pelo processamento automatizado.

Finalmente, através da comparação dos resultados obtidos em cada base de dados, foram realizadas as comparações para obter o valor das variáveis de referência ( $F_{CR1}$ ,  $F_{CR2}$ ,  $F_{CR3}$ ,  $F_{CR4}$ ,  $F_{AC}$ ,  $T_{FP}$ ,  $F_{HMS}$ ,  $F_{HSO}$  e  $E_C$ ) para cada trecho. Finalmente, a partir dos valores obtidos, foram calculados os índices  $IIS_V$ ,  $IIS_H$  e  $IIS$ , conforme equações 1, 2 e 3, respectivamente.

### 5.1 TRECHOS ANALISADOS

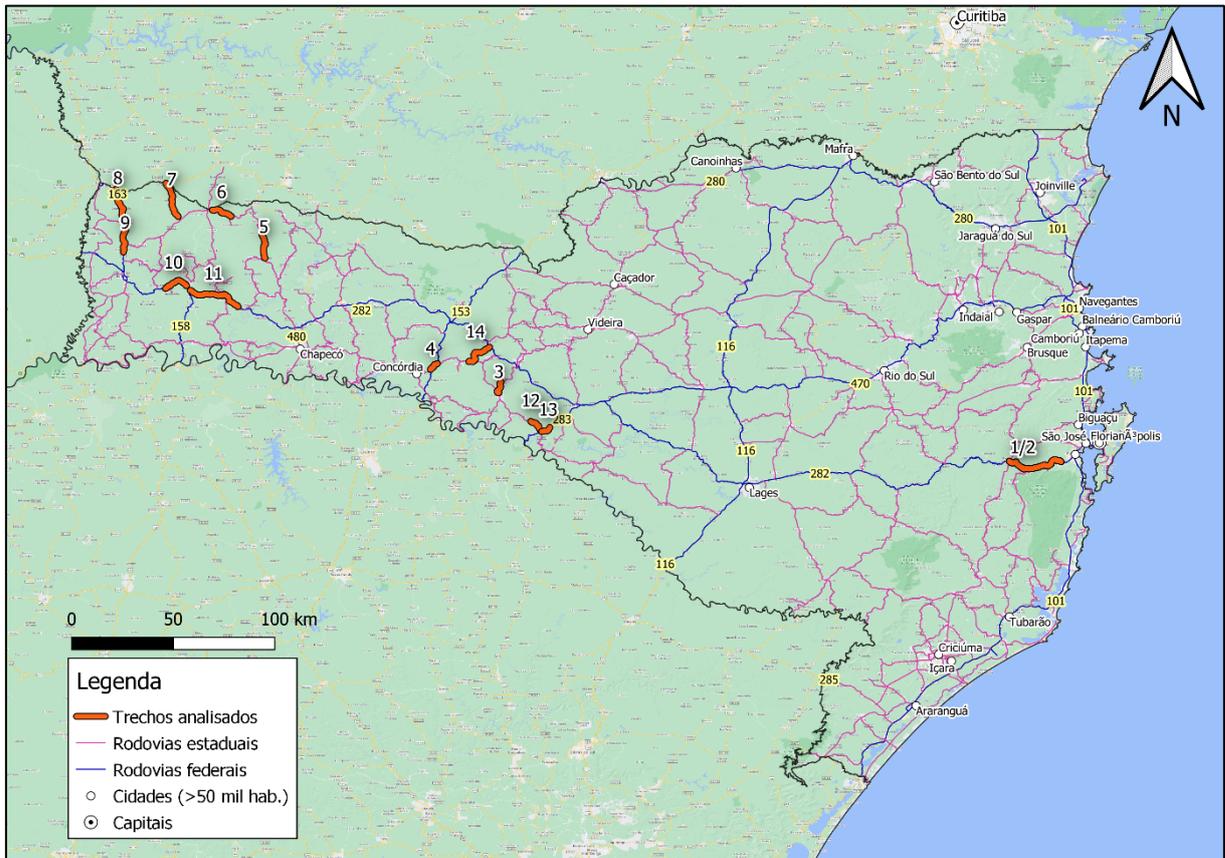
Os trechos selecionados para a análise são rodovias federais e estaduais no estado de Santa Catarina, que possuem extensões variando entre 5,2 km e 34,3 km, conforme detalhamento no Quadro 7. Os trechos estão geograficamente distribuídos por SC (Figura 14), com a maioria deles localizada na região central e oeste do estado.

Quadro 7 – Resumo dos trechos analisados

#	Município	Rodovia	km inicial	km final	Extensão (km)
1	Rancho Queimado	BR-282	23+800	58+100	34,3
2	Rancho Queimado	BR-282	58+200	24+000	34,2
3	Capinzal	SC-150	105+600	113+700	8,1
4	Concórdia	BR-153	90+000	95+200	5,2
5	Formosa do Sul	SC-157	23+200	39+100	15,9
6	Campo Erê	BR-158	28+100	16+300	11,8
7	Palma Sola	SC-161	0+200	20+700	20,5
8	São José do Cedro	BR-163	105+300	123+200	17,9
9	Guaraciaba	BR-163	83+000	95+700	12,7
10	Maravilha	BR-282	605+500	619+300	13,8
11	Pinhalzinho	BR-282	571+500	601+500	30
12	Celso Ramos	BR-283	38+000	29+300	8,7
13	Celso Ramos	BR-283	29+300	23+900	5,4
14	Jaborá	SC-355	131+500	148+600	17,1
				<b>TOTAL</b>	<b>235,6</b>

Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura 14 – Localização geográfica dos trechos analisados



Fonte: elaboração do autor (2021)

Em relação à sinalização existente nos trechos, o número de placas existentes em cada trecho (detalhada no Quadro 8) é variável, bem como a distribuição do tipo das placas existentes. Isso ocorre pois os trechos estão localizados em regiões distintas, estão sob jurisdições diferentes (federal e estadual) e possuem extensões e geometrias distintas entre si. A sinalização horizontal é quantificada apenas pelo número de quadros analisados, que é determinado pela extensão do trecho, uma vez que os quadros são extraídos com distâncias constantes de 20m entre si.

Quadro 8 – Número de placas e de quadros analisados em cada trecho

#	Número de placas de regulamentação por classe de risco						Número de placas de advertência			Quadros analisados (sin. horizontal)
	CR0	CR1	CR2	CR3	CR4	$NP_R$	NC	$NP_{AC}$	Total	
1	0	4	0	2	78	84	66	12	78	1679
2	0	0	0	3	81	84	60	9	69	1674
3	0	0	0	0	8	8	6	0	6	395
4	0	1	0	2	14	17	10	2	12	259
5	0	0	0	0	10	10	7	0	7	771
6	0	0	0	0	7	7	18	0	18	576
7	0	0	0	0	15	15	11	0	11	1005
8	0	1	0	1	6	8	13	3	16	874
9	0	0	0	2	8	10	12	2	14	620
10	0	0	0	1	23	24	4	6	10	675
11	0	4	0	6	41	51	18	12	30	1463
12	0	0	0	0	8	8	2	0	2	424
13	0	0	0	0	8	8	1	3	4	263
14	0	0	0	1	20	21	42	8	50	836

CRi: classe de risco i.  $NP_R$ : número de placas de regulamentação. NC: não críticas.  $NP_{AC}$ : número de placas de advertência críticas.

Fonte: elaboração do autor (2021)

## 5.2 RESULTADOS

Através da comparação dos dados de referência, obtidos por processamento manual, com os dados obtidos por processamento automatizado, pelos algoritmos de visão computacional, foi possível identificar o número de falhas na detecção ou na classificação da sinalização, associados a cada tipo de sinalização vertical ou horizontal, bem como o número de falsos positivos da placa R-19: “Velocidade máxima permitida”.

Quadro 9 – Número de falhas na identificação da sinalização

#	Sin. de regulamentação (falhas)					Sin. advertência (falhas)		Falsos posit. R-19	Sin. horizontal (falhas)		
	$NF_{CR1}$	$NF_{CR2}$	$NF_{CR3}$	$NF_{CR4}$	$NF_{CR4}$	$NF_{NC}$	$NF_{AC}$		Mesmo sentido	Sentidos opostos	Erros críticos
1	0	4	0	2	30	65	11	11	147	1158	55
2	0	0	0	3	28	55	9	10	0	1342	174
3	0	0	0	0	4	5	0	1	3	349	23
4	0	0	0	1	3	8	2	0	18	223	17
5	0	0	0	0	0	6	0	2	0	709	107
6	0	0	0	0	3	16	0	8	0	435	76
7	0	0	0	0	2	10	0	3	8	798	88
8	0	1	0	1	3	13	3	0	87	617	359
9	0	0	0	2	4	12	2	1	0	569	432

#	Sin. de regulamentação (falhas)					Sin. advertência (falhas)		Falsos posit. R-19	Sin. horizontal (falhas)		
	$NF_{CR1}$	$NF_{CR2}$	$NF_{CR3}$	$NF_{CR4}$	$NF_{CR4}$	$NF_{NC}$	$NF_{AC}$		Mesmo sentido	Sentidos opostos	Erros críticos
10	0	0	0	1	10	2	5	6	0	559	85
11	0	3	0	6	17	12	8	2	228	1023	179
12	0	0	0	0	8	2	0	0	0	349	43
13	0	0	0	0	2	1	2	1	0	179	46
14	0	0	0	1	5	33	5	8	6	624	137

$NF_{CRi}$ : número de falhas na detecção de placas da classe de risco i.  $NF_{ANC}$ : número de falhas na detecção de placas de advertência não críticas.  $NF_{AC}$ : número de falhas na detecção de placas de advertência críticas.

Fonte: elaboração do autor (2021)

A partir do número observado de falhas na detecção da sinalização, apresentado no Quadro 9, em conjunto com os totais de sinalização de cada trecho apresentados no Quadro 8, e considerando também a extensão dos trechos, apresentada no Quadro 7, pode-se então calcular as variáveis de referência para o cálculo do *IIS*, conforme descritas no item 4.6.2. O resultado para as variáveis está apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 – Variáveis de referência

#	Vertical de regulamentação				Vertical de advertência	Falsos positivos	Sinalização horizontal		
	$F_{CR1}$	$F_{CR2}$	$F_{CR3}$	$F_{CR4}$	$F_{AC}$	$T_{FP}$	$F_{HMS}$	$F_{HSO}$	$E_C$
1	0,05	0,00	0,02	0,36	0,92	0,32	0,09	0,69	0,03
2	0,00	0,00	0,04	0,33	1,00	0,29	0,00	0,80	0,10
3	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,12	0,01	0,88	0,06
4	0,00	0,00	0,06	0,18	1,00	0,00	0,07	0,86	0,07
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,92	0,14
6	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,68	0,00	0,76	0,13
7	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,15	0,01	0,79	0,09
8	0,13	0,00	0,13	0,38	1,00	0,00	0,10	0,71	0,41
9	0,00	0,00	0,20	0,40	1,00	0,08	0,00	0,92	0,70
10	0,00	0,00	0,04	0,42	0,83	0,43	0,00	0,83	0,13
11	0,06	0,00	0,12	0,33	0,67	0,07	0,16	0,70	0,12
12	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,82	0,10
13	0,00	0,00	0,00	0,25	0,67	0,19	0,00	0,68	0,17
14	0,00	0,00	0,05	0,24	0,63	0,47	0,01	0,75	0,16

Fonte: elaboração do autor (2021)

Através dos valores resultantes para as variáveis de referência, realiza-se então a soma ponderada de seus valores e a transformação do resultado da soma, conforme equações 1 e 2, e finalmente a média entre os valores obtidos para a sinalização vertical e horizontal (equação 3). Os resultados alcançados pelos trechos são apresentados no Quadro 11, ordenado do maior para o menor *IIS* resultante.

Quadro 11 – Resultado da avaliação dos trechos viários através do *IIS*

#	Município	Rodovia	km inicial	km final	Extensão (km)	$IIS_V$	$IIS_H$	$IIS$	Faixa
5	Formosa do Sul	SC-157	23+200	39+100	15,9	9,50	6,27	<b>7,88</b>	Amarela
7	Palma Sola	SC-161	0+200	20+700	20,5	8,26	7,00	<b>7,63</b>	Amarela
3	Capinzal	SC-150	105+600	113+700	8,1	5,17	6,94	<b>6,06</b>	Laranja
4	Concórdia	BR-153	90+000	95+200	5,2	4,24	6,92	<b>5,58</b>	Laranja
13	Celso Ramos	BR-283	29+300	23+900	5,4	4,43	6,73	<b>5,58</b>	Laranja
11	Pinhalzinho	BR-282	571+500	601+500	30	3,67	6,97	<b>5,32</b>	Laranja
6	Campo Erê	BR-158	28+100	16+300	11,8	3,57	6,81	<b>5,19</b>	Laranja
14	Jaborá	SC-355	131+500	148+600	17,1	3,37	6,61	<b>4,99</b>	Vermelha
1	Rancho Queimado	BR-282	23+800	58+100	34,3	1,83	7,66	<b>4,74</b>	Vermelha
2	Rancho Queimado	BR-282	58+200	24+000	34,2	1,80	6,87	<b>4,33</b>	Vermelha
12	Celso Ramos	BR-283	38+000	29+300	8,7	1,33	6,82	<b>4,08</b>	Vermelha
10	Maravilha	BR-282	605+500	619+300	13,8	1,15	6,63	<b>3,89</b>	Vermelha
8	São José do Cedro	BR-163	105+300	123+200	17,9	2,17	4,96	<b>3,56</b>	Vermelha
9	Guaraciaba	BR-163	83+000	95+700	12,7	1,42	2,37	<b>1,89</b>	Vermelha

Fonte: elaboração do autor (2021)

Os valores obtidos para o  $IIS_V$  variaram entre 1,15 (trecho #10, Figura 15) e 9,50 (trecho #5, Figura 16), com um valor médio de 3,71. No pior caso (trecho #10), de um total de 24 placas de regulamentação, 23 estão na CR4, e uma está na CR3. 10 das 24 placas no CR4 (43,5%) apresentaram falha na identificação, e a placa no CR3 também não foi lida corretamente. O trecho #10 também apresenta 10 placas de advertência consideradas críticas, das quais cinco não foram lidas corretamente pelos algoritmos. Já no trecho #5 (melhor trecho para o  $IIS_V$ ), existem dez placas de regulamentação, todas elas no CR4, e todas foram corretamente interpretadas. Não existem placas de advertência consideradas críticas no trecho #5. Em relação à ocorrência de falsos positivos de placas do tipo R-19: “Velocidade máxima permitida”, o trecho #10 apresentou seis ocorrências na extensão de 13,8 km ( $T_{FP} = 0,43$ ), e o trecho #5 apresentou duas ocorrências em 15,9km ( $T_{FP} = 0,13$ ).

Figura 15 – Condição do pior trecho para a interpretabilidade da sinalização vertical, trecho #10 ( $IIS_V = 1,15$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura 16 – Condição geral do melhor trecho para a interpretabilidade da sinalização vertical, trecho #5 ( $IIS_V = 9,50$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Já para o  $IIS_H$ , os valores resultantes variaram de 2,37 para o trecho #9 (Figura 17) até 7,66 para o trecho #1 (Figura 18), com uma média observada de 6,40. Para o trecho #9 (piores caso para o  $IIS_H$ ) foram analisados 620 quadros, dos quais 569 (91,8%) foram identificados incorretamente pelo algoritmo de VC (todas as faixas eram de separação de fluxos opostos). Ainda para o trecho #9, 432 quadros (69,7%) apresentaram erros críticos, quando a faixa identificada permite a ultrapassagem, mas a faixa real proíbe. Já o trecho #1 (melhor caso) apresentou 1679 quadros de análise, dos quais 1305 (77,7%) apresentaram erro na leitura da sinalização, sendo 1158 quadros referentes a faixas de divisão de fluxos opostos e 147 referentes a faixas de divisão de fluxos de mesmo sentido. No trecho #1, 55 quadros apresentaram erros críticos.

Figura 17 – Condição do pior trecho para a interpretabilidade da sinalização horizontal, trecho #9  
( $IIS_H = 4,96$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura 18 – Condição do melhor trecho para a interpretabilidade da sinalização horizontal, trecho #1  
( $IIS_H = 7,66$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Em relação ao resultado do  $IIS$ , valor médio entre o  $IIS_V$  e o  $IIS_H$ , o trecho #9 apresentou os piores resultados, com  $IIS = 1,89$ ,  $IIS_V = 1,42$  e  $IIS_H = 2,37$ . O trecho #5 apresentou os melhores resultados, com  $IIS = 7,88$ ,  $IIS_V = 9,50$  e  $IIS_H = 6,27$ . A média dos valores obtidos para o  $IIS$  foi de 5,05. O Quadro 12 apresenta alguns parâmetros estatísticos dos valores resultantes.

Quadro 12 – Resumo estatístico dos resultados observados

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
$IIS_V$	1,15 (#10)	9,50 (#5)	3,71	2,45
$IIS_H$	2,37 (#9)	7,66 (#1)	6,40	1,25
$IIS$	1,89 (#9)	7,88 (#5)	5,05	1,50

Fonte: elaboração do autor (2021)

Os resultados apresentados permitem, portanto, classificar os trechos viários em termos da sua interpretabilidade por algoritmos de visão computacional usados na aplicação prática. Por exemplo, através do Quadro 11 pode-se dizer que o trecho #5 tem uma interpretabilidade média, pois a pontuação atingida foi alta ( $IIS = 7,88$ ), enquanto o trecho #9 tem uma interpretabilidade ruim, pois a pontuação atingida foi muito baixa ( $IIS = 1,89$ ). As faixas atingidas por cada trecho também indicam que nenhum trecho analisado teve boa

interpretabilidade geral, uma vez que nenhum trecho atingiu a faixa verde. Isso pode ser explicado, dentre outros fatores, pelo alto número de falhas na identificação da sinalização horizontal. Para visualizar a condição geral da sinalização de cada trecho e comparar com as pontuações atingidas, pode-se verificar os registros fotográficos no Apêndice A.

### 5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO IIS

O objetivo do método proposto é obter uma medida da condição da sinalização viária em termos do quão interpretável é por algoritmos de VC e, conseqüentemente, para os VA. Para atender esse propósito, foram propostas algumas variáveis de referência, e uma equação para agregar essas variáveis em um valor único, o *IIS*. Realizou-se também uma aplicação prática do método proposto, apresentada na seção anterior. Para avaliar a pertinência do método proposto para a avaliação da infraestrutura viária existente, de posse dos resultados obtidos na aplicação prática, se questiona como o valor do *IIS*, que objetiva representar uma medida da interpretabilidade da sinalização, é influenciado por parâmetros relacionados às características particulares dos trechos analisados, como o número total de placas existentes e por parâmetros da análise realizada, como a extensão de cada trecho analisado.

Assim, para realizar a análise da sensibilidade do modelo através da verificação da correlação entre os parâmetros e o *IIS*, inicia-se através da listagem das variáveis que podem ser observadas no caso prático realizado e que podem influenciar no resultado do *IIS*. A listagem das variáveis parte de uma formulação de hipóteses acerca de quais parâmetros poderiam afetar o valor final do *IIS*, mesmo não sendo diretamente relacionados ao que se deseja aferir (interpretabilidade da sinalização), ou então acerca de quais parâmetros podem ter intensa influência no valor resultante. A lista de variáveis consideradas é a seguinte:

- Extensão do trecho, em km.
- Número total de placas no trecho, de qualquer tipo.
- **Proporção de placas críticas**, representada pela quantidade de placas consideradas críticas (classe de risco superior à CR1 para as placas de regulamentação e placas de advertência críticas) dividida pelo número total de placas no trecho.
- Proporção de placas do tipo R-7 (“proibido ultrapassar”), em relação ao total de placas do trecho.
- Proporção de placas do tipo R-19 (“velocidade máxima permitida”), em relação ao total de placas do trecho.

- Número de placas por km.
- **Proporção de placas de regulamentação**, em relação ao total de placas do trecho
- **Qualidade observada das placas**, classificada pelo pesquisador como “ruim”, “média” ou “boa” através da visualização das imagens coletadas.
- **Qualidade observada da sinalização horizontal**, classificada pelo pesquisador como “ruim”, “média” ou “boa” através da visualização das imagens coletadas.

A observação da distribuição dos tipos de placas em relação ao total, realizada através de algumas variáveis específicas, visa observar se a composição das placas em um determinado trecho influencia na interpretabilidade da sinalização, medida através do IIS. O fundamento para essa consideração é que alguns tipos de placas podem ser mais facilmente identificáveis pelos algoritmos de VC do que outros. A classificação da qualidade observada da sinalização vertical e horizontal foi realizada pelo pesquisador através da observação das imagens, e tem por objetivo verificar se a interpretabilidade da sinalização é ou não relacionada com a sua qualidade em termos usuais (para a visão humana).

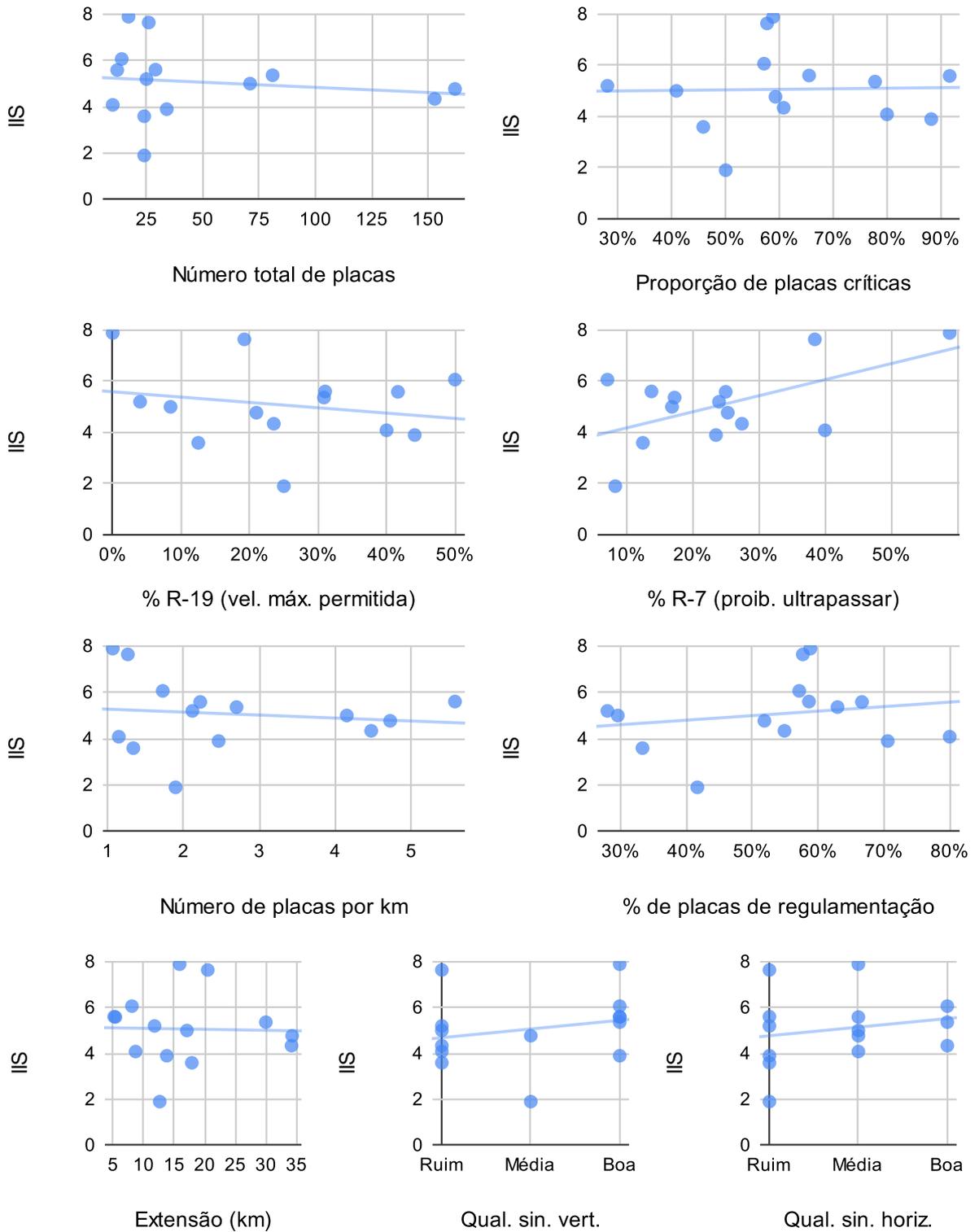
Assim, os coeficientes de correlação  $r$  foram calculados para verificar a relação entre cada uma das variáveis e o valor do IIS. Os resultados estão apresentados no Quadro 13, e a relação entre as variáveis é apresentada de forma gráfica na Figura 19.

Quadro 13 – Dados considerados para a análise de sensibilidade e coeficiente de correlação  $r$  resultante entre cada variável e o valor do IIS.

#	Extensão (km)	Núm. placas	% pl. críticas	% R-7	% R-19	Placas / km	% Reg.	Qualidade das placas	Qualidade sin. horiz.	IIS
1	34	162	59%	25%	21%	4,72	52%	1 - Média	1 - Média	4,76
2	34	153	61%	27%	24%	4,47	55%	0 - Ruim	2 - Boa	4,33
3	8	14	57%	7%	50%	1,73	57%	2 - Boa	2 - Boa	6,06
4	5	29	66%	14%	31%	5,58	59%	2 - Boa	0 - Ruim	5,60
5	16	17	59%	59%	0%	1,07	59%	2 - Boa	1 - Média	7,88
6	12	25	28%	24%	4%	2,12	28%	0 - Ruim	0 - Ruim	5,19
7	21	26	58%	38%	19%	1,27	58%	0 - Ruim	0 - Ruim	7,63
8	18	24	46%	13%	13%	1,34	33%	0 - Ruim	0 - Ruim	3,59
9	13	24	50%	8%	25%	1,90	42%	1 - Média	0 - Ruim	1,89
10	14	34	88%	24%	44%	2,46	71%	2 - Boa	0 - Ruim	3,89
11	30	81	78%	17%	31%	2,70	63%	2 - Boa	2 - Boa	5,36
12	9	10	80%	40%	40%	1,15	80%	0 - Ruim	1 - Média	4,08
13	5	12	92%	25%	42%	2,22	67%	2 - Boa	1 - Média	5,58
14	17	71	41%	17%	8%	4,15	30%	0 - Ruim	1 - Média	4,99
<b>r</b>	<b>-0,027</b>	<b>-0,144</b>	<b>0,025</b>	<b>0,568</b>	<b>-0,208</b>	<b>-0,122</b>	<b>0,194</b>	<b>0,234</b>	<b>0,194</b>	

Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura 19 – Relação entre as variáveis consideradas para análise de sensibilidade e o valor do IIS.



Fonte: elaboração do autor (2021)

Pode-se perceber que, de forma geral, as correlações observadas são pequenas, indicando que os parâmetros considerados possuem pouca influência no valor resultante do IIS,

exceto por alguns casos. Para o caso da extensão do trecho ( $r = -0,027$ ) pode-se considerar que não existe correlação, o que é um bom resultado para o modelo proposto. Isso pois a extensão do trecho é um parâmetro de análise que pode ser determinado conforme a conveniência da análise sendo realizada e, portanto, não deveria influenciar nos resultados observados. O número total de placas ( $r = -0,144$ ) apresenta uma leve correlação com o valor resultante do IIS, indicando que os trechos com mais placas tendem a ter menor índice de interpretabilidade, porém tal relação é fraca. O percentual de placas críticas em relação ao total ( $r = 0,025$ ) também parece não ter relação com o valor resultante do IIS.

Existe, porém uma correlação entre o percentual de placas do tipo R-7, “proibido ultrapassar”, e o valor resultante para o IIS ( $r = 0,568$ ). Isso significa que, quanto maior a proporção desse tipo de placas no trecho, maior a interpretabilidade resultante do trecho viário. Esse resultado pode ser justificado pela variação do desempenho dos algoritmos de VC em detectar os tipos específicos de placas, indicando que os algoritmos utilizados na análise possuem bom desempenho para identificar as placas R-7 em detrimento das demais. Para a avaliação do método proposto, este resultado é negativo, pois significa que o valor do índice IIS é influenciado não somente pela condição de visibilidade das placas (o que pode ser melhorado) mas também pela composição das placas do trecho, que não depende das condições de manutenção do trecho, mas, sim, do projeto de sinalização.

Também existe correlação com o percentual de placas do tipo R-19, “Velocidade máxima permitida” ( $r = -0,208$ ), porém no sentido inverso (quanto maior a taxa de placas R-19, menor o IIS) e com menor intensidade. Isso pode indicar que essas placas são mais difíceis de serem identificadas pelos algoritmos de VC, porém a intensidade da correlação é baixa. No que tange à densidade de placas no segmento, medida pelo número de placas por km, e do percentual de placas de regulamentação em relação ao total, as correlações também são de baixa intensidade ( $r = -0,122$  e  $r = 0,194$ , respectivamente).

A correlação entre a qualidade observada da sinalização vertical ( $r = 0,234$ ) e horizontal ( $r = 0,194$ ) com o valor resultante do IIS também é de baixa intensidade, porém ambas no sentido positivo (quanto maior a qualidade da sinalização, maior o IIS). Isso significa que a qualidade da sinalização para a condução humana, embora influencie positivamente, não é tão fortemente relacionada com a interpretabilidade quanto se poderia supor inicialmente.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As formas com que os VA poderão impactar a sociedade são abrangentes. Desde o campo tecnológico até questões éticas e morais, a possível ausência do condutor nos veículos traz grandes perspectivas para o futuro. Embora a pesquisa nesse assunto seja bastante diversa, no entanto, esta dissertação objetivou analisar as perspectivas do futuro dos VA no que tange à infraestrutura rodoviária, e de que forma ela poderá ser modificada em função de – ou em preparação para – o crescimento dos VA. Através de revisão sistemática, identificou-se que é escassa, ainda, a pesquisa nessa área, principalmente a respeito da relação entre os VA e a infraestrutura rodoviária dos dias atuais. Existe um corpo de pesquisa acerca de novas tecnologias para infraestrutura, como sensores e equipamentos para comunicação com veículos, porém estima-se que tais tecnologias sejam proeminentes apenas após um período de maturação dos VA como tecnologia, no qual eles deverão interagir diretamente com as rodovias dos dias atuais para que possam demonstrar sua aplicabilidade em cenários reais.

A partir deste contexto, quando se trata da interação entre os VA e as rodovias atuais, antecipa-se que os VA deverão ser capazes de ler e interpretar a sinalização viária completamente, uma vez que ela define as regras da rodovia e delimitam a faixa de tráfego sobre a pista. Analisando as tecnologias adotadas para a direção autônoma, é possível identificar que, para a leitura da sinalização viária, a VC é crucial, pois o veículo deve ser capaz de interpretar formas e cores para saber o significado das placas e linhas. As tecnologias de VC, porém, dependem diretamente da interpretação direta de imagens coletadas por câmeras, o que as torna sensível a condições adversas de visibilidade como chuva, neblina, sujeira nas placas etc. Além disso, existem diversos fatores que podem atrapalhar a capacidade do algoritmo interpretar as formas, como deformações na sinalização, condições de luminosidade variáveis, dentre outros.

Como os fatores que podem impedir a sinalização de ser corretamente interpretada pelos veículos não são conhecidos de forma extensiva, foi proposto, nesta dissertação, um método para classificação da interpretabilidade da sinalização que é baseado na aplicação prática de algoritmos de VC em rodovias e na comparação do resultado obtido com a condição real da sinalização no local, identificada por um analista humano, para obtenção do IIS. O método proposto foi aplicado em quatorze trechos de rodovias estaduais e federais no estado de SC, cujos resultados indicaram uma grande variabilidade na interpretabilidade da sinalização entre os trechos analisados.

Identificou-se através de uma análise de sensibilidade que a distribuição do tipo das placas existentes na rodovia impacta no valor final do IIS, indicando que o algoritmo de VC utilizado pode ser mais eficiente em identificar alguns tipos de placas do que outros. A identificação da sinalização horizontal também foi um ponto problemático, uma vez que, para todos os trechos, houve uma taxa considerável de erro do algoritmo na identificação do tipo da faixa. Outro resultado notável da análise de sensibilidade do modelo foi que os trechos classificados pelo pesquisador como possuindo uma boa sinalização (através de análise visual da condição das placas e das linhas) não necessariamente apresentaram boa interpretabilidade, e que trechos considerados em piores condições apresentaram valores altos do IIS, apontando novamente para a necessidade de avaliação prática da interpretabilidade da sinalização viária para garantia da segurança do tráfego dos VA.

Através do método proposto e da aplicação prática observada, portanto, considera-se que o objetivo principal desta dissertação, a proposta de método para avaliação da interpretabilidade das rodovias para os VA, foi alcançado através da proposta de cálculo do IIS. Com esse desenvolvimento, obteve-se um método de comparação de dados obtidos por algoritmos de VC com dados de referência do trecho para quantificação do sucesso do algoritmo em interpretar a sinalização viária, com foco na segurança viária. Em relação aos objetivos específicos, o objetivo a. foi alcançado através da revisão de literatura apresentada na seção 2.3, através da qual pode-se ter o panorama das tecnologias utilizadas pelos VA para navegação e orientação em rodovias. O objetivo b. foi alcançado ao longo das revisões apresentadas nos capítulos 2 e 3 como um todo, em que foi possível identificar através de análise narrativa e sistemática de literatura que as principais necessidades relacionadas ao tráfego dos VA em rodovias estão associadas à sua capacidade de detectar a sinalização viária e a geometria das rodovias, através de visão computacional.

Através da revisão sistemática realizada no capítulo 3, também foi possível abordar o objetivo c. no qual se buscou identificar os métodos existentes para a avaliação da interpretabilidade das rodovias. Porém, em relação ao objetivo c., não foi identificada a existência de nenhum outro método com o objetivo de avaliar a interpretabilidade da sinalização viária por veículos autônomos. Finalmente, o objetivo d. foi alcançado através da análise de sensibilidade do método, realizada no item 5.3.

Com isso, além da observação do atendimento aos objetivos propostos inicialmente, pode-se sistematizar os principais resultados da pesquisa realizada nesta dissertação de mestrado:

- Apresentou-se, nos capítulos 2 e 3, uma extensa revisão de referências acerca dos VA, da tecnologia utilizada na sua implementação, e dos possíveis impactos que a tecnologia pode ter na sociedade.
- Na seção 2.4, apresentou-se uma visão sistêmica de como a inovação tecnológica dos VA se insere no setor de transporte rodoviário no Brasil, incluindo uma identificação das principais entidades que poderão ser levadas à ação para compatibilizar o sistema legal e regulatório com os VA.
- Na seção 4.6.1, realizou-se uma proposta de divisão dos tipos da sinalização viária vertical em classes de risco, identificadas através de uma previsão dos riscos existentes para um VA caso não detecte a existência de cada tipo de placa. Essa proposta pode ser considerada um resultado da pesquisa aqui realizada, podendo ser mais bem estudada em trabalhos futuros.
- No capítulo 4, foi proposto um método para avaliação, baseada em visão computacional, da interpretabilidade da sinalização viária vertical e horizontal para o tráfego de veículos autônomos. Este método pode ser utilizado em processos de regulação para garantia da segurança dos VA nas rodovias, em programas de investimentos para melhoria da infraestrutura rodoviária, na avaliação dos algoritmos de VC e sua aplicabilidade para a interpretação de rodovias e no estudo dos fatores que levam à maior ou menor interpretabilidade da sinalização viária.

Com base nos resultados apresentados por esta dissertação, existem diversos caminhos através dos quais a pesquisa nesse assunto pode evoluir em projetos futuros:

- Podem ser estudados os impactos da adoção dos VA no sistema de transportes como um todo, e não somente na questão da infraestrutura rodoviária.
- Também é possível aprofundar a pesquisa a respeito da interação dos VA com os ambientes urbanos e como esses ambientes podem ser melhor preparados para o seu tráfego.
- Uma vez que esta dissertação focou nos aspectos da sinalização viária, a pesquisa também pode ser avançada em outros aspectos da infraestrutura, como a pavimentação, a geometria das rodovias etc.
- Os parâmetros propostos para a aplicação do método proposto, como as constantes numéricas adotadas e a classificação adotada para a sinalização vertical, podem ser estudados de forma aprofundada para sua melhor definição,

possivelmente de forma específica para a aplicação desejada do método proposto.

- Os processos de aplicação do método proposto, como a coleta de dados, a obtenção do cenário de referência e a comparação dos resultados podem também ser estruturados para melhor permitir a aplicação do método proposto para finalidades específicas.
- O IIS pode ser utilizado para quantificar a interpretabilidade da sinalização viária em pesquisas que visem identificar quais fatores podem impactá-la, como condições climáticas, horário, condições de luminosidade etc., que podem melhor identificar quais fatores podem atrapalhar o tráfego de VA nas rodovias.
- Finalmente, podem-se realizar pesquisas mais aprofundadas acerca da composição da sinalização viária (e não somente da capacidade do VA interpretá-la) e em como tal composição impacta na segurança dos VA, dado que as necessidades de informação desses veículos são muito diferentes da dos condutores humanos.

## REFERÊNCIAS

ADEGOKE, E. I.; ZIDANE, J.; KAMPERT, E.; *et al.* Infrastructure Wi-Fi for connected autonomous vehicle positioning: A review of the state-of-the-art. **Vehicular Communications**, v. 20, p. 100185. [S.l.]: Elsevier Inc., 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2019.100185>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1016/j.vehcom.2019.100185.

AFONSO, M. H. F.; SOUZA, J. V. DE; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. Como Construir Conhecimento Sobre O Tema De Pesquisa? Aplicação Do Processo Proknow-C Na Busca De Literatura Sobre Avaliação Do Desenvolvimento Sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 47–62. [S.l.: s.n.], 2012. DOI: 10.5773/rgsa.v5i2.424.

ANDERSON, J.; KALRA, N.; STANLEY, K.; *et al.* RAND Corporation. **Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers**. Santa Monica: RAND Corporation, 2016. 185 p. Disponível em: [http://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RR443-2.html](http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-2.html). Acesso em: 2 nov. 2020.

ARIFIN, B.; SUPRAPTO, B. Y.; PRASETYOWATI, S. A. D.; NAWAWI, Z. The Lateral Control of Autonomous Vehicles: A Review. *In*: 2019 International Conference On Electrical Engineering And Computer Science (ICECOS). **Anais...** Batam: IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8984590/>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1109/ICECOS47637.2019.8984590.

AXELROD, C. W. Autonomous Vehicles Meet Inhospitable Roadways. **2019 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference, LISAT 2019**, p. 1–6. [S.l.]: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/LISAT.2019.8816825.

BAGLOEE, S. A.; TAVANA, M.; ASADI, M.; OLIVER, T. Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. **Journal of Modern Transportation**, v. 24, n. 4, p. 284–303. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40534-016-0117-3>. Acesso em: 2 nov. 2020. DOI: 10.1007/s40534-016-0117-3.

BARRETO, C. B. M, **Método para concepção e gestão de sistemas de controle de velocidade em redes viárias**. 2015. 267 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

BARTHAUER, M.; FRIEDRICH, B. Presorting and presignaling: A new intersection operation mode for autonomous and human-operated vehicles. **Transportation Research Procedia**, v. 37, n. September 2018, p. 179–186. Braunschweig: Elsevier Ltd., 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.181>. Acesso em: 2 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.181.

BIMBRAW, K. Autonomous cars: Past, present and future: A review of the developments in the last century, the present scenario and the expected future of autonomous vehicle technology. *In*: 12th International Conference On Informatics In Control, Automation And Robotics, Proceedings. **Anais...** Colmar: SCITEPRESS, 2015. DOI: 10.5220/0005540501910198.

BRACY, J. M. B.; BAO, K. Q.; MUNDY, R. A. Highway infrastructure and safety

implications of AV technology in the motor carrier industry. **Research in Transportation Economics**, v. 77, n. October, p. 100758. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.100758>. Acesso em: 12 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.retrec.2019.100758.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, 1988. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Constituicao/Constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm). Acesso em: 23 jan. 2020.

BRASIL. **Lei nº 9.503 de 23 de setembro de 1997**. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19503compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503compilado.htm). Acesso em: 21 abr. 2021.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 10.233 de 5 de junho de 2001**. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, cria o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários e o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2001. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/LEIS\\_2001/L10233.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/LEIS_2001/L10233.htm). Acesso em: 23 jan. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.379 de 6 de janeiro de 2011**. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Viação - SNV; altera a Lei nº 9.432, de 8 de janeiro de 1997; revoga as Leis nºs 5.917, de 10 de setembro de 1973, 6.346, de 6 de julho de 1976, 6.504, de 13 de dezembro de 1977, 6.555, de 22 de agosto de 1978, 6.574, de 30 de setembro de 1978, 6.630, de 16 de abril de 1979, 6.648, de 16 de maio de 1979, 6.671, de 4 de julho de 1979, 6.776, de 30 de abril de 1980, 6.933, de 13 de julho de 1980, 6.976, de 14 de dezembro de 1980, 7.003, de 24 de junho de 1982, 7.436, de 20 de dezembro de 1985, 7.581, de 24 de dezembro de 1986, 9.060, de 14 de junho de 1995, 9.078, de 11 de julho de 1995, 9.830, de 2 de setembro de 1999, 9.852, de 27 de outubro de 1999, 10.030, de 20 de outubro de 2000, 10.031, de 20 de outubro de 2000, 10.540, de 1º de outubro de 2002, 10.606, de 19 de dezembro de 2002, 10.680, de 23 de maio de 2003, 10.739, de 24 de setembro de 2003, 10.789, de 28 de novembro de 2003, 10.960, de 7 de outubro de 2004, 11.003, de 16 de dezembro de 2004, 11.122, de 31 de maio de 2005, 11.475, de 29 de maio de 2007, 11.550, de 19 de novembro de 2007, 11.701, de 18 de junho de 2008, 11.729, de 24 de junho de 2008, e 11.731, de 24 de junho de 2008; revoga dispositivos das Leis nºs 6.261, de 14 de novembro de 1975, 6.406, de 21 de março de 1977, 11.297, de 9 de maio de 2006, 11.314, de 3 de julho de 2006, 11.482, de 31 de maio de 2007, 11.518, de 5 de setembro de 2007, e 11.772, de 17 de setembro de 2008; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2011. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2011/lei/112379.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112379.htm). Acesso em: 21 abr. 2021.

BRASIL. Presidência da República. **Lei Nº 13.103, de 2 de março de 2015**. Dispõe sobre o exercício da profissão de motorista; altera a Consolidação das Leis do Trabalho - CLT, aprovada pelo Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943, e as Leis nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 - Código de Trânsito Brasileiro, e 11.442, de 5 de janeiro de 2007 (empresas e transportadores autônomos de carga), para disciplinar a jornada de trabalho e o tempo de direção do motorista profissional; altera a Lei nº 7.408, de 25 de novembro de 1985; revoga dispositivos da Lei nº 12.619, de 30 de abril de 2012; e dá outras providências. Brasília, DF:

Presidência da República, 2015. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2015/lei/113103.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/113103.htm). Acesso em: 9 nov. 2020.

BRASIL. Confederação Nacional do Transporte. **Boletim Estatístico**. Brasília: Confederação Nacional dos Transportes, 2018a. 1 p. Disponível em: <https://cnt.org.br/acidentes-rodoviaros-infraestrutura>. Acesso em: 17 set. 2021.

BRASIL. Confederação Nacional do Transporte. **Acidentes rodoviários e a infraestrutura**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2018b. 140 p. Disponível em: [http://cms.cnt.org.br/Imagens/CNT/BOLETIM ESTATÍSTICO/BOLETIM ESTATÍSTICO 2018/Boletim Estatístico - 08 - 2018.pdf](http://cms.cnt.org.br/Imagens/CNT/BOLETIM%20ESTATISTICO/BOLETIM%20ESTATISTICO%202018/Boletim%20Estatistico%20-%2008%20-%202018.pdf). Acesso em: 2 nov. 2020.

BRASIL. **Lei nº 13.844 de 18 de junho de 2019**. Estabelece a organização básica dos órgãos da Presidência da República e dos Ministérios; altera as Leis nos 13.334, de 13 de setembro de 2016, 9.069, de 29 de junho de 1995, 11.457, de 16 de março de 2007, 9.984, de 17 de julho de 2000, 9.433, de 8 de janeiro de 1997, 8.001, de 13 de março de 1990, 11.952, de 25 de junho de 2009, 10.559, de 13 de novembro de 2002, 11.440, de 29 de dezembro de 2006, 9.613, de 3 de março de 1998, 11.473, de 10 de maio de 2007, e 13.346, de 10 de outubro de 2016; e revoga dispositivos das Leis nos 10.233, de 5 de junho de 2001, e 11.284, de 2 de março de 2006, e a Lei nº 13.502, de 1º de novembro de 2017. Brasília, DF: Presidência da República, 2019. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2019/Lei/L13844.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2019/Lei/L13844.htm). Acesso em: 21 abr. 2021.

BRASIL. Polícia Rodoviária Federal. **Dados abertos**. Disponível em: <https://portal.prf.gov.br/dados-abertos>. Acesso em: 12 abr. 2020.

BRASIL. **Sobre o Departamento Nacional de Trânsito**. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/questoes-sobre-o-departamento-nacional-de-transito>. Acesso em: 21 abr. 2021.

VAN BRUMMELEN, J.; O'BRIEN, M.; GRUYER, D.; *et al.* Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 89, n. March, p. 384–406. [S.l.]: Elsevier, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X18302134>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1016/j.trc.2018.02.012.

BUCSKY, P. Autonomous vehicles and freight traffic: towards better efficiency of road, rail or urban logistics?. **Urban Development Issues**, v. 58, n. 1, p. 41–52. [S.l.]: Sciendo, 2018. Disponível em: <https://content.sciendo.com/doi/10.2478/udi-2018-0022>. Acesso em: 2 nov. 2020. DOI: 10.2478/udi-2018-0022.

BURGHARDT, T. E.; MOSBÖCK, H.; PASHKEVICH, A.; FIOLIC, M. Horizontal road markings for human and machine vision. **Transportation Research Procedia**, v. 48, n. 2019, p. 3622–3633. [S.l.]: Elsevier B.V., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.089>. Acesso em: 6 out. 2020. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.089.

CAMPBELL, N. W.; POUT, M. R.; PRIESTLY, M. D. J.; DAGLESS, E. L.; THOMAS, B. T. Autonomous road vehicle navigation. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 7, n. 2, p. 177–190. [S.l.: s.n.], 1994. DOI: 10.1016/0952-1976(94)90022-1.

CAMPBELL, S.; O'MAHONY, N.; KRPALCOVA, L.; *et al.* Sensor Technology in Autonomous Vehicles: A review. *In: 2018 29TH IRISH SIGNALS AND SYSTEMS CONFERENCE (ISSC)*. **Anais...** Belfast: IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8585340/>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1109/ISSC.2018.8585340.

CHANKONG, V.; HAIMES, Y. Y. Multiobjective decision making: theory and methodology. New York: North Holland, 1983. 406 p.

CHEHRI, A.; MOUFTAH, H. T. Autonomous vehicles in the sustainable cities, the beginning of a green adventure. **Sustainable Cities and Society**, v. 51, n. August, p. 101751. [S.l.]: Elsevier, 2019. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101751.

CHEN, Z.; HE, F.; YIN, Y.; DU, Y. Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 99, p. 44–61. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2017. DOI: 10.1016/j.trb.2016.12.021.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. CONTRAN. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Sinalização Vertical de Advertência**. Brasília, DF, 2007a. 220 p. [.pdf].

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. CONTRAN. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Sinalização Vertical de Regulamentação**. Brasília, DF, 2007b. 222 p. [.pdf].

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. CONTRAN. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Sinalização Horizontal**. Brasília, DF, 2007c. 116 p. [.pdf].

DEVI, S.; MALARVEZHI, P.; DAYANA, R.; VADIVUKKARASI, K. A Comprehensive Survey on Autonomous Driving Cars: A Perspective View. **Wireless Personal Communications**, v. 114, n. 3, p. 2121–2133. [S.l.]: Springer Science and Business Media LLC, 2020. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11277-020-07468-y>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1007/s11277-020-07468-y.

DINGYI, Y.; HAIYAN, W.; KAIMING, Y. State-of-the-art and trends of autonomous driving technology. *In: 2018 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP (TEMS-ISIE)*. **Anais...** Pequim: IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8478449/>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1109/TEMS-ISIE.2018.8478449.

DIVAKARLA, K. P.; EMADI, A.; RAZAVI, S.; HABIBI, S.; YAN, F. A review of autonomous vehicle technology landscape. **International Journal of Electric and Hybrid Vehicles**, v. 11, n. 4, p. 320. [S.l.]: Inderscience Enterprises Ltd., 2019. Disponível em: <http://www.inderscience.com/link.php?id=102877>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1504/IJEHV.2019.102877.

DONATO, H.; DONATO, M. Etapas na Condução de uma Revisão Sistemática. **Revista Científica da Ordem dos Médicos**, v. 32, n. 3, p. 227–235. [S.l.: s.n.], 2019.

ELLIOTT, D.; KEEN, W.; MIAO, L. Recent advances in connected and automated

vehicles. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 6, n. 2, p. 109–131. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.09.005>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.09.005.

ERSAL, T.; KOLMANOVSKY, I.; MASOUD, N.; *et al.* Connected and automated road vehicles: state of the art and future challenges. **Vehicle System Dynamics**, v. 58, n. 5, p. 672–704. [S.l.]: Taylor and Francis Ltd., 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00423114.2020.1741652>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1080/00423114.2020.1741652.

EUA. National Highway Traffic Safety Administration. **Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles**. 2012. 14 p. [.pdf].

FAGGELLA, D. **The Self-Driving Car Timeline - Predictions from the Top 11 Global Automakers**. Disponível em: <https://emerj.com/ai-adoption-timelines/self-driving-car-timeline-themselves-top-11-automakers/>. Acesso em: 2 nov. 2020.

FARAH, H.; ERKENS, S. M. J. G.; ALKIM, T.; VAN AREM, B. Infrastructure for Automated and Connected Driving: State of the Art and Future Research Directions. In: G. Meyer; S. Beiker (Orgs.); **Road Vehicle Automation 4.**, Lecture Notes in Mobility. Cham: Springer International Publishing, 2018. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-60934-8\\_16](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-60934-8_16). Acesso em: 26 ago. 2021. DOI: 10.1007/978-3-319-60934-8\_16.

FLÄMIG, H. Autonomous Vehicles and Autonomous Driving in Freight Transportation. In: M. Maurer; J. C. Gerdes; B. Lenz; H. Winner (Orgs.); **Autonomous driving: Technical, legal and social aspects**. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. cap. 18. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-48847-8>. Acesso em: 15 set. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, A. A. Considerações sobre a pesquisa científica: em busca de caminhos para a pesquisa científica. **Intertemas: Revista da Toledo**, v. 5, p. 23. Presidente Prudente: Centro Universitário Antonio Eufrásio de Toledo de Presidente Prudente, 2001.

GOMES, L. F. A. M. **Teoria da decisão**. São Paulo: Cengage Learning, 2020.

GONZALEZ, D.; PEREZ, J.; MILANES, V.; *et al.* A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 4, p. 1135–1145. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7339478/>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1109/TITS.2015.2498841.

GOUDA, M.; MIRZA, J.; WEISS, J.; RIBEIRO CASTRO, A.; EL-BASYOUNY, K. Octree-based point cloud simulation to assess the readiness of highway infrastructure for autonomous vehicles. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, p. 1–19. [S.l.: s.n.], 2021. DOI: 10.1111/mice.12643.

GOZDECKI, J.; LOZIAK, K.; DZIECH, A.; *et al.* Communication system for Intelligent Road Signs network. **MT-ITS 2019 - 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems**, [S.l.: s.n.], 2019. DOI:

10.1109/MTITS.2019.8883382.

GUO, J.; CHENG, X.; CHEN, Q.; YANG, Q. Detection of Occluded Road Signs on Autonomous Driving Vehicles. In: 2019 Ieee International Conference On Multimedia And Expo (Icme). **Anais...** Shanghai, China: IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8784797/>. Acesso em: 26 ago. 2021. DOI: 10.1109/ICME.2019.00152.

HARDING, J.; POWELL, G.; YOON, R.; *et al.* **Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application**. Washington: National Highway Traffic Safety Administration, 2014. 327 p. [pdf].

IMAI, T. Legal regulation of autonomous driving technology: Current conditions and issues in Japan. **IATSS Research**, v. 43, n. 4, p. 263–267. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2019. DOI: 10.1016/j.iatssr.2019.11.009.

JANAI, J.; GÜNEY, F.; BEHL, A.; GEIGER, A. Computer Vision for Autonomous Vehicles: Problems, Datasets and State of the Art. **Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision**, v. 12, n. 1–3, p. 1–308. [S.l.]: Now Publishers, 2020. DOI: 10.1561/06000000079.

JOHNSON, C. **Readiness of the road network for connected and autonomous vehicles**. Londres: Royal Automobile Club for Motoring Ltd, 2017. 42 p. Disponível em: [http://www.racfoundation.org/assets/rac\\_foundation/content/downloadables/CAS\\_Readiness\\_of\\_the\\_road\\_network\\_April\\_2017.pdf](http://www.racfoundation.org/assets/rac_foundation/content/downloadables/CAS_Readiness_of_the_road_network_April_2017.pdf). Acesso em: 2 nov. 2020.

KAPPLER, L. B. **Análise dos impactos de veículos autônomos em uma rodovia brasileira com simulação de tráfego**. 2020. 76 p. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

KOPELIAS, P.; DEMIRIDI, E.; VOGIATZIS, K.; SKABARDONIS, A.; ZAFIROPOULOU, V. Connected & autonomous vehicles – Environmental impacts – A review. **Science of the Total Environment**, v. 712, p. 1–7. [S.l.]: Elsevier B.V., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135237>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135237.

KPMG. **2020 Autonomous Vehicles Readiness Index**. KPMG International, 2020. Disponível em: <https://home.kpmg/xx/en/home/insights/2020/06/autonomous-vehicles-readiness-index.html#download>. Acesso em: 2 nov. 2020.

KUUTTI, S.; FALLAH, S.; KATSAROS, K.; *et al.* A Survey of the State-of-the-Art Localization Techniques and Their Potentials for Autonomous Vehicle Applications. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 2, p. 829–846. [S.l.]: IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8306879/>. Acesso em: 14 jun. 2020. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2812300.

LATHAM, A.; NATTRASS, M. Autonomous vehicles, car-dominated environments, and cycling: Using an ethnography of infrastructure to reflect on the prospects of a new transportation technology. **Journal of Transport Geography**, v. 81, p. 102539. [S.l.]: Elsevier,

2019. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.102539.

LENGYEL, H.; SZALAY, Z. Test Scenario for Road Sign Recognition Systems with Special Attention on Traffic Sign Anomalies. In: 2019 Ieee 19th International Symposium On Computational Intelligence And Informatics And 7th Ieee International Conference On Recent Achievements In Mechatronics, Automation, Computer Sciences And Robotics (CINTI-MACRO). **Anais...** Szeged, Hungary: IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9105238/>. Acesso em: 26 ago. 2021. DOI: 10.1109/CINTI-MACRO49179.2019.9105238.

LEVESON, N. A new accident model for engineering safer systems. **Safety Science**, v. 42, n. 4, p. 237–270. [S.l.: s.n.], 2004. DOI: 10.1016/S0925-7535(03)00047-X.

LIU, Y.; TIGHT, M.; SUN, Q.; KANG, R. A systematic review: Road infrastructure requirement for Connected and Autonomous Vehicles (CAVs). **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1187, n. 4, p. 042073. [S.l.]: IOP Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1187/4/042073.

LU, X.; MADADI, B.; FARAH, H.; *et al.* Scenario-Based Infrastructure Requirements for Automated Driving. In: CICTP 2019. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019. DOI: 10.1061/9780784482292.489.

MA, Y.; WANG, Z.; YANG, H.; YANG, L. Artificial intelligence applications in the development of autonomous vehicles: A survey. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, v. 7, n. 2, p. 315–329. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. DOI: 10.1109/JAS.2020.1003021.

MAKRIDIS, M.; MATTAS, K.; CIUFFO, B.; RAPOSO, M. A.; THIEL, C. Assessing the Impact of Connected and Automated Vehicles. A Freeway Scenario. In: C. Zachäus; B. Müller; G. Meyer (Orgs.); **Advanced Microsystems for Automotive Applications**. Lecture Notes in Mobility. Cham: Springer International Publishing, 2018. 2021. DOI: 10.1007/978-3-319-66972-4\_18.

MEDINA-TAPIA, M.; ROBUSTÉ, F. Exploring paradigm shift impacts in urban mobility: Autonomous Vehicles and Smart Cities. **Transportation Research Procedia**, v. 33, p. 203–210. [S.l.]: Elsevier B.V., 2018. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.10.093.

MEIRELLES, H. L. **Direito Administrativo Brasileiro**. 36<sup>a</sup> ed. São Paulo: Malheiros Editores, 2010. 872 p.

MOGELMOSE, A.; LIU, D.; TRIVEDI, M. M. Traffic sign detection for U.S. roads: Remaining challenges and a case for tracking. **2014 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2014**, p. 1394–1399. [S.l.: s.n.], 2014. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6957882.

MONIOS, J.; BERGQVIST, R. The transport geography of electric and autonomous vehicles in road freight networks. **Journal of Transport Geography**, v. 80, n. August, p. 102500. [S.l.]: Elsevier, 2019. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.102500.

MORDUE, G.; YEUNG, A.; WU, F. The looming challenges of regulating high level autonomous vehicles. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 132, n. November 2019, p. 174–187. [S.l.]: Elsevier, 2020. DOI: 10.1016/j.tra.2019.11.007.

NITSCHKE, P.; MOCANU, I.; REINTHALER, M. Requirements on tomorrow's road infrastructure for highly automated driving. In: 2014 International Conference On Connected Vehicles And Expo (ICCVE). **Anais...** Vienna, Austria: IEEE, 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7297694/>. Acesso em: 26 ago. 2021. DOI: 10.1109/ICCVE.2014.7297694.

ÖZGÜNER, Ü.; STILLER, C.; REDMILL, K. Systems for safety and autonomous behavior in cars: The DARPA grand challenge experience. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 2, p. 397–412. [S.l.: s.n.], 2007. DOI: 10.1109/JPROC.2006.888394.

PAYERL, C.; SCHMIDT, D.; HRASSNIG, P.; BERNSTEINER, S. Validation of Automated Driving Functions Using Vehicle and Infrastructure Data. **ATZelectronics worldwide**, v. 14, n. 6, p. 44–49. [S.l.: s.n.], 2019. DOI: 10.1007/s38314-019-0018-4.

PIKE, A. M.; BARRETTE, T. P.; CARLSON, P. J. **Evaluation of the Effects of Pavement Marking Characteristics on Detectability by ADAS Machine Vision**. College Station: National Cooperative Highway Research Program, 2018. 148 p. [.pdf].

PINHEIRO, A. C.; RIBEIRO, L. C. **Regulação das Ferrovias**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2017. 452 p.

PRAKKEN, H. On the problem of making autonomous vehicles conform to traffic law. **Artificial Intelligence and Law**, v. 25, n. 3, p. 341–363. [S.l.]: Springer Netherlands, 2017. DOI: 10.1007/s10506-017-9210-0.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2ª ed. Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013. 276 p. Disponível em: [http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book Metodologia do Trabalho Cientifico.pdf](http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf). Acesso em: 2 nov. 2020.

PYRIALAKOU, V. D.; GKARTZONIKAS, C.; GATLIN, J. D.; GKCRITZA, K. Perceptions of safety on a shared road: Driving, cycling, or walking near an autonomous vehicle. **Journal of Safety Research**, v. 72, p. 249–258. [S.l.]: National Safety Council and Elsevier Ltd, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2019.12.017>. Acesso em: 2 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.12.017.

ROMERO, J. A.; LOZANO-GUZMÁN, A. A.; OBREGÓN-BIOSCA, S. A.; BETANZO-QUEZADA, E. A plane model of the interaction of a vehicle with the road infrastructure. **Advances in Engineering Software**, v. 117, p. 46–58. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2018. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.03.007.

RUPP, J. D.; KING, A. G. Autonomous driving - A practical roadmap. **SAE Technical Papers**, 2010. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2010-01-2335/>. Acesso em 26 ago. 2021 DOI: 10.4271/2010-01-2335.

SAEED, T. U. **Road infrastructure readiness for autonomous vehicles**. 101 p. Tese de Doutorado (Doctor of Philosophy) - Purdue University, West Lafayette, 2019.

SAEED, T. U.; ALABI, B. N. T.; LABI, S. Preparing Road Infrastructure to

Accommodate Connected and Automated Vehicles: System-Level Perspective. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 27, n. 1, p. 06020003. [S.l.: s.n.], 2021. DOI: 10.1061/(asce)is.1943-555x.0000593.

SALMON, P. M.; READ, G. J. M.; STEVENS, N. J. Who is in control of road safety? A STAMP control structure analysis of the road transport system in Queensland, Australia. **Accident Analysis and Prevention**, v. 96, p. 140–151. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2016. DOI: 10.1016/j.aap.2016.05.025.

SARKER, A.; SHEN, H.; RAHMAN, M.; *et al.* A Review of Sensing and Communication, Human Factors, and Controller Aspects for Information-Aware Connected and Automated Vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 21, n. 1, p. 7–29. [S.l.]: IEEE, 2020. DOI: 10.1109/TITS.2019.2892399.

SAYIN, M. O.; LIN, C. W.; KANG, E.; SHIRAISHI, S.; BAŞAR, T. Reliable Smart Road Signs. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 21, n. 12, p. 4995–5009. [S.l.: s.n.], 2020. DOI: 10.1109/TITS.2019.2946356.

SERNA, C. G.; RUCHEK, Y. Classification of Traffic Signs: The European Dataset. **IEEE Access**, v. 6, p. 78136–78148. [S.l.]: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2884826.

SHLADOVER, S. Cooperative (rather than autonomous) vehicle-highway automation systems. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 1, n. 1, p. 10–19. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009. DOI: 10.1109/MITS.2009.932716.

DA SILVA, J. P. N.; GANDIA, R. M.; SUGANO, J. Y.; *et al.* From technology to market: A bibliometric and integrative review on autonomous vehicles. **World Review of Intermodal Transportation Research**, v. 9, n. 1, p. 1–26. [S.l.]: Inderscience Enterprises Ltd., 2020. DOI: 10.1504/WRITR.2020.106442.

SKARBEEK-ZABKIN, A.; SZCZEPANEK, M. Autonomous vehicles and their impact on road infrastructure and user safety. *In*: 2018 XI INTERNATIONAL SCIENCE-TECHNICAL CONFERENCE AUTOMOTIVE SAFETY. **Anais...** Častá: IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8373343/>. Acesso em: 2 nov. 2020. DOI: 10.1109/AUTOSAFE.2018.8373343.

SKEETE, J. P. Level 5 autonomy: The new face of disruption in road transport. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 134, n. October 2017, p. 22–34. [S.l.]: Elsevier, 2018. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.05.003.

SKRICKIJ, V.; ŠABANOVIČ, E.; ŽURAUŠIS, V. Autonomous road vehicles: recent issues and expectations. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 14, n. 6, p. 471–479. [S.l.]: Institution of Engineering and Technology (IET), 2020. DOI: 10.1049/iet-its.2018.5513.

STEYN, W. J. V. M.; MAINA, J. W. Guidelines for the use of accelerated pavement testing data in autonomous vehicle infrastructure research. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 6, n. 3, p. 273–281. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.05.001>. Acesso em: 2 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.jtte.2019.05.001.

STORSÆTER, A. D.; PITERA, K.; MCCORMACK, E. D. The automated driver as a new road user. **Transport Reviews**, v. 0, n. 0, p. 1–23. [S.l.]: Taylor & Francis, 2020. DOI: 10.1080/01441647.2020.1861124.

TALEBPOUR, A.; MAHMASSANI, H. S. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 71, p. 143–163. [S.l.]: Elsevier Ltd., 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X16301140>. Acesso em: 2 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.trc.2016.07.007.

TAYLOR, R. Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review. **Journal of Diagnostic Medical Sonography**, v. 6, n. 1, p. 35–39. [S.l.: s.n.], 1990. DOI: 10.1177/875647939000600106.

TEMEL, D.; CHEN, M. H.; ALREGIB, G. Traffic Sign Detection under Challenging Conditions: A Deeper Look Into Performance Variations and Spectral Characteristics. **arXiv**, p. 1–11. [S.l.: s.n.], 2019.

VALENTE, A. M.; NOVAES, A. G.; PASSAGLIA, E.; VIEIRA, H. **Gerenciamento de Transporte e Frotas**. 3. ed. rev ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. 381 p.

VANHOLME, B.; GRUYER, D.; GLASER, S.; MAMMAR, S. A legal safety concept for highly automated driving on highways. **IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings**, , n. Iv, p. 563–570. [S.l.: s.n.], 2011. DOI: 10.1109/IVS.2011.5940582.

VANHOLME, B.; GRUYER, D.; LUSETTI, B.; GLASER, S.; MAMMAR, S. Highly automated driving on highways based on legal safety. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 1, p. 333–347. [S.l.: s.n.], 2013. DOI: 10.1109/TITS.2012.2225104.

VILLELA, T. M. D. A.; TEDESCO, G. M. I. Sistema de transporte rodoviário de cargas: uma proposta para sua estrutura e elementos. **Transportes**, v. 19, n. 2, p. 57. [S.l.: s.n.], 2011. DOI: 10.14295/transportes.v19i2.507.

WALI, S. B.; ABDULLAH, M. A.; HANNAN, M. A.; *et al.* Vision-Based Traffic Sign Detection and Recognition Systems: Current Trends and Challenges. **Sensors**, v. 19, n. 9, p. 2093. [S.l.]: MDPI, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/9/2093>. Acesso em: 2 nov. 2020. DOI: 10.3390/s19092093.

WEBER, M. **Where to? A history of autonomous vehicles**. Disponível em: <https://computerhistory.org/blog/where-to-a-history-of-autonomous-vehicles>. Acesso em: 26 fev. 2020.

WELDE, Y.; QIAO, F. Effects of Autonomous and Automated Vehicles on Stopping Sight Distance and Vertical Curves in Geometric Design. *In: RESILIENCE AND SUSTAINABLE TRANSPORTATION SYSTEMS*. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. DOI: 10.1061/9780784482902.084.

YU, X.; MARINOV, M. A study on recent developments and issues with obstacle detection systems for automated vehicles. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 8. [S.l.: s.n.],

2020. DOI: 10.3390/SU12083281.

YURTSEVER, E.; LAMBERT, J.; CARBALLO, A.; TAKEDA, K. A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies. **IEEE Access**, v. 8, p. 58443–58469. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983149.

ZHANG, Y. Tampa Hillsborough Expressway Authority. **Adapting Infrastructure for Automated Driving**. 2013. 15 p. [.pdf].

## APÊNDICE A – Registros fotográficos da condição da sinalização viária nos trechos rodoviários analisados.

Durante a aplicação prática da metodologia proposta para avaliação da interpretabilidade da sinalização viária, foram apresentados registros fotográficos da condição da sinalização viária em cada trecho, para comparação da condição geral da sinalização com os valores resultantes do IIS. Para referência, são apresentadas, nesse Apêndice, figuras que representam todos os trechos analisados. Uma vez que a numeração dos trechos não seguiu nenhuma sequência específica, as figuras serão apresentadas em ordem decrescente do valor resultante para o IIS.

Figura A-1 – Condição do trecho #5 ( $IIS_V = 9,50$ ;  $IIS_H = 6,27$ ;  $IIS = 7,88$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-2 – Condição do trecho #7 ( $IIS_V = 8,26$ ;  $IIS_H = 7,00$ ;  $IIS = 7,63$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-3 – Condição do trecho #3 ( $IIS_V = 5,17$ ;  $IIS_H = 6,94$ ;  $IIS = 6,06$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-4 – Condição do trecho #4 ( $IIS_V = 4,24$ ;  $IIS_H = 6,92$ ;  $IIS = 5,58$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-5 – Condição do trecho #13 ( $IIS_V = 4,43$ ;  $IIS_H = 6,73$ ;  $IIS = 5,58$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-6 – Condição do trecho #11 ( $IIS_V = 3,67$ ;  $IIS_H = 6,97$ ;  $IIS = 5,32$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-7 – Condição do trecho #6 ( $IIS_V = 3,57$ ;  $IIS_H = 6,81$ ;  $IIS = 5,19$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-8 – Condição do trecho #14 ( $IIS_V = 3,37$ ;  $IIS_H = 6,61$ ;  $IIS = 4,99$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-9 – Condição do trecho #1 ( $IIS_V = 1,83$ ;  $IIS_H = 7,66$ ;  $IIS = 4,74$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-10 – Condição do trecho #2 ( $IIS_V = 1,80$ ;  $IIS_H = 6,87$ ;  $IIS = 4,33$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-11 – Condição do trecho #12 ( $IIS_V = 1,33$ ;  $IIS_H = 6,82$ ;  $IIS = 4,08$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-12 – Condição do trecho #10 ( $IIS_V = 1,15$ ;  $IIS_H = 6,63$ ;  $IIS = 3,89$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-13 – Condição do trecho #8 ( $IIS_V = 2,17$ ;  $IIS_H = 4,96$ ;  $IIS = 3,56$ )



Fonte: elaboração do autor (2021)

Figura A-14 – Condição do trecho #9 ( $IIS_V = 2,17$ ;  $IIS_H = 4,96$ ;  $IIS = 3,56$ )

Fonte: elaboração do autor (2021)