CAROLINE BIANCA SANTOS TANCREDI MOLINA

**Controle veicular autônomo (CVA): um sistema para prevenir acidentes no
contexto de veículos autônomos**

São Paulo
2018

CAROLINE BIANCA SANTOS TANCREDI MOLINA

**Controle veicular autônomo (CVA): um sistema para prevenir acidentes no
contexto de veículos autônomos**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de
Computação

Orientador: Prof. Dr. Jorge Rady de

São Paulo
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Molina, Caroline Bianca Santos Tancredi

Controle veicular autônomo (CVA): um sistema para prevenir acidentes no contexto de veículos autônomos / C. B. S. T. Molina -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

101 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Segurança crítica 2.Veículos autônomos 3.Controle veicular autônomo
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família, aos meus pais, Miguel Molina e Jane Molina, e aos meus avós, José Acássio, Maria Elza e Therezinha Molina. Muito obrigado por toda orientação e dedicação, e, sobretudo, amor. Eu sei que sem vocês não teria chegado até aqui. Amo todos vocês.

Meu muito obrigado ao professor Dr. Jorge Rady de Almeida Jr., meu orientador, pela orientação, paciência e, sobretudo, confiança depositada em mim. Saiba que o trabalho só foi concluído graças a sua orientação e dedicação na correção do mesmo.

Agradeço, também, às pessoas que fazem parte do GAS (Grupo de Análise de Segurança da Escola Politécnica da USP), em especial ao Lúcio Vismari. Muito obrigada por todas as conversas e sugestões para a abordagem do tema deste trabalho. Enfim, obrigada por me auxiliar no desenvolvimento do mesmo.

Aos professores Dr. João Batista de Camargo Jr. e Dr. Paulo Sérgio Cugnasca pelo apoio e dedicação para realização deste trabalho.

Meu muito obrigado ao ex-estagiário do GAS Amauri Shimabukuru e ao estagiário Tiago Fujii, cujos trabalhos de iniciação científica contribuíram, em muito, para que este trabalho fosse concluído.

Por fim, meu muito obrigada ao Centro de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Ericsson Telecomunicações S.A. - Brasil, pela parceria que desencadeou o trabalho de pesquisa em questão.

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico e o elevado investimento em tecnologias de veículos "inteligentes" vão, provavelmente, transformar veículos autônomos em realidade em alguns anos. A inserção de inteligência em veículos rodoviários visa obter uma redução nos acidentes de trânsito devido à mitigação de erros cometidos por motoristas humanos, graças à sua substituição por máquinas. Além disso, os veículos autônomos devem ser capazes de mitigar os perigos existentes nos sistemas de transporte rodoviário, sem criar novos riscos. Assim, é importante a pesquisa de como garantir a segurança crítica (*safety*) nesse novo cenário. Algumas pesquisas nesta área já vêm sendo desenvolvidas, porém elas não mostram como projetar um sistema veicular autônomo no qual se possa aplicar métodos já existentes para analisar e garantir níveis de segurança adequados em tais veículos. Frente a isso, este trabalho de mestrado desenvolve uma proposta que visa facilitar o desenvolvimento e a análise dessa nova classe de veículos, além de assegurar níveis de segurança crítica adequados aos veículos autônomos. A proposta é representada por um sistema denominado Controle Veicular Autônomo (CVA), o qual foi desenvolvido sob o conceito de Sistemas de Transporte Inteligentes (STI). O sistema CVA é formado por duas camadas, uma de operação (Operação Veicular Autônoma – OVA), responsável pela condução do veículo e outra de proteção (Proteção Veicular Autônoma – PVA). A ideia principal é que se utilize a camada PVA para a prevenção de acidentes. A camada PVA foi desenvolvida e testada em um ambiente de simulação, considerando um Estudo de Caso. Observou-se que, conforme previsto, o sistema CVA, por possuir uma camada voltada para a proteção veicular, conseguiu evitar diversas situações de colisões entre veículos.

Palavras-chave — Segurança crítica; Veículos Autônomos; Controle Veicular Autônomo.

ABSTRACT

Technological development and the massive investment in 'intelligent' vehicle technologies are likely to turn autonomous vehicles into reality in a few years. The insertion intelligence in road vehicles aims to obtain a reduction in traffic accidents due to the mitigation of errors committed by human drivers, thanks to their replacement by machines. In addition, autonomous vehicles should be able to mitigate hazards in road transportation systems without creating new risks. Thus, It is important to study how to ensure safety in this new scenario. Some research in this area has already been developed, but they do not show how to design properly an autonomous vehicle system in which existing methods can be applied to analyze and guarantee adequate levels of safety in such vehicles. As a result, this master's work develops a proposal that aims to facilitate the development and analysis of this new class of vehicles, in addition to ensuring levels of critical safety appropriate to autonomous vehicles. The proposal is represented by a system called Autonomous Vehicle Control (CVA), which was developed under the concept of Intelligent Transport Systems (STI). The CVA system is formed by two layers, one of operation (Autonomous Vehicle Operation - OVA), responsible for the driving of the vehicle and another one of protection (Autonomous Vehicle Protection - PVA). The main idea is to use the PVA layer for the prevention of accidents. The PVA layer was developed and tested in a simulation environment, considering a Case Study. It was observed that, as predicted, the CVA system, because it has a layer aimed at vehicular protection, was able to avoid several collision situations between vehicles.

Keywords — Safety; Autonomous Vehicles; Autonomous Vehicle Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ambiente de simulação.....	10
Figura 2 - Arquitetura do STI dos EUA	14
Figura 3 - Esquema simplificado dos sistemas do trem	18
Figura 4 - Representação básica do sistema CVA interagindo com outros elementos do STR....	22
Figura 5 - Representação do CVA.....	24
Figura 6 - Detalhamento da camada PVA	25
Figura 7 - Detalhamento da camada OVA	26
Figura 8 - Fluxo de dados entre as camadas OVA e PVA e subsistemas do veículo.....	28
Figura 9 - Árvore de falhas.....	31
Figura 10 - Esquema lógico do Controle Veicular Autônomo.....	33
Figura 11 - Esquema lógico da camada PVA.....	37
Figura 12 - Fuzificação da variável Velocidade Veicular	42
Figura 13 - Fuzificação da variável Alerta de Zona de Incidência.....	43
Figura 14 - Fuzificação da variável Presença de Obstáculos	43
Figura 15 - Fuzificação da variável Frenagem	44
Figura 16 - Fuzificação da variável MNR.....	44
Figura 17 - Fluxo de dados dos elementos do STR sobre o contexto de STI.....	50
Figura 18 - Representação da interface de comunicação	55
Figura 19 - Representação completa do ambiente de simulação.....	56
Figura 20 - Ambiente de simulação para realização dos testes	57
Figura 21 -Representação da distância frontal e lateral.....	60
Figura 22 - Esquema lógico do Matlab	61
Figura 23 - Cenário utilizado nos testes	65
Figura 24 - Estado de término do teste	69
Figura 25 - Código do Controle Veicular Autônomo.....	83
Figura 26 - Código da Proteção Veicular Autônoma	84
Figura 27 - Código do motorista autônomo.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre as taxa de frenagem e a desaceleração realizada pelo veículo autônomo no cenário em questão	39
Tabela 2 - Função dos elementos básicos do STR	49
Tabela 3 - Detalhamento dos fluxos de dados	51
Tabela 4 - Relação entre os fluxos de dados (Figura 17) e sua respectivas características	52
Tabela 5 - Características dos elementos do STR e instanciação de cada uma destas características	53
Tabela 6 - Informações enviadas ao Matlab	59
Tabela 7 - Informações enviadas ao OpenDS	60
Tabela 8 - Relação entre os submódulos do motorista autônomo e as funções do Matlab	62
Tabela 9 - Dados contidos nos relatório de simulação	63
Tabela 10 - Características consideradas no cenário de teste	64
Tabela 11 - Exemplos de diferentes valores de AZI	68
Tabela 12 - AZI's considerados	69
Tabela 13 - Distância de Parada do conjunto de testes número 1 - motorista com PVA	70
Tabela 14 - Distância de Parada do conjunto de testes número 1 - motorista sem PVA	70
Tabela 15 - Distância de Parada do conjunto de testes número 2 - motorista com PVA	72
Tabela 16 - Distância de Parada do conjunto de testes número 2 - motorista sem PVA	72
Tabela 17 - Distância de Parada do conjunto de testes número 3 (falha 1) - motorista com PVA	74
Tabela 18 - Distância de Parada do conjunto de testes número 3 (falha 1) - motorista sem PVA	74
Tabela 19 - Distância de Parada do conjunto de testes número 3 (falha 2) - motorista com PVA	75
Tabela 20 - Distância de Parada do conjunto de testes número 3 (falha 2) - motorista sem PVA	75
Tabela 21 - Parâmetros do código fonte do submódulo PVA	86
Tabela 22 - Tabela de dados referente a Tabela 15 (linha 1)	88
Tabela 23 - Tabela de dados referente a Tabela 17 (linha 1)	90
Tabela 24 - Tabela de dados referente a Tabela 18 (linha 1)	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACPS - *Automotive Cyber-Physical Systems* (tradução: Sistemas Ciberfísicos Automotivos)

ASIL - *Automotive Safety Integrity Level* (tradução: Nível de Integridade de Segurança Crítica Automotiva)

ATC - *Automatic Train Control* (tradução: Controle Automático de Trem)

ATO - *Automatic Train Operation* (tradução: Operação Automática de Trem)

ATP - *Automatic Train Protection* (tradução: Proteção Automática de Trem)

ATS - *Automatic Train Supervision* (tradução: Supervisão Automática de Trem)

CVA - Controle Veicular Autônomo

DARPA - *Defense Advanced Research Projects Agency* (tradução: Agência de Projetos de Pesquisa Avançadas de Defesa)

DAS - *Driver Assistance Systems* (tradução: Sistemas de Assistência ao Condutor)

DoT - *Department of Transportation* (tradução: Departamento de Transporte)

EUA - Estados Unidos da América

HMI - *Human Machine Interface* (tradução: Interface Homem-Máquina)

ITS - *Intelligent Transportation Systems* (tradução: Sistemas de Transportes Inteligentes)

OAT - Operação Automática de Trem

OVA - Operação Veicular Autônoma

PAT - Proteção Automática de Trem

PVA - Proteção Veicular Autônoma

SAT - Supervisão Automática de Trem

SIL - *Safety Integrity Level* (tradução: Nível de Integridade de Segurança Crítica)

STI - Sistemas de Transportes Inteligentes

STR - Sistema de Transporte Rodoviário

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.2	OBJETIVO	4
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2	METODOLOGIA.....	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	VEÍCULOS AUTÔNOMOS – VISÃO GERAL	11
3.2	SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES (STI)	13
3.3	SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES DOS EUA	13
3.4	CONTROLE AUTOMÁTICO DO TREM - "MOLDE" PARA O SISTEMA CVA	16
4	PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO – O SISTEMA CVA.....	19
4.1	DETALHAMENTO CONCEITUAL DO SISTEMA CVA	19
4.1.1	<i>Controle Veicular Autônomo - CVA.....</i>	<i>19</i>
4.1.2	<i>Detalhamento das Camadas: PVA e OVA</i>	<i>22</i>
4.1.3	<i>Proteção Veicular Autônoma - PVA.....</i>	<i>28</i>
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA CONTROLE VEICULAR AUTÔNOMO	32
4.2.1	<i>Controle Veicular Autônomo - CVA.....</i>	<i>32</i>
4.2.2	<i>Camada de Proteção Veicular Autônoma (PVA)</i>	<i>35</i>
4.2.2.1	Dimensionamento da Taxa de Frenagem.....	38
4.2.3	<i>Camada de Operação Veicular Autônoma (OVA).....</i>	<i>39</i>
4.2.3.1	A ² CPS Engine	39
4.2.3.1.1	Fase de Identificação de Perigos/Risco	40
4.2.3.1.2	Fase de Análise de Risco	40
4.2.3.2	Fase de Avaliação de Risco	45
4.2.3.3	Fase de Tratamento de Risco.....	45
4.2.3.4	Comentários Finais sobre A ² CPS Engine	46
5	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	47
5.1	ATIVIDADES DA SIMULAÇÃO	47
5.1.1	<i>Detalhamento do Ambiente de Simulação do Framework.....</i>	<i>48</i>
5.1.1.1	Elementos do Sistema de Transporte Rodoviário.....	48
5.1.1.2	Implementação dos Elementos do STR.....	51
5.2	AMBIENTE PARA TESTE DO CVA	57
5.2.1	<i>Troca de Mensagens entre OpenDS e Matlab.....</i>	<i>58</i>

5.2.1.1	Mensagens do OpenDS para o Matlab.....	58
5.2.1.2	Mensagens do Matlab para o OpenDS.....	60
5.2.2	<i>Submódulos do Motorista Autônomo</i>	<i>61</i>
5.2.3	<i>Relatório de Simulação.....</i>	<i>62</i>
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	63
6	ESTUDO DE CASO	64
6.1	OBJETIVO.....	64
6.2	CENÁRIO DE TESTE.....	64
6.3	TESTES E RESULTADOS.....	66
6.3.1	<i>Primeiro Conjunto de Testes - Cenário sem Falha</i>	<i>69</i>
6.3.2	<i>Segundo Conjunto de Testes - Cenário com Falha A²CPS Engine.....</i>	<i>71</i>
6.3.3	<i>Terceiro Conjunto de Testes - Falha Comunicação/Comando</i>	<i>73</i>
7	CONCLUSÕES FINAIS.....	76
7.1	CONCLUSÕES DA DISSERTAÇÃO.....	76
7.2	TRABALHOS FUTUROS	77
	APÊNDICE A - CÓDIGOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO CVA.....	83
	APÊNDICE B - TABELAS DE DADOS	88

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o tema abordado nesta Dissertação de Mestrado. Assim, é apresentado o objetivo deste trabalho de investigação científica e as motivações que levaram à escolha do tema.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos tem havido uma maior preocupação com as propriedades de segurança crítica¹ (*safety*) e a confiabilidade de sistemas de transporte (WORK; BAYEN; JACOBSON, 2008). Assim, a meta de um sistema de transporte está em fazer com que as pessoas e bens cheguem aos seus destinos, tendo também como objetivo fazer com que eles os atinjam de forma segura.

De acordo com Reif (2014), alguns fatores afetam a segurança crítica veicular em situações de tráfego rodoviário, dentre os quais tem-se:

- a condição de conservação do veículo (por exemplo, condição dos pneus, desgaste dos componentes veiculares, entre outros);
- as condições ambientais ao redor do veículo, abrangendo características sobre o clima, a superfície da via, obstáculos e as condições de tráfego; e
- as habilidades de condução do motorista, incluindo suas condições física e mental.

Considerando esses três fatores, aquele que mais contribui para a ocorrência de acidentes no cenário rodoviário é o relacionado à forma de condução por parte dos motoristas. De acordo com Post Gazzete (2017), o número de acidentes de trânsito causados por erros humanos (condução humana) corresponde a 94% dos acidentes fatais.

Considerando este contexto, podem vir a exercer importante papel os veículos autônomos, cujas pesquisas já realizadas têm indicado que eles poderiam colaborar com a melhoria desse cenário descrito do Sistema de Transporte Rodoviário (STR). Por exemplo, poderiam ajudar a reduzir o número de acidentes rodoviários uma vez que os comandos e

¹ Por segurança crítica entenda-se a segurança envolvida na proteção de pessoas, meio ambiente e bens materiais, principalmente em sistemas cuja operação possa envolver graves acidentes, gerando ferimentos e/ou mortes, destruição de propriedade e danos ao ambiente. Portanto, nesta dissertação o termo segurança crítica está sendo utilizado como substituição do termo inglês *safety*.

as decisões de direção seriam tomadas por sistemas embarcados nos veículos, que poderão ter uma maior consciência situacional para a tomada de decisão, considerando-se a interação que devem ter com equipamentos (sensores, LIDAR, entre outros) presentes nos veículos. Desta forma, os sistemas que controlam um determinado veículo poderiam se utilizar de informações para tomada de decisões sendo que, muitas vezes, tais informações são perdidas, ou ainda desprezadas, pelos motoristas devido a possíveis distrações, podendo, assim, controlar o veículo de uma maneira mais adequada.

O conceito de veículos autônomos não é novo, tendo em vista que se começou pensar nos mesmos há algumas décadas. Porém, foi após o projeto conhecido como DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) Urban Challenge que houve um maior interesse e investimento em veículos autônomos. Esse projeto foi o primeiro a propor que veículos autônomos fossem capazes de interagir com outros veículos, sejam eles autônomos ou não, e de tomar decisões complexas de direção com foco em segurança crítica (BERGER; RUMPE, 2012). Assim, nesse projeto (DARPA, 2016) os veículos tiveram tanto que respeitar as leis de trânsito quanto lidar com outros veículos presentes em sua rota.

No cenário atual, os veículos autônomos em desenvolvimento estão relacionados aos modelos de veículos apresentados no projeto DARPA. Assim, basicamente, são sistemas robotizados que interagem com o ambiente. Isto foi viabilizado devido ao avanço da tecnologia, especificamente nas áreas de robótica, de detecção (relacionada a sensores), de sistemas embarcados, de sistemas de navegação, entre outros (E. OHN-BAR; TRIVEDI, 2016), resultando no desenvolvimento de sensores de alta tecnologia, de câmeras e de radares que são utilizados para monitorar o veículo em questão, bem como o ambiente ao redor do mesmo.

Além disso, esses equipamentos propiciaram o desenvolvimento de sistemas avançados de assistência ao condutor (em inglês esses sistemas são conhecidos como DAS - *Driver Assistance Systems*) já presentes em alguns veículos não autônomos, como, por exemplo, sistemas de controle adaptativo de cruzeiro, sistemas de controle para manter o veículo dentro dos limites da faixa de uma estrada, sistemas de controle de freio de emergência, entre outros. Assim, se todos esses sistemas forem embarcados em um único veículo estaria-se próximo de se ter uma condução automatizada para diversas situações. Desta

forma, poderia se pensar que os veículos autônomos que estão sendo desenvolvidos são simplesmente o próximo passo do avanço tecnológico na área automobilística.

Porém, há uma diferença em se ter um veículo que possui diversos sistemas automatizados e um veículo autônomo no que diz respeito ao modo como tais sistemas possam garantir a segurança crítica, considerando a ocorrência de perigos, danos à propriedade e outros eventos indesejados. No caso dos sistemas automatizados, dirigir de forma segura é de responsabilidade do motorista o qual estará monitorando tanto o veículo quanto o ambiente. Já, com relação a um veículo autônomo, a responsabilidade de tomar decisões seguras passa do motorista ao fabricante do veículo (ADLER; FETH; SCHNEIDER, 2016). Sobre essa última questão há diversas discussões e controvérsias relacionadas a quem deve ser responsabilizado, quando um veículo autônomo se envolver em um acidente, assunto este que não faz parte do escopo desta dissertação.

Desta forma, os fabricantes precisam ter o conhecimento de como um veículo autônomo deve ser desenvolvido para que o mesmo possa atingir níveis adequados de segurança crítica. Porém, ainda não existe um padrão para o desenvolvimento e testes de tais veículos, gerando um desafio para essa área. Atualmente, existe um padrão internacional ISO 26262 para Sistemas Automotivos Elétrico/Eletrônicos que define características funcionais de segurança crítica para equipamentos automotivos aplicáveis ao longo do ciclo de vida de todos os sistemas automotivos elétricos e eletrônicos envolvidos na segurança crítica (ISO, 2017). No entanto, veículos autônomos não estão no escopo dessa norma.

A segurança crítica é uma importante propriedade em qualquer sistema, particularmente em sistemas de transporte como o STR, no qual existe interação entre veículos, motoristas, via e ambiente (entorno como obstáculos e pedestres). Assim, ao inserir veículos autônomos nesse sistema, pelo menos o mesmo nível de segurança crítica², que já é obtido quando se tem pessoas controlando diretamente o veículo, deve ser garantido. Como resultado, pesquisas vêm sendo desenvolvidas principalmente as relacionadas ao desenvolvimento de algoritmos de planejamento e controle que poderiam garantir a segurança crítica (PADEN et al., 2016) e as tecnologias que visam prevenir colisões, por

² Por nível de segurança crítica entenda-se como um esquema de classificação de risco definido pela ISO 26262. Ele é denominado *Automotive Safety Integrity Level* (ASIL) e é uma adaptação do *Safety Integrity Level* (SIL) utilizada na IEC 61508 para a indústria automotiva.

meio de sistemas de alerta longitudinais e laterais (BEVLY et al., 2016). Mesmo que a ideia proposta nessas pesquisas tenha tido a intenção de deixar o sistema de veículos autônomos mais seguros, nenhuma aborda de forma direta, qual seria a contribuição para melhorar os níveis de segurança dos veículos autônomos. (MOLINA et al., 2017[b])

Assim, uma proposta é a de se projetar um sistema de supervisão e controle que possa ser o responsável por controlar um veículo autônomo. Em outras palavras, um sistema que exerça as funções do motorista de uma maneira mais segura. Assim, além das funcionalidades básicas do motorista (controle e monitoramento do veículo), este sistema visa proporcionar uma proteção a ser implementada por uma camada responsável por garantir a segurança crítica para o veículo autônomo e seus ocupantes. Uma abordagem alternativa para garantir que tais veículos autônomos possam operar de forma segura, sem o conceito dessa camada de segurança, seria o de realizar um conjunto de testes extremamente grande e de execução muito extensa, considerando diversos cenários, abordando todas as situações que o veículo poderia encontrar no dia a dia, o que seria inviável na prática (KALRA; PADDOCK, 2016).

Assim, esse sistema possibilita a implementação de uma camada de proteção, a qual pode vir a ser o principal componente a ser testado e inspecionado, uma vez que será o responsável por garantir a segurança crítica de veículos autônomos. Tal redução de escopo e complexidade no sistema sob teste pode facilitar o processo de realização de testes. Esta ideia de se evitar a complexidade é um ponto relevante, uma vez que muitas das causas de situações inseguras surgem de características mal desenvolvidas e/ou avaliadas de sistemas complexos (CAMARGO; VISMARI, 2011).

1.2 OBJETIVO

Conforme apresentado na seção anterior tem-se a necessidade de assegurar que a inserção de veículos autônomos no sistema de tráfego rodoviário atual não vá interferir, no sentido de afetar negativamente segurança rodoviária presentemente observados. Assim, deseja-se avaliar se o sistema aqui proposto e denominado Controle Veicular Autônomo (CVA), tem a capacidade de manter ou mesmo melhorar os níveis de segurança crítica conseguidos sem o emprego dessa camada de supervisão e controle.

Espera-se que esse sistema possa proporcionar maior segurança ao veículo e a seus ocupantes quando comparada a um veículo autônomo que não utilize o sistema CVA. Essa

melhora na segurança tem origem no projeto de desenvolvimento do sistema CVA, no qual se separam, adequadamente, as funcionalidades do controle proposto, permitindo um maior domínio da missão operacional veicular.

O sistema CVA tem como característica principal a presença de uma camada de proteção, denominada Proteção Veicular Autônoma (PVA) ou seja, ela vai ser inserida conjuntamente com os sistemas responsáveis pelo controle do veículo, e estará sempre monitorando o ambiente ao redor do veículo e o status do mesmo, a fim de identificar e de evitar eventos e/ou condições perigosas.

Outra camada presente no sistema CVA, cujas funções são operacionais, ou seja, cuidar da condução do veículo, é a camada de operação denominada Operação Veicular Autônoma (OVA).

Assim, esta dissertação tem como objetivo primordial apresentar o projeto, implementação e testes do sistema CVA e de suas camadas componentes, ou seja, PVA e OVA, com base no controle adequado para um veículo autônomo. Inserido nesse objetivo, está a avaliação do sistema CVA, verificando-se se tal sistema consegue evitar situações de colisão em cenários variados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este texto está estruturado com base em 7 capítulos.

O Capítulo 2 descreve o método científico empregado neste trabalho, apresentando como foi feito seu desenvolvimento.

O Capítulo 3 aborda a revisão bibliográfica, contemplando os principais conceitos relacionados aos veículos autônomos e, também, apresenta o estado da arte, considerando o objetivo proposto neste trabalho.

O Capítulo 4 aborda a proposta desta dissertação, apresentando detalhes sobre o sistema de Controle Veicular Autônomo (CVA), juntamente com suas duas camadas, Proteção Veicular Autônoma (PVA) e Operação Veicular Autônoma (OVA).

O Capítulo 5 apresenta os conceitos utilizados para se desenvolver o ambiente de simulação. Assim, os elementos do STR que foram utilizados e as interações entre estes são apresentados a fim de descrever como o STR foi modelado.

O Capítulo 6 apresenta o Estudo de Caso considerado para a realização de testes do sistema CVA. Assim, nesse capítulo apresenta-se o cenário utilizado, os testes realizados e seus resultados.

O Capítulo 7 apresenta a conclusão deste trabalho científico e descreve possíveis trabalhos futuros.

O Apêndice A apresenta os códigos-fonte utilizados na implementação do sistema CVA.

Finalmente, o Apêndice B apresenta algumas tabelas de dados dos resultados obtidos nos testes do sistema CVA.

2 METODOLOGIA

A fim de atingir o objetivo proposto deste trabalho, primeiramente foi especificado o sistema Controle Veicular Autônomo (CVA), tendo como foco o comportamento das camadas PVA e OVA e o fluxo de informação entre os sistemas do veículo e das camadas em questão. Em seguida, o sistema CVA foi implementado em um ambiente de simulação de tempo real e foram feitos testes para avaliar o seu comportamento (especificamente da camada de proteção PVA) considerando uma situação relevante de perigo do STR. A situação de perigo em questão consiste no surgimento de obstáculos na trajetória de um veículo autônomo. Tal situação foi escolhida devido a ocorrência da mesma no cenário do STR, a acidentes (com veículos autônomos) que já foram ocasionados pelo surgimento de obstáculos na rota de veículos autônomos e, também, ao fato de que tal situação permite que o sistema CVA (especificamente o PVA) seja analisado adequadamente.

Em paralelo ao desenvolvimento do sistema CVA, foi projetado o ambiente de simulação para a realização dos testes. O mesmo foi implementado em um framework desenvolvido em um projeto de pesquisa executado em parceria com a Ericsson Research intitulado *"Safety and Resilience in Automotive Cyber-Physical Systems"*.

O projeto de pesquisa em questão consistiu no desenvolvimento de um framework que permite analisar a segurança crítica de veículos autônomos baseada em simulação. Em outras palavras, o framework consiste de um ambiente de simulação desenvolvido que permite avaliar o algoritmo de controle de um ou mais veículos autônomos considerando situações de tráfego específicas.

Tal framework foi desenvolvido de maneira a permitir abordagens baseadas em simulações em tempo real e tempo acelerado. De acordo com Molina et al. (2017[a]), foram escolhidos softwares para permitir ambas abordagens de simulação, os quais foram escolhidos devido a alguns critérios como disponibilidade de código-fonte, presença de características relacionadas ao transporte rodoviário, entre outras.

No trabalho de mestrado em questão, optou-se por realizar testes utilizando uma abordagem de tempo real, uma vez que nela é possível avaliar com maior riqueza de

detalhes o funcionamento do CVA. Assim, dentre os submódulos do framework³, foi utilizado o submódulo responsável pela realização de simulações de cenários do STR sobre o contexto de Sistemas de Transporte Inteligentes (STI) em tempo real. Tal submódulo foi implementado no simulador de direção *open-source* chamado OpenDS e no software Matlab. Assim, os testes do CVA utilizaram o OpenDS e o Matlab, os quais foram adaptados a fim de permitirem a realização adequada dos testes.

No desenrolar desta dissertação, a implementação do CVA constou do desenvolvimento dos seguintes itens:

- Adaptação e Simulação da via (ambiente), na ferramenta OpenDS;
- Estruturação do Matlab, considerando métodos de entrada e saída (necessário para viabilizar a implementação do CVA);
- Desenvolvimento do motorista autônomo por meio das camadas PVA e OVA, no software Matlab;
- Mecanismo de troca de mensagens entre a ferramenta OpenDS e o software Matlab;
- Controle do veículo autônomo na ferramenta OpenDS, de acordo com comandos emitidos pelo sistema CVA (presente no Matlab);
- Geração de relatórios, na ferramenta OpenDS;

A fim de avaliar se o sistema CVA consegue prevenir acidentes, o mesmo precisa estar inserido em um ambiente real do sistema de transporte. Assim, o código fonte da ferramenta OpenDS (já alterado na implementação do framework), sofreu alterações (listadas anteriormente) para que fosse possível modelar adequadamente um cenário do STR, pertencente a um determinado Estudo de Caso, o qual possui uma especificação para o ambiente no qual o veículo trafega e para o veículo autônomo.

A Figura 1 representa o ambiente de simulação desenvolvido, o qual viabilizou o desenvolvimento dos testes. Nela é possível observar que os elementos do STR (demais veículos e ambiente) estão presentes na ferramenta OpenDS, constituindo o cenário em

³ O foco deste trabalho não é apresentar o framework desenvolvido, assim para fins didáticos serão apresentadas (na seção 5.1) somente as atividades desenvolvidas pelos submódulos do framework que estão diretamente relacionadas ao ambiente de simulação adaptado para a realização de testes deste trabalho.

questão (conforme especificado no Estudo de Caso), e que o motorista autônomo, o qual pode ou não ser representado pelo sistema CVA, está presente no software Matlab.

Desta forma, inicialmente, inseriu-se um veículo autônomo com um controle autônomo diferente do proposto pelo sistema CVA⁴, considerando um cenário específico, tendo sido analisados os pontos em que ocorrem situações de perigo e até mesmo colisões. Em seguida, inseriu-se o mesmo veículo autônomo com o sistema CVA, procedendo-se à análise de como o mesmo se comporta nas mesmas situações de perigo e, até mesmo, se novas situações e/ou colisões ocorrem.

Em ambos os casos mencionados (veículo autônomo com o sistema CVA e veículo autônomo com um sistema que não possui a mesma arquitetura do CVA - em outras palavras, um sistema que não possui uma camada extra de proteção) foram inseridas falhas que aumentam o risco de colisão. Tais falhas foram obtidas a partir de um levantamento das principais falhas que podem levar a uma colisão. O objetivo de inserir falhas é observar se o PVA (camada de proteção do CVA) consegue evitar colisões ou mitigá-las nessas situações.

Por fim, é feita uma comparação entre o número de colisões observadas nas duas configurações de controle do veículo autônomo, com dados obtidos a partir dos resultados do Estudo de Caso. Assim é possível analisar se o sistema CVA consegue prevenir acidentes em situações em que o controle é realizado sem a camada de segurança (PVA) e posteriormente com essa camada.

⁴ O controle autônomo considerado é desempenhado pelo algoritmo denominado A²CPS Engine (NAUFAL et al., 2017), (VISMARI et al., 2018[b]).

Figura 1 - Ambiente de simulação

Fonte: Desenvolvido pela autora.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao se falar em veículos autônomos existem importantes conceitos envolvidos. Um conceito importante para este trabalho é o que diz respeito aos Sistemas de Transportes Inteligentes – STI (em inglês *Intelligent Transportation Systems* - ITS), uma vez que o sistema de transporte rodoviário considerado neste trabalho está sobre o contexto de STI. Assim, este capítulo apresenta tal conceito e outros conceitos relacionados a veículos autônomos, como: uma visão geral sobre a definição e concepção de veículos autônomos.

Além disso, para melhor compreensão do sistema CVA proposto neste trabalho, são apresentadas, também, algumas características sobre o Controle Automático de Trens (em inglês *Automatic Train Control* - ATC), o qual influenciou no desenvolvimento do sistema CVA.

3.1 VEÍCULOS AUTÔNOMOS – VISÃO GERAL

Tem se observado que uma das tendências da tecnologia automotiva é o fato de a mesma introduzir nos veículos um comportamento autônomo. Este avanço tecnológico quanto ao sistema de transporte automotivo traz esperanças relacionadas ao fato de que tal avanço poderá proporcionar uma nova qualidade de tráfego, incluindo uma condução mais segura, confortável e eficiente. (ÖZGÜNER; REDMILL; STILLER, 2007)

Desta forma, os veículos estão evoluindo, a partir de um sistema físico baseado nas leis da mecânica, da física e da química, para um sistema mais sofisticado denominado Sistema Ciberfísico Automotivo (em inglês *Automotive Cyber Physical Systems* - ACPS). Assim, de acordo com Khaitan e McCalley (2015), os veículos modernos são sistemas ciberfísicos, os quais proporcionam informação, entretenimento, gerenciam o consumo de energia e o movimento do veículo.

Neste contexto, os sistemas em desenvolvimento fazem com que o veículo se torne cada vez mais capaz de desempenhar as mesmas funções e ações que os motoristas humanos sempre executaram. Assim, de acordo com Özgüner, Redmill e Stiller (2007), pode-se citar um exemplo de um conjunto de capacidades que são fundamentais para o comportamento autônomo e, assim deverão estar presentes em tais veículos:

- Mudança de pista/faixa;
- Paradas de emergência;

- Mitigação de colisões
- Evasão de obstáculos; e
- Controle de tráfego.

Os sistemas ciberfísicos automotivos requerem transferência de conhecimento e cooperação entre diversas áreas de conhecimento, como controle, redes de comunicação e dispositivos físicos. Assim, podem ser classificados como uma rede complexa de sistemas embarcados. Além disso, esses sistemas reúnem modelos discretos de controle e modelos contínuos baseados no mundo físico. Desta forma, é necessário lidar não apenas com os requisitos em tempo real, mas também com os requisitos relacionados à natureza contínua. (ZHANG, 2013)

Dada a complexidade de tais sistemas, há muita especulação sobre o impacto dos mesmos. Acredita-se que os veículos autônomos podem reduzir consideravelmente o tráfego, custos de estacionamento, acidentes e emissão de gases poluentes (LITMAN, 2014). Além disso, eles podem ampliar os sistemas de mobilidade sob demanda, permitindo-se viajar automaticamente entre locais de alta demanda (CAMPBELL et al., 2010).

Assim, devido aos benefícios substanciais que os veículos autônomos podem vir a proporcionar, seu desenvolvimento tem atraído o interesse de muitas áreas, notadamente o da indústria automotiva.

Vários projetos, como o projeto da Google (*Google Self-Driving Car*⁵), foram realizados por empresas globais, visando desenvolver seus primeiros protótipos de carros autônomos ou semiautônomos. Alguns destes veículos já são capazes de trafegar no trânsito comum, ainda sob supervisão humana, coletando dados para melhorar seu funcionamento. No entanto, a segurança crítica é uma das principais preocupações nesta área, uma vez que a abordagem utilizada para o desenvolvimento de tais veículos não parece estar sendo eficiente na garantia de segurança crítica. Isto se deve ao fato da ocorrência de acidentes

⁵ Mais informações podem ser obtidas no site <<https://waymo.com>>

como, por exemplo, o envolvendo o veículo da Tesla⁶ e outro envolvendo o do Uber⁷. Assim, existem pontos que precisam ser melhor estudados.

3.2 SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES (STI)

Sistemas de Transporte Inteligente são sistemas que integram telecomunicações, eletrônica e tecnologia da informação com engenharia de transporte a fim de planejar, operar, manter e gerir sistemas de transporte. O interesse no desenvolvimento e na pesquisa sobre tais sistemas tem crescido significativamente desde os anos 1990s. Naquele tempo, as discussões relacionadas ao STI eram focadas nos Estados Unidos, na Europa Ocidental (Projeto Prometheus) e no Japão (Projeto AMTICS e RACS). Tais discussões foram motivadas pelos problemas de transporte, os quais eram em sua maioria relacionados a atrasos no tráfego rodoviário e a problemas de segurança crítica (SUSSMAN, 2005).

Atualmente, alguns módulos do STI estão em desenvolvimento e implantação. Por exemplo, transmissão de informações seguras, gerenciamento de rotas de acordo com as condições de tráfego em tempo real, prevenção de colisões e condução autônoma (QU; WANG; YANG, 2010).

Portanto, veículos autônomos estão relacionados ao contexto de STI. Assim, neste trabalho este contexto será considerado, principalmente no que diz respeito em como modelar o sistema de transporte atual sob o contexto do STI, conforme descrito na seção 5.1.

3.3 SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES DOS EUA

O Sistema de Transporte atual dos EUA foi modelado levando em conta o conceito de STI. Assim, existem iniciativas tanto do Departamento de Transporte dos Estados Unidos da América (*DoT USA*), quanto da Europa (*FRAME*). As duas arquiteturas são muito parecidas, porém a dos EUA está bem mais completa que a da Europa. Portanto, neste trabalho a arquitetura⁸ que foi considerada é a dos EUA.

⁶ Link para detalhes do acidente envolvendo o veículo da Tesla: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/HWY18FH011-preliminary.pdf>

⁷ Link para detalhes do acidente envolvendo o veículo do Uber: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/HWY18MH010-prelim.pdf>

⁸ A arquitetura STI dos EUA foi atualizada recentemente (por volta de julho de 2017), porém a que está sendo considerada é a anterior a esta atualização (disponível em julho de 2016).

As informações sobre a arquitetura STI dos EUA foram obtidas no site oficial do Departamento de Transporte dos EUA. A estrutura da mesma, assim como sua terminologia são diferentes daquelas que normalmente são usadas na comunidade de transporte. Esta arquitetura pode ser observada na Figura 2.

A arquitetura apresentada contém três camadas: institucional, de transporte e de comunicação.

Figura 2 - Arquitetura do STI dos EUA

Fonte: Desenvolvido pela autora baseada na imagem do site oficial do DoT dos EUA.

A camada Institucional é apresentada como a camada inferior, porque inclui as instituições, políticas, mecanismos de financiamento e processos necessários para a efetiva implementação, operação e manutenção de um STI. Portanto, é nesta camada que são definidos os Serviços dos Usuários (*User Services*), os quais representam o que o sistema fará a partir da perspectiva do usuário. Estes são importantes porque contêm o conjunto completo de requisitos de serviço do usuário e, com isso, é possível relacionar estes requisitos com os componentes adequados da arquitetura.

A camada de Comunicação define uma descrição geral dos serviços de comunicações que são suportados no STI. Estes podem ser: ponto-fixo a ponto-fixo, wireless, veículo a veículo e veículo a via.

Por fim, a camada de Transporte define os serviços de transporte em termos dos subsistemas, interfaces, funcionalidade e definições de dados, os quais são necessários para cada serviço de transporte. Em outras palavras, define as funções que são executadas, os subsistemas que fornecem essas funções e as interfaces que são necessárias para apoiar os Serviços dos Usuários.

Os elementos pertencentes à camada de Transporte são:

- A arquitetura lógica define os processos funcionais e os fluxos de informação do sistema para satisfazer os Serviços dos Usuários. Em outras palavras, é uma ferramenta que auxilia na organização de entidades e relações complexas .
- A arquitetura física define os subsistemas e interfaces. Assim, ela fornece a ação física de como o sistema deve fornecer a funcionalidade necessária. Neste contexto, existem Pacotes de Equipamento (*Equipment Packages*) que agrupam as funções de um subsistema específico em um pacote implementável de recursos de hardware e software.
- O pacote de serviços (*Service Packages*) fornece um menu dos serviços de transporte prestados. Eles representam fatias da arquitetura física que abordam serviços específicos, por exemplo, o controle de uma rua. Assim, eles relacionam diferentes entidades físicas, seus objetos funcionais e fluxos de informação que proporcionam um determinado serviço.

Além dos subsistemas, a camada de Transporte também define terminadores (*Terminators*) que representam outros sistemas (sistemas fora do STI que não contêm objetos funcionais), pessoas e condições físicas com os quais o Sistema de Transporte deve fazer interface. Estes descrevem as funções que são definidas na arquitetura STI e as que estão fora do seu âmbito.

Nesta arquitetura estão definidos 22 subsistemas e 76 terminadores⁹, os quais pertencem à arquitetura física e podem ser compreendidos como sendo os elementos do STR no contexto STI. Os subsistemas implementam as funções definidas nessa arquitetura (funções que representam o funcionamento adequado de um STR), já os terminadores representam as funções inerentes a sistemas externos a essa arquitetura. Estes dois tipos de componentes (subsistemas e terminadores) são denominados entidades.

As entidades são agrupadas em quatro classes:

- Centro de controle: fornece gestão, administração e suporte para o sistema de transporte;
- Campo (via): fornece a interface direta com a rede viária, veículos viajando na rede viária e os viajantes em trânsito. Apoiam a vigilância direta, a prestação de informações e a execução do plano de controle no sistema de transporte;
- Veículo: inclui todos os veículos e compartilha informações;
- Viajante (*Traveler*): inclui o equipamento que normalmente é de propriedade e operado pelo viajante.

Os grupos (classes) apresentados acima foram criados na arquitetura para organizar adequadamente seus elementos (entidades, objetos funcionais, fluxos de informação, etc.). Desta forma, pode-se concluir que a arquitetura proposta pelo DoT considera que o STR é constituído por Veículos, Centros de controle, Vias e Viajantes. Assim, a partir destes grupos é possível detalhar níveis mais baixos da arquitetura a fim de conhecer a implementação e abordagem adequada para cada um dos grupos em questão.

Vale ressaltar que as definições apresentadas foram utilizadas para criar o ambiente de simulação, estabelecendo a adequada interação entre os elementos (veículos, vias, ambientes e motoristas) considerados.

3.4 CONTROLE AUTOMÁTICO DO TREM - "MOLDE" PARA O SISTEMA CVA

Para propor o sistema CVA tomou-se como base o domínio do transporte ferroviário. Nele, aplica-se um conceito denominado Controle Automático de Trem (em inglês

⁹ Não foi possível representar todos os subsistemas e terminadores na Figura 2. Porém, os que foram considerados neste trabalho (veículo, ambiente e motorista) são explicados na seção 5.

Automatic Train Control - ATC), que é um sistema que controla automaticamente o movimento de trens, tanto na aplicação da segurança dos trens quanto no gerenciamento de seu movimento.

De acordo com IEE (2017), o ATC inclui um subsistema chamado de Proteção Automática de Trem (PAT) (do inglês *Automatic Train Protection* – ATP), que é responsável por manter a proteção contra falhas que podem levar a colisão, velocidade excessiva e outras condições perigosas. Além disso, o sistema ATC também pode incluir a Operação Automática de Trem (OAT) (do inglês *Automatic Train Operation* – ATO) e/ou a Supervisão Automática de Trem (SAT) (do inglês *Automatic Train Supervision* – ATS). O OAT é responsável por executar qualquer ou todas as funções de regulação de velocidade, parada programada e outras funções atribuídas ao operador humano de trens.

O SAT monitora os trens, ajusta o desempenho dos trens para manter os horários e fornece dados para ajustar o serviço para minimizar inconvenientes causados por irregularidades.

Note-se que esses sistemas não interferem no desenvolvimento do material rodante (chamado *Rolling Stock*, composto por vagões, sistemas de propulsão e freio, interface homem-máquina (em inglês *Human Machine Interface* - HMI), sistema de gerenciamento de portas, etc.). A Figura 3 apresenta uma simplificação da correlação de tais sistemas. Desta forma, o sistema ATC está adaptado para controlar o comboio de forma segura, considerando os vários aspectos (proteção, operação e supervisão) já apresentados. Diferente do ATC, o sistema CVA não tem uma camada correspondente ao SAT e, nem exige atuador independente. Este último item poderá ser avaliado e trabalhos futuros.

Figura 3 - Esquema simplificado dos sistemas do trem

Fonte: Desenvolvido pela autora.

4 PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO – O SISTEMA CVA

A proposta apresentada neste capítulo foi introduzida pela autora no artigo (MOLINA et al., 2017[b]). Detalha-se o sistema Controle Veicular Autônomo - CVA e suas respectivas camadas, Proteção Veicular Autônoma - PVA e Operação Veicular Autônoma - OVA.

Além disso, ao final do capítulo apresenta-se a implementação do sistema CVA. Desta forma, este capítulo está subdividido em duas partes: a primeira que descreve, em detalhes, a arquitetura do CVA e a segunda que apresenta a implementação de tal sistema.

4.1 DETALHAMENTO CONCEITUAL DO SISTEMA CVA

Esta seção descreve, primeiramente, o sistema CVA como um todo, para, em seguida, especificar cada uma de suas camadas (PVA e OVA).

4.1.1 CONTROLE VEICULAR AUTÔNOMO - CVA

Uma das principais preocupações que se tem ao se falar em veículos autônomos é se os mesmos serão seguros o suficiente para poderem trafegar livremente. Assim, um dos pontos críticos é como eles vão se comportar ao se depararem com situações de perigo, as quais podem ser ocasionadas pelo próprio sistema, uma vez que sistemas complexos (como é o caso em questão) podem apresentar um comportamento de difícil previsão. Assim, os veículos autônomos devem ser capazes de identificar o estado dos elementos pertencentes às situações mais críticas para que, quando estiverem em tais situações, consigam identificá-las e contorná-las, a fim de não causar danos às pessoas e ao ambiente.

No caso de haver falhas no sistema, entende-se como falha segura quando a falha do sistema não causa danos aos passageiros nem ao ambiente ao redor do veículo autônomo que falhou. Em outras palavras, veículos autônomos devem estar preparados para lidar com situações anormais e inesperadas. Tais situações podem ser geradas devido a falhas no veículo, podendo então ocasionar um problema em alguma de suas funcionalidades. Outro possível motivo para a ocorrência de problemas está em mudanças no ambiente ao redor do veículo com as quais o mesmo não esteja preparado para lidar. Assim, como contornar tais situações sem deixar o sistema mais complexo ainda?

No cenário atual quando uma situação perigosa acontece, o responsável por tirar o veículo desta situação é o motorista, mesmo se o veículo tiver algum nível de automação. Assim, é o motorista quem tem a missão de controlar, adequadamente, o veículo, sendo ele

quem monitora e detecta possíveis problemas de segurança crítica (ou operação anormal), tanto no sistema veicular quanto no ambiente ao redor do mesmo. Desta forma, ao se falar em veículos totalmente autônomos, o motorista autônomo ou condutor deve existir uma vez que a relação, principalmente, entre veículo e motorista já existente no sistema de transporte rodoviário atual, deverá continuar a mesma¹⁰. Porém o condutor que monitorará o ambiente e o veículo autônomo, e que controlará este último vai ser representado por um sistema (máquina).

Propõe-se, então, a criação de um sistema denominado Controle Veicular Autônomo (CVA), o qual será responsável por controlar o veículo. Em outras palavras, ele executará as funcionalidades de um motorista em um veículo totalmente autônomo. Vale ressaltar que, de acordo com SAE INTERNACIONAL (2017), existem 6 possíveis níveis de automação (denotados de 0 - 5¹¹), porém este trabalho considera o nível 5 de automação, no qual não há nenhuma interação humana.

O sistema CVA é composto por duas camadas hierárquicas, na qual uma dessas camadas é a responsável por proteger o veículo em movimento e controlá-lo em situações de perigo. O sistema CVA é análogo ao conceito do Controle Automático de Trens, o qual foi brevemente apresentado no Capítulo 4.

Conforme mencionado, a abordagem presente no sistema de Controle Automático do Trem para os sistemas de transporte ferroviário é aplicável para os veículos rodoviários autônomos. Desta forma, um veículo rodoviário autônomo seria formado pelo veículo (equipado com sensores, e/ou radares, e/ou LIDAR) e pelo motorista autônomo, o qual é representado pelo sistema CVA. Assim, o sistema CVA precisa ser capaz de realizar as atividades básicas de um motorista comum, ou seja, deve conseguir planejar a rota do

¹⁰ A ideia apresentada não é a de que não haverá mudanças. Com a inserção de veículos autônomos haverá mudanças relacionadas, por exemplo, à propriedade do veículo, ao modelo de negócio dos veículos autônomos e, até mesmo, ao papel do veículo. Porém, a argumentação apresentada neste trabalho é a de que os algoritmos de controle terão que exercer as funções do motorista, desta forma haverá um "motorista" (seja ele constituído por um sistema computacional ou não) e haverá um veículo, o qual vai se comunicar e responder a ações deste motorista. Esta interação veículo-motorista já é presente em veículos não autônomos e, provavelmente, estará presente em veículos autônomos.

¹¹ Os níveis definidos pela SAE são: 0 - Sem automação de direção; 1 - Assistência ao condutor (*Driver Assistance*); 2 - Automação de direção parcial; 3 - Automação de direção condicional; 4 - Automação de direção elevada; 5 - Automação de direção completa.

veículo, controlá-lo adequadamente e monitorar o sistema veicular e o ambiente sem que seja necessária nenhuma intervenção humana.

Um aspecto relevante sobre o sistema CVA é que o mesmo pode ser utilizado independentemente de como outros sistemas veiculares tenham sido desenvolvidos, uma vez que o CVA requer somente a velocidade do veículo autônomo, a posição do veículo, a rota que o veículo precisa seguir e a posição dos obstáculos ao redor do veículo (obstáculos que podem ser detectados pelo mesmo), os quais serão utilizados para controlar o veículo adequadamente e de uma maneira segura.

Considerando a arquitetura do sistema CVA, ele contém duas camadas: uma relacionada com a parte operacional (Operação Veicular Autônoma – OVA) do veículo e a outra responsável por proteger o estado do veículo e de seus passageiros (Proteção Veicular Autônoma - PVA). Assim, ele separa a camada de proteção da camada de operação o que pode facilitar o desenvolvimento de veículos autônomos, uma vez que toda a inteligência não vai estar distribuída no veículo e sim organizada no sistema CVA.

Desta forma, o sistema CVA é formado pelas camadas Operação Veicular Autônoma (OVA) e pela Proteção Veicular Autônoma (PVA). A camada OVA é responsável pela navegação do veículo, por controlar a direção e corrigir a velocidade. Já, a camada PVA monitora as variáveis do sistema que estão diretamente relacionadas com a segurança crítica do mesmo (por exemplo, a velocidade do veículo), e verifica se estas excedem seus respectivos limites de segurança (no caso da velocidade, a mesma poderia exceder a velocidade máxima da via).

A camada PVA deve levar o veículo a um estado seguro (por exemplo, reduzindo a sua velocidade). Vale ressaltar que a camada OVA tem a funcionalidade capaz de reduzir a velocidade do veículo (colocando-o em um estado livre de colisões), porém existem situações em que os algoritmos que representam tal camada são ineficazes na detecção da necessidade de redução de velocidade, seja por uma falha ou por um erro no código. Em tais situações a camada PVA vai ser acionada, já que a mesma monitora o sistema veicular e, caso detecte alguma situação de falha, o leva ao estado seguro. Um outro ponto com relação ao PVA é que o mesmo interage com subsistemas independentes aos do OVA (como por exemplo, o subsistema de sensoriamento) e, isto, permite assegurar que erros que ocorram nos subsistemas do OVA não atinjam o PVA.

Desta forma, a camada PVA está sempre monitorando elementos, tanto internos, quanto externos ao veículo, a fim de detectar situações (problemas e falhas) perigosas e, ao detectar tais situações, levar o veículo a um estado seguro.

A Figura 4 apresenta um esquema do sistema descrito. Nela é possível observar que ambas as camadas (OVA e PVA) recebem dados provenientes do veículo e sobre o ambiente e o seu estado e, depois de processá-los e analisá-los, enviam comandos de controle ao veículo.

Figura 4 - Representação básica do sistema CVA interagindo com outros elementos do STR

Fonte: Desenvolvido pela autora.

4.1.2 DETALHAMENTO DAS CAMADAS: PVA E OVA

Um ponto importante diz respeito aos subsistemas presentes em cada uma das camadas do sistema CVA. Na seção anterior foi apresentada a função básica destas camadas. Assim, nesta seção apresenta-se quais subsistemas estão presentes em cada uma delas, considerando os subsistemas elementares presentes em um veículo autônomo. A ideia é que esses subsistemas sejam considerados no desenvolvimento de tais camadas, uma vez que o sistema CVA deve conseguir desempenhar as funções básicas já presentes em um veículo autônomo.

De acordo com CAMPBELL et al. (2010), alguns veículos autônomos decompõem suas arquiteturas em quatro subsistemas básicos:

- Subsistema de sensoriamento: obtém as medições de dados "brutos" que serão utilizados para fazer com que o sistema veicular perceba o ambiente ao redor do mesmo.
- Subsistema de percepção: gera informações utilizáveis sobre o veículo e seus arredores.
- Subsistema de planejamento: lida com planejamento de trajetórias, mapas e comportamento.
- Subsistema de controle: é o responsável por emitir comandos que conduzem o veículo.

Desta forma, as funcionalidades de cada um desses subsistemas devem ser consideradas ao se desenvolver o sistema CVA (camadas PVA e OVA). Assim, as funcionalidades foram alocadas em cada uma das camadas (considerando a função básica das mesmas) da seguinte forma (esquema presente na Figura 5):

- OVA é a camada que interpreta os dados que são provenientes do subsistema de sensoriamento que está embarcado no veículo (funcionalidade do subsistema de percepção), determina a rota do veículo e as eventuais manobras a partir da interpretação dos dados (funcionalidade do subsistema de planejamento) e envia comandos ao veículo (funcionalidade do subsistema de controle). Os comandos que são enviados ao veículo são relacionados a novos valores de aceleração, e/ou novos valores de frenagem, e/ou novos valores de coeficientes angulares (utilizados nas manobras).
- PVA é a camada que monitora o ambiente por meio de um subsistema de sensoriamento independentemente do que é utilizado na camada OVA. A camada PVA obtém os dados necessários que permitem que ele observe os elementos que podem levar a situações inseguras, como, por exemplo, as condições de tráfego e o clima. Assim, observando tais elementos ele consegue impor ações restritivas ao movimento do veículo sempre que um problema de segurança for detectado. Desta forma, a camada PVA também consegue enviar comandos ao veículo.

Figura 5 - Representação do CVA

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Pode-se observar que as camadas OVA e o PVA são independentes. No entanto, como a camada PVA efetua a proteção, os comandos provenientes desta camada são prioritários. Além disso, é importante mencionar que a camada PVA não fica constantemente enviando comandos ao veículo, ela só o faz quando detecta algum problema que pode colocar em risco o veículo e seus passageiros. Acredita-se que não só o veículo e seus passageiros devem estar seguros, mas, também, o veículo não pode gerar situações que afetem, negativamente, o ambiente ao seu redor. Porém, ao considerar este último aspecto o comportamento da camada PVA fica um pouco mais complexo. Desta forma, neste trabalho de mestrado este aspecto não é considerado.

A Figura 6 e a Figura 7 apresentam em detalhes a estrutura das camadas PVA e OVA, respectivamente. Nessas figuras é possível observar que a camada PVA (Figura 6) foi desenvolvida com base em verificação de condições simples (possui situações específicas

nas quais é ativado). Além disso, é possível observar, também, que a mesma só emitirá comandos ao veículo se detectar algo errado em seu funcionamento. As demais funcionalidades estão de acordo com a Figura 5.

Analisando a Figura 7 é possível observar que, diferentemente da Figura 6, a camada OVA sempre emitirá comandos ao veículo. Porém, antes destes comandos serem enviados ao veículo, há uma verificação para decidir qual dos comandos obtidos (provenientes tanto do PVA quanto do OVA) devem ser enviados ao veículo. Esta verificação é simples e nela é observado se existem comandos do PVA; caso exista, esses comandos são enviados ao veículo (comandos prioritários), caso contrário, os comandos do OVA são, então, enviados ao veículo. As demais funcionalidades apresentadas na Figura 7 estão de acordo com a Figura 5.

Figura 6 - Detalhamento da camada PVA

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Figura 7 - Detalhamento da camada OVA

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Neste contexto, a camada PVA sempre deve proteger o veículo independente de como a camada OVA tenha sido desenvolvida (os algoritmos podem variar). Assim, a camada PVA deve ser segura e confiável. Desta forma, na aquisição de dados da camada PVA deve haver equipamentos mais confiáveis e até redundância quando comparado aos demais

sistemas do veículo. Portanto, o processo de desenvolvimento da camada PVA deve atingir altos níveis de segurança¹².

A Figura 8 apresenta o fluxo de dados entre os subsistemas presentes, tanto nas camadas do sistema CVA, quanto no veículo. Um ponto importante está relacionado com as mensagens de comando que são enviadas pelas camadas PVA e OVA (tanto as que vão para o subsistema de aceleração e frenagem, quanto as que vão para o de controle de direção). As duas camadas são capazes de influenciar o controle do veículo (conforme observado na Figura 6 e na Figura 7), porém em situações distintas.

Os comandos da camada OVA são baseados na rota do veículo e na presença de obstáculos ao longo dessa rota. Assim, as mensagens que são enviadas pela camada OVA são para fazer com que o veículo navegue corretamente. Já, no caso da camada PVA, ela vai estar monitorando o ambiente e o veículo para detectar se algum deles está em um estado que não foi previsto pela camada OVA - por exemplo, um pedestre que se encontra em uma área indevida. Assim, ao detectar uma situação insegura, a camada PVA envia mensagens que acionam os freios do veículo ou que levam a uma manobra. Em outras palavras, o ambiente e o estado (velocidade e direção) do veículo serão sempre verificados para se determinar se não estão inseridos em uma situação que pode levar a um perigo e, caso estejam, a camada PVA assume o controle do veículo.

A partir do detalhamento das camadas PVA e OVA é possível perceber que, ao menos conceitualmente, o sistema CVA conseguiria exercer as funções básicas necessárias para controlar adequadamente um veículo autônomo.

Por fim, vale salientar que a partir da Figura 8 é possível determinar as informações necessárias para o funcionamento adequado do sistema CVA. Este conhecimento é importante uma vez que foi considerado na implementação do sistema CVA.

¹² Conforme mencionado anteriormente, os níveis de segurança dos veículos autônomos são representados pelo ASIL. De acordo com Salay et al. (2017), existem 4 níveis (ASIL A, ASIL B, ASIL C e ASIL D). Ao se falar em veículos autônomos provavelmente será considerado ASIL C ou ASIL D dependendo do nível de automação.

Figura 8 - Fluxo de dados entre as camadas OVA e PVA e subsistemas do veículo

Fonte: Desenvolvido pela autora.

4.1.3 PROTEÇÃO VEICULAR AUTÔNOMA - PVA

Um último ponto a ser tratado nesta seção é com relação à camada PVA. A ideia de se ter, em um sistema veicular autônomo, uma camada de proteção não é nova, ela já foi abordada em um outro trabalho como sendo o supervisor de segurança crítica (*safety supervision*) (ADLER; FETH; SCHNEIDER, 2016). Na referência tal supervisor é responsável por detectar maus funcionamentos e ativar uma manobra de risco mínimo (por exemplo, uma parada de emergência). Assim, trata-se de identificar os maus funcionamentos, os quais foram definidos pelo autor como sendo uma combinação de comportamento veicular e condição do ambiente. Por exemplo, o fato de o veículo estar com uma velocidade alta (não maior que a permitida) não é necessariamente uma situação de perigo, porém se ele estiver com tal velocidade em uma via com tráfego intenso pode ser um perigo. Portanto, a camada PVA que tem função similar ao *safety supervision* e por meio do estado dos elementos (tanto externos quanto internos) identifica maus funcionamentos.

Para identificar se os maus funcionamentos foram levantados, assim como possíveis comportamentos veiculares e estados do ambiente, estudou-se quais poderiam levar a eventos perigosos, no caso a uma colisão. Após analisadas, percebeu-se que algumas situações só eram diferentes umas das outras devido à ação da camada PVA, a qual em alguns casos se preocuparia em manter a segurança externa ao veículo. Porém, como a camada PVA (a princípio) só vai manter a segurança veicular interna (em outras palavras: proteger sempre os passageiros do veículo em questão), ou seja, se ele tiver que parar para evitar um perigo é responsabilidade dos demais veículos ao seu redor de parar. Em outras palavras, a camada PVA não vai se preocupar que esta parada repentina possa causar situações de perigo para demais veículos¹³. Sendo assim, em muitas das situações os elementos que levam a um perigo e que precisam ser monitorados são os mesmos.

A fim de se ter uma melhor compreensão do que deve ser monitorado foi feita uma árvore de falhas (Figura 9), a qual apresenta os estados de falha dos elementos que podem gerar uma colisão. Esta árvore de falhas foi importante na implementação do PVA, uma vez que os eventos topo dessa árvore são os que foram monitorados pelo PVA.

De acordo com a Figura 9, os dois principais elementos que precisam ser monitorados são a distância do veículo em relação a um determinado obstáculo e a velocidade do veículo, os quais se combinados podem levar a uma colisão. Continuando a análise da árvore da Figura 9, percebe-se, também, que muitos fatores podem fazer com que tais elementos sejam violados, dentre eles: falhas nos sistemas de controle autônomo do veículo autônomo, falha nos sensores de tal veículo e até mesmo falhas mecânicas.

Assim, se o estado seguro desses elementos for violado, a camada PVA vai acionar o plano de retorno (*fallback plan*). A verificação destes dois elementos é feita no submódulo "Verificação da situação", presente na Figura 6. Desta forma, como esta camada apresenta um comportamento pré-estabelecido, dada uma certa entrada (estado dos elementos), observa-se que o mesmo possui um comportamento determinístico.

O plano de retorno é acionado quando uma situação de perigo é detectada pela camada PVA ao monitorar o comportamento dos elementos. Assim quando requisitado, ele vai

¹³ A colisão de outros veículos que estão ao redor do veículo autônomo pode ser considerado um risco ao mesmo, porém, como mencionado anteriormente, neste trabalho não estamos considerando estes "riscos externos". Tais riscos serão considerados em trabalhos futuros.

informar ao veículo como o mesmo deve agir, a fim de atingir um estado de falha seguro. Desta forma, o objetivo do plano de retorno é eliminar perigos aos passageiros sem que a sua requisição de serviço seja interrompida. Como consequência, a camada PVA precisa ser projetada para suportar modos de operação degradados em caso de falha e continuar a providenciar proteção, proporcionando, assim, um alto nível de integridade de segurança.

Assim, o plano de retorno é quem gerará os comandos que são enviados aos sistemas atuadores do veículo em situações de risco. A princípio considera-se que, ao detectar uma situação de risco, o veículo vai parar, e então neste momento manobras de emergência não serão consideradas.

Portanto, no próximo capítulo detalha-se a montagem do ambiente de simulação e a implementação do sistema CVA.

Figura 9 - Árvore de falhas

Fonte: Desenvolvido pela autora.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA CONTROLE VEICULAR AUTÔNOMO

Nesta seção apresenta-se a implementação do sistema CVA e da camada PVA. Já, a implementação da camada OVA consiste de um algoritmo específico que não foi desenvolvido no contexto deste trabalho de mestrado, porém ele é descrito, uma vez que é importante compreender o funcionamento de tal algoritmo para compreender os resultados obtidos e como a presença da camada PVA afeta tais resultados.

4.2.1 CONTROLE VEICULAR AUTÔNOMO - CVA

A Figura 8 apresenta o sistema CVA (camadas OVA + PVA), incluindo o fluxo de dados de cada camada do CVA e dos subsistemas presentes no veículo autônomo. Analisando esta figura é possível notar que ambas as camadas recebem informação do veículo autônomo, processam tal informação e, por fim, enviam mensagens de comando para controlar a aceleração, frenagem e ângulo de direção. Não esquecendo que estas mensagens de comando não são enviadas simultaneamente, ou seja, a camada de proteção (PVA) só envia seus comandos caso detecte alguma situação de perigo.

É importante ressaltar, também, que a princípio a camada PVA só envia comandos a respeito da frenagem, uma vez que por ser uma camada de proteção, não aceleraria o veículo e, além disso, neste trabalho não foi especificada nenhuma manobra evasiva. No entanto, na implementação, a camada PVA envia ao veículo um valor para aceleração (zero), o que foi feito para assegurar que no momento em que fosse acionado só o freio estaria em ação.

Baseado nestas informações a Figura 10 representa um esquema lógico do sistema CVA. O código do sistema CVA encontra-se no Apêndice A - Códigos da Implementação do CVA.

Figura 10 - Esquema lógico do Controle Veicular Autônomo

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Observando a Figura 10, percebe-se que:

1. Na primeira etapa o veículo autônomo envia informações sobre seu entorno (ambiente) e sua velocidade. Ambas as camadas (PVA e OVA) recebem estes dados e calculam as novas taxas de aceleração e frenagem. Vale ressaltar que a camada PVA só calcula estas novas taxas caso o veículo se encontre em uma situação de risco, se o veículo não estiver em tal situação tanto a taxa de aceleração quanto a de frenagem recebem o valor de zero. Assim, ao final desta

etapa as duas variáveis correspondentes às taxas de aceleração e frenagem da camada OVA estarão com valores entre 0 e 1 e, as duas correspondentes à camada PVA estarão com 0 (nenhum risco detectado) ou 1,2 na taxa de frenagem e 0 na de aceleração (risco detectado).

2. Na segunda etapa as taxas de aceleração e frenagem de OVA e PVA são analisadas da seguinte forma:
 - Se a taxa de frenagem anterior tiver sido 1,2 (significa que foi proveniente do PVA): ela é mantida (veículo em possível risco) $\Rightarrow$ os comandos de PVA são emitidos ao veículo autônomo (taxa de aceleração = 0 e taxa de frenagem = 1,2);
 - Se a taxa de frenagem de PVA for 1,2: os comando de PVA são emitidos ao veículo autônomo (taxa de aceleração = 0 e taxa de frenagem = 1,2);
 - Se a taxa de frenagem obtida e a anterior forem diferentes de 1,2: os comandos de OVA são emitidos ao veículo autônomo (taxa de aceleração e frenagem entre 0 e 1);
3. Na terceira etapa os comandos são enviados ao veículo autônomo.

Vale ressaltar que na implementação e realização de testes envolvendo o sistema CVA foram utilizados os softwares OpenDS e Matlab (conforme mencionados na Metodologia). Assim, os valores considerados para serem utilizados para as taxas de aceleração e frenagem foram escolhidos de modo a permitir um funcionamento adequado do veículo autônomo em tal ambiente de simulação. Desta forma, foi observado que as taxas utilizadas na validação do algoritmo embarcado no OVA (A²CPS Engine) variavam entre 0 e 1¹⁴, tanto para aceleração quanto para frenagem. Desta forma, como o PVA atua como um freio de emergência, um valor de taxa de frenagem adequado para ser emitido pelo mesmo teria que ser maior que 1 e menor que uma desaceleração máxima permitida. Portanto, foi

¹⁴ A escolha dos valores para a taxa de aceleração e para a de frenagem foram propostos pelo autor, o qual apresentou a ideia inicial do A²CPS Engine em (NAUFAL et al., 2017).

escolhido o valor de 1,2¹⁵ para a taxa de frenagem do PVA. Quanto a taxa de aceleração do PVA, vai ser sempre 0.

A partir das etapas descritas, pode-se observar:

- A camada PVA foi implementada para funcionar paralelamente a um algoritmo de navegação e controle de missão veicular denominado A²CPS Engine e implementado com lógica Fuzzy.
- Ao ser acionada, em determinadas situações, a camada PVA é quem controla exclusivamente as taxas de aceleração e de frenagem até que o veículo autônomo pare.

A seguir são fornecidos maiores detalhes sobre a camada PVA. Já, com relação à camada OVA, como foi embarcado no mesmo um algoritmo de controle já desenvolvido denominado A²CPS Engine, explicar o seu código seria explicitar o funcionamento de tal controle veicular. No entanto, o A²CPS Engine já foi testado e validado, por isso os resultados previamente obtidos são aqui utilizados, com um detalhamento formal breve.

4.2.2 CAMADA DE PROTEÇÃO VEICULAR AUTÔNOMA (PVA)

A camada PVA monitora o status dos elementos que podem levar o veículo autônomo a uma situação de risco. Conforme apresentado na árvore de falhas da Figura 9, dois dos principais elementos são: velocidade do veículo autônomo e a distância entre o mesmo e um determinado obstáculo. Assim, foi utilizada a Equação 1 para representar a distância mínima que o veículo autônomo deve manter dos demais obstáculos do cenário.

$$Distância_{mínima} = \frac{V^2}{2 \times (Frenagem\ máxima)}$$

Equação 1 - Distância mínima utilizada nos cálculos do PVA

Na Equação 1 tem-se que:

¹⁵ Será apresentada neste trabalho uma seção denominada Dimensionamento da Taxa de Frenagem, a qual compara as taxas de frenagem com valores reais de taxa de frenagem. Assim, é possível verificar que os valores de taxa adotados são condizentes com os já utilizados nos veículos.

- 'V' é a velocidade absoluta do veículo (m/s) autônomo em um determinado instante;
- 'Frenagem máxima' é a máxima frenagem (m/s^2) a ser aplicada no veículo autônomo.
- É baseada na equação: $V_{final}^2 = V_{inicial}^2 + (2 \times \alpha \times \Delta S)$, onde $V_{final} = 0$ (uma vez que o veículo autônomo tende a parar completamente quando o PVA é ativado) e α representa a desaceleração (fixamos uma desaceleração máxima).

Assim, o algoritmo da camada PVA vai sempre estar verificando se alguns dos obstáculos ao redor do veículo autônomo violam a distância mínima (caso violem o PVA detecta um estado de risco). Vale ressaltar que a distância mínima é obtida entre a parte frontal do veículo autônomo e o obstáculo em questão. Desta forma, também foi considerada uma distância lateral de 3 metros¹⁶ (denominada '*conflictDistance*'), a qual permite que o veículo autônomo trafegue sem esbarrar/entalar em outro obstáculo.

A seguir apresenta-se um esquema lógico do funcionamento do PVA (Figura 11). O código do PVA encontra-se no Apêndice A - Códigos da Implementação do CVA.

¹⁶ O valor de 3 metros, estipulado considerando o ambiente de simulação em questão, foi utilizado uma vez que a largura do veículo no ambiente de simulação (OpenDS) é de aproximadamente 1,8 metros. Desta forma, ao considerar um valor de 3 metros para a região de conflito lateral, o veículo não esbarra sua lateral em nenhum obstáculo.

Figura 11 - Esquema lógico da camada PVA

Fonte: Desenvolvido pela autora.

As informações contidas na Figura 11 visam detalhar o funcionamento da camada PVA e, até mesmo fazer um paralelo com a Figura 6. O ponto principal presente nesta última (Figura 6) é a 'Verificação da situação'.

Desta forma, é feita uma verificação, para todos os obstáculos presentes no cenário em questão, da seguinte maneira:

1. Verifica-se se determinado obstáculo está na frente do veículo autônomo - se não estiver o valor da distância frontal será negativo.
2. Verifica-se se o obstáculo está dentro da área de atuação do sensor.
3. Verifica-se se a distância lateral está dentro da área de conflito lateral fixada (3 metros).
4. Verifica-se se a distância frontal é menor que a distância mínima calculada a partir da Equação 1.

Se todas as condições citadas (numeradas de 1 a 4) forem satisfeitas (verdadeiras), então o veículo se encontra em um estado de risco. Em outras palavras, a 'Verificação da situação' emitirá um alerta para que a camada PVA assumir o controle do veículo autônomo.

Conforme mencionado, a seguir é feita uma breve explicação sobre o dimensionamento da taxa de frenagem adotada.

4.2.2.1 DIMENSIONAMENTO DA TAXA DE FRENAGEM

Os comandos emitidos ao OpenDS não representam diretamente as taxas de frenagem, sendo necessário realizar uma conversão de seus valores de aceleração e frenagem. Desta forma, estas taxas são multiplicadas por outras variáveis para que seja possível obter o valor real da desaceleração e aceleração. Como este trabalho se preocupa com a segurança do passageiros do veículo foi feito um dimensionamento para relacionar a taxa de desaceleração com a desaceleração real aplicada no veículo autônomo. Isto foi feito uma vez que se a camada PVA mandasse uma desaceleração muito alta, os passageiros poderiam ser colocados em risco.

A Tabela 1 apresenta a relação entre as taxas de desaceleração com a desaceleração real observada na simulação. Para obter tal tabela o veículo foi acelerado até, aproximadamente, 100 km/h e, em seguida, enviou-se uma taxa de desaceleração específica (em cada simulação foi utilizada uma das taxas de frenagem presentes na Tabela 1) ao veículo autônomo, de forma constante, e avaliou-se a distância que o veículo demorou para parar completamente. A partir da distância, da velocidade final do veículo, da velocidade inicial do veículo, utilizando a Equação 2, foi possível determinar a desaceleração aproximada do veículo e, assim, relacioná-la com a taxa de desaceleração utilizada.

$$Velocidade_{final}^2 = Velocidade_{inicial}^2 + (2 \times desaceleração^{17} \times \Delta S)$$

, onde ΔS é a distância percorrida

Equação 2 - Cálculo da desaceleração aplicada pelo veículo autônomo no cenário

¹⁷ Neste caso foi adotado desaceleração constante.

Taxa de Frenagem	Desaceleração (m/s^2) ¹⁸
0	- 0,42
0,2	- 1,99
0,4	- 3,56
0,6	- 5,24
0,8	- 6,69
1,0	- 8,07
1,2	- 9,5

Tabela 1 - Relação entre as taxa de frenagem e a desaceleração realizada pelo veículo autônomo no cenário em questão

4.2.3 CAMADA DE OPERAÇÃO VEICULAR AUTÔNOMA (OVA)

Conforme mencionado anteriormente, a camada OVA é constituída por algoritmos, os quais têm a função de navegar adequadamente o veículo autônomo, controlar a direção do mesmo e corrigir a sua velocidade. Assim, para representar tal módulo optou-se por utilizar um algoritmo previamente implementado e validado, uma vez que tinha-se posse dos resultados e de situações em que tal algoritmo não conseguia controlar o veículo de forma segura (situações nas quais houve colisões).

A seguir é apresentado o funcionamento do algoritmo em questão e os resultados obtidos no processo de validação do mesmo.

4.2.3.1 A²CPS ENGINE

O algoritmo denominado A²CPS Engine foi implementado para ser embarcado no motorista autônomo a fim de monitorar e controlar o veículo autônomo. Tal algoritmo foi modelado e implementado utilizando lógica Fuzzy.

O A²CPS Engine possui uma abordagem de gerenciamento de risco baseada em software e centrada no veículo. Desta forma, o algoritmo é baseado em um processo

¹⁸ Os valores de desaceleração considerados podem parecer elevados, porém foram verificados valores de desaceleração em fichas técnicas de carros, disponíveis na internet (<http://webmotors.com.br/catalogo> - acessado em novembro/2017) e, pode-se observar que os valores adotados na simulação são condizentes com os reais.

genérico de gerenciamento de risco de quatro fases: 1. Identificação de Perigos/Riscos; 2. Análise de Risco; 3. Avaliação de Risco; 4. Tratamento do Risco.

Desta forma, faz-se, a seguir, uma descrição detalhada a respeito de cada uma das fases do A²CPS Engine.

4.2.3.1.1 FASE DE IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS/RISCO

Nesta primeira etapa todos os possíveis tipos de perigo são identificados, considerando um cenário específico de tráfego. Para realizar tal identificação foram mapeadas três possíveis situações de perigo (considerando somente a interação entre dois veículos) nas quais o A²CPS Engine vai gerenciar os riscos, incluindo, ao final, uma ação para evitar a colisão entre os veículos. Tais situações de perigo são apresentadas abaixo:

1. Primeira situação de perigo: dois veículos se encontram na mesma faixa (um na frente do outro) e o veículo que está atrás possui uma velocidade maior que a do veículo que está na frente, o que possibilita uma colisão traseira.
2. Segunda situação de perigo: um veículo está entrando em uma faixa na qual existe um outro veículo circulando. Isto possibilita uma colisão lateral.
3. Terceira situação de perigo: dois veículos se encontram na mesma faixa (um na frente do outro) e o veículo da frente está saindo da faixa para acessar outra faixa. Isto possibilita uma colisão traseira/lateral e até mesmo manobras de desvio.

Identificar em qual situação de perigo o veículo se encontra é importante, uma vez que a partir dela serão definidas como serão executadas as próximas fases.

4.2.3.1.2 FASE DE ANÁLISE DE RISCO

Análise de risco é um processo para compreender a natureza do risco e determinar o nível do mesmo. Conforme mencionado, no cenário de tráfego considerado há interação entre dois veículos e as possíveis ações (com relação ao tratamento) são as de desaceleração, ou seja, redução de velocidade com possível parada do veículo. Algumas premissas foram adotadas para o cenário em questão:

- A consciência situacional é baseada em sensores embarcados no veículo autônomo, os quais detectam a posição dos obstáculos (incluindo outros

veículos) ao redor do veículo autônomo de maneira independente (isto é, não utiliza nenhuma informação proveniente de outros veículos ou de centros de informação).

- Os atributos considerados entradas para o A²CPS Engine são: a velocidade absoluta do veículo autônomo e a posição dos obstáculos detectados.
- A lógica Fuzzy foi adotada como o formalismo matemático para elaboração do modelo de risco (uma das etapas presentes na fase de análise de risco) e, conseqüentemente, no cálculo da estimação do risco. Assim, o algoritmo A²CPS Engine (incluindo suas variáveis) é representado por variáveis linguísticas (explicadas a seguir).

O processo de análise de risco foi dividido em quatro etapas: 1. Definição das entidades chaves; 2. Definição dos atributos chaves; 3. Definição do relacionamento dos atributos e elaboração do modelo de risco; 4. Estimação do risco (cálculo da Magnitude do Nível de Risco).

As primeiras três etapas ('1', '2' e '3') são utilizadas para compreender a natureza do risco e foram executadas durante o desenvolvimento e implementação do A²CPS Engine. Ao final das etapas anteriores obteve-se o modelo de risco, o qual é aplicado a etapa '4'. Esta última etapa é executada durante o tempo execução pelo A²CPS Engine embarcado no motorista autônomo. A seguir as etapas '1', '2', '3' e '4' são explicadas.

1. Definição das entidades chaves

As entidades chaves do A²CPS Engine foram baseadas nos elementos presentes na arquitetura do STI dos EUA (apresentada na seção de revisão bibliográfica). Desta forma foram escolhidos os elementos: Veículo, Via e Motorista.

2. Definição dos atributos chaves

Os atributos chaves do A²CPS Engine são as características de cada um dos elementos selecionados (entidades chaves). Assim, foram selecionadas a "velocidade do veículo" e "presença de obstáculos" como atributos recebidos pelo A²CPS Engine e enviados pelo Veículo; e o atributo "frenagem" para ser enviado pelo A²CPS Engine ao Veículo.

3. Definição do relacionamento dos atributos e elaboração do modelo de risco

Conforme apresentado na etapa anterior, os atributos recebidos pelo A²CPS Engine ("velocidade veicular" e "presença de obstáculos") e o recebido pelo Veículo ("frenagem") se relacionam com outros conceitos presentes no A²CPS Engine. Tais conceitos são "Alerta de Zona de Incidência (AZI)" e a "Magnitude do Nível de Risco (MNR)". Desta forma, para a elaboração do modelo de risco e, posteriormente, para a estimativa de risco, tais atributos e conceitos são transformados e calibrados em variáveis Fuzzy (e modelos Fuzzy) para serem quantificadas numericamente na etapa '4'.

A transformação dos atributos e conceitos em variáveis linguísticas Fuzzy são descritas abaixo. Em seguida, é apresentado o modelo de risco.

a. Variável linguística: Velocidade Veicular

A velocidade é uma variável de entrada para o A²CPS Engine, a qual é transformada em uma variável linguística Fuzzy quantificada¹⁹ por quatro níveis (pequena, média, alta e muito alta). A variável linguística em questão pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 - Fuzificação da variável Velocidade Veicular

Fonte: Desenvolvido pela autora e baseado na formulação matemática que foi proposta no A²CPS Engine.

b. Variável linguística: Alerta de Zona de Incidência (AZI)

AZI é uma variável interna ao A²CPS Engine, a qual representa uma "região de proteção" ao redor do veículo que é usada para identificar se a distância entre o veículo em questão e outros obstáculos representa um risco para o veículo autônomo em questão.

¹⁹ O valor relacionado a cada um dos níveis passou por uma fase de calibração, a qual não será apresentada neste trabalho. Tal valor é representado nas Figuras de 11 a 15 por x_i (para i de 1 a 5) e variam de acordo com a variável.

Os níveis do AZI são: pequeno, médio, grande e muito grande.²⁰ A variável linguística em questão pode ser observada na Figura 13.

Figura 13 - Fuzificação da variável Alerta de Zona de Incidência

Fonte: Desenvolvido pela autora e baseado na formulação matemática que foi proposta no A²CPS Engine.

c. Variável linguística: Presença de Obstáculos

A variável Presença de Obstáculos é de entrada para o A²CPS Engine, a qual é transformada em uma variável linguística Fuzzy quantificada por cinco níveis (muito perto, perto, longe, muito longe e não detectado) é baseada, também, no AZI. A variável linguística em questão pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Fuzificação da variável Presença de Obstáculos

Fonte: Desenvolvido pela autora e baseado na formulação matemática que foi proposta no A²CPS Engine.

²⁰ Os diferentes valores atribuídos aos níveis do AZI serão utilizados nos testes deste trabalho. Uma vez que representa diferentes tamanhos de área de proteção o que impacta na capacidade do veículo autônomo frear (reagir) ao detectar um obstáculo.

d. Variável linguística: Frenagem

A variável Frenagem é calculada pelo A²CPS Engine (variável de saída) durante a fase de Avaliação/Tratamento do risco. Tal variável pode representar tanto uma porcentagem da frenagem máxima quanto um valor absoluto da taxa de frenagem que será aplicada no veículo a fim de lidar com o risco calculado (reduzindo a velocidade ou parando o veículo). A variável linguística em questão pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 - Fuzificação da variável Frenagem

Fonte: Desenvolvido pela autora e baseado na formulação matemática que foi proposta no A²CPS Engine.

e. Variável Linguística: MNR

O MNR é utilizado para estimar o nível de risco de colisão que o veículo autônomo é exposto em um instante específico de operação. Os níveis são: sem risco, baixo, moderado, alto e muito alto. A variável linguística em questão pode ser observada na Figura 16.

Vale ressaltar que, assim como a variável Velocidade Veicular, a quantificação dos níveis das demais variáveis linguísticas passaram por um processo de calibração que não está descrito neste trabalho.

Figura 16 - Fuzificação da variável MNR

Fonte: Desenvolvido pela autora e baseado na formulação matemática que foi proposta no A²CPS Engine.

f. Elaboração do Modelo de Risco

O Modelo de Risco foi definido da seguinte maneira (resumidamente):

A Velocidade Veicular é utilizada para calcular/definir o AZI, o qual é utilizado na identificação (definição) da variável Presença de Obstáculos. Em seguida, as variáveis Velocidade Veicular e Presença de Obstáculos são utilizadas para definir o MNR. Este processo é definido por funções e regras que acionam determinados níveis das variáveis Fuzzy.

4. Estimação de Risco

Na quarta etapa, o modelo de risco é calculado durante o tempo de execução a fim de estimar o nível de risco que é exposto o veículo autônomo. Assim, ao final desta etapa é obtida a magnitude do risco representada pela variável MNR.

O valor da variável MNR é comparado ao critério de risco na fase de Avaliação de Risco a fim de determinar quando o nível de risco de colisão é aceitável ou intolerável.

4.2.3.2 FASE DE AVALIAÇÃO DE RISCO

Conforme mencionado anteriormente, nesta fase a variável MNR é utilizada para determinar se o risco é aceitável ou não. Isto refletirá na fase de Tratamento de Risco.

Portanto, se o risco for aceitável não é feita nenhuma ação na fase de Tratamento de Risco, caso contrário, será produzida uma ação de redução de risco (fase de Tratamento de Risco).

4.2.3.3 FASE DE TRATAMENTO DE RISCO

Conforme mencionado anteriormente, nesta fase as ações para eliminar perigos ou reduzir risco avaliados na fase de Avaliação de Risco são implementados. Assim, a partir desta fase é obtida a intensidade de frenagem, a qual pode diminuir a velocidade do veículo autônomo ou até mesmo pará-lo.

4.2.3.4 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A²CPS ENGINE

O A²CPS Engine foi desenvolvido em um trabalho de pós-doutorado apresentado em (NAUFAL et al., 2017)²¹. Neste trabalho utilizaram-se diferentes configurações da variável AZI para analisar também a importância de se calibrar adequadamente as variáveis e como os tais valores impactam no resultado final. Assim, este trabalho de mestrado utilizou o resultado obtido na validação do A²CPS Engine para observar o comportamento da camada PVA em situações em que a configuração de alerta de zona de incidência (AZI) não era adequada para prevenir uma colisão.

²¹ Os resultados da validação não estão neste artigo, somente a ideia inicial/apresentação está presente no mesmo. Tais resultados podem ser encontrados em (VISMARI, 2018[b]).

5 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O ambiente de simulação utilizado neste trabalho faz parte do framework que foi desenvolvido pela autora e o grupo de pesquisa ao qual faz parte em uma parceria com a Ericsson Research (CAMARGO et al., 2017).

O framework (VISMARI et al., 2018[a]) é apresentado na subseção 5.1. Já, na subseção 5.2 apresentam-se as adaptações feitas para a realização dos testes deste trabalho.

5.1 ATIVIDADES DA SIMULAÇÃO

O framework, que tem por finalidade proporcionar uma análise de segurança crítica de sistemas ciberfísicos automotivos (em inglês *Automotive Cyber-Physical Systems* - ACPS), foi desenvolvido após um estudo a respeito dos elementos do STR, suas especificações e interações, sobre o contexto de STI.

Em paralelo a este estudo pesquisou-se qual ferramenta de simulação seria utilizada para que fosse possível implementar, adequadamente, o STR. Optou-se por se utilizar ferramentas que fossem *open-source*, uma vez que se dispõe flexibilidade para alterar o código e, além disso, foram consideradas as que já possuem recursos desenvolvidos para a área automotiva, os quais podem ser modificados e reutilizados.

Por fim, tendo desenvolvida a parte conceitual do framework, sua implementação foi composta por quatro atividades:

1. Elaboração da base de dados dos elementos do ACPS;
2. Elaboração do Estudo de Caso;
3. Simulação em Tempo Real;
4. Geração de Resultados.

A atividade 'Elaboração da base de dados dos elementos do ACPS' consiste na montagem de um repositório que contém todos os elementos e características necessárias para representar o STR, as quais foram previamente estudadas e selecionadas (a subseção 5.1.1.1 apresenta esses elementos). Assim, a partir desses elementos é possível modelar os veículos, as rodovias e o ambiente ao redor do tráfego. Desta forma, na segunda atividade 'Elaboração do Estudo de Caso' é onde se define a especificação do STR (baseado nos elementos e características disponíveis) e os parâmetros e métricas de segurança crítica. Em outras palavras, definem-se quais elementos e características serão utilizadas para modelar

uma determinada situação do STR e quais resultados serão considerados para avaliar o ACPS quanto à segurança crítica. Em seguida, este cenário é simulado, realizando a atividade 'Simulação em Tempo Real'. Esta atividade consiste na instânciação dos elementos e de suas características em ferramentas de simulação: OpenDS e Matlab. Por fim, estas ferramentas geram relatórios, os quais são utilizados para analisar o sistema em questão. Esta última caracteriza a atividade 'Geração de Resultados'.

Vale ressaltar que a simulação de tempo real foi escolhida uma vez que permite analisar, em maiores detalhes, o comportamento do sistema em uma determinada condição do cenário que é o que se deseja realizar com o sistema CVA.

A seguir apresenta-se um maior detalhamento da atividade 'Elaboração da base de dados dos elementos do ACPS'. Assim, são explicados quais elementos e características estão presentes no mesmo. Vale ressaltar que mesmo que o framework não seja o foco central deste trabalho, é importante detalhar o relacionamento e as características dos elementos que podem ser instanciados no mesmo, a fim de apresentar que tais elementos conseguem representar adequadamente o STR. Isto é feito, uma vez que para a validação adequada do sistema CVA, o mesmo deve estar inserido em um ambiente que represente adequadamente o STR (o mais próximo da realidade). Em outras palavras, um ambiente que fosse capaz de expor o veículo autônomo a situações de perigo encontradas no STR atual.

5.1.1 DETALHAMENTO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DO FRAMEWORK

Conforme apresentado na seção anterior, primeiramente foi feito um estudo de quais elementos seriam considerados para representar adequadamente um STR, para que depois fosse possível implementá-los na fase da atividade 'Simulação em Tempo Real'

A seguir apresenta-se o estudo inicial dos elementos pertencentes ao ambiente de simulação e, em seguida, a implementação do mesmo.

5.1.1.1 ELEMENTOS DO SISTEMA DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO

O sistema de transporte rodoviário é composto basicamente pelo ambiente (entorno do veículo), veículos (no caso em questão considera-se apenas automóveis – veículos leves) e motoristas, os quais estão constantemente interagindo. A Tabela 2 apresenta a função básica de cada um destes elementos.

Elemento	Função
Ambiente	Este elemento gera informação que guia e limita, em alguns casos, o movimento do veículo. Por exemplo, o ambiente é quem informa ao motorista se há um obstáculo na trajetória que está sendo adotada pelo seu veículo. Assim, o motorista consegue tomar decisões como frear ou desviar. Esta informação é obtida através da observação do motorista.
Motorista	Monitora constantemente (observa) o ambiente ao redor do veículo e o funcionamento do mesmo. Além disso, é o responsável por controlar o veículo.
Veículo	É controlado pelo motorista e, também, interage com o ambiente. Neste caso em questão, a interação entre ambiente e veículo é relacionada à presença de obstáculos, indicação do caminho, características físicas da via, etc.

Tabela 2 - Função dos elementos básicos do STR

Analisando a Tabela 2 pode-se concluir que o elemento que possui uma função que é relacionada a uma ação propriamente dita é o motorista, sendo os demais apenas afetados por estas ações. Desta forma, o motorista tem um papel primordial.

No cenário atual de transporte o motorista é o responsável por monitorar e detectar situações de perigo (ou operações anormais) tanto no veículo, quanto no ambiente. Assim, em um veículo totalmente autônomo, o motorista autônomo é quem deverá desempenhar adequadamente estas funções.

Desta forma, ao se inserir veículos autônomos neste sistema, os elementos do STR continuam sendo os mesmos e apresentando as mesmas funções. Porém, considerando veículos totalmente autônomos, todo o monitoramento feito pelo motorista autônomo será baseado nos dados adquiridos por sensores e aparelhos de medição localizados na via e no veículo. Assim, foi necessário mapear o fluxo de dados entre os elementos do sistema, em outras palavras compreender adequadamente como os elementos interagem entre si, a fim de possibilitar a modelagem do sistema.

Conforme dito anteriormente, as especificações e interações dos elementos (veículo autônomo, motorista autônomo e ambiente) são apresentadas sob o contexto de STI e foi adotado, especificamente, o conceito de STI do Departamento de Transporte dos Estados Unidos da América.

Conforme consta do capítulo 3, um STR real está mapeado em 22 subsistemas (representam os elementos considerados os sistemas de transporte inteligente do STR) e 76

terminadores (não fazem parte do sistema de transporte inteligente, mas fazem interface com algum), os quais interagem através de fluxos de dados bem definidos e com finalidades diferentes. Assim, foram escolhidos subsistemas e terminadores que representassem os elementos: veículos, ambiente e motorista. Desta forma foram utilizados um subsistema (veículo) e dois terminadores (ambiente e motorista). Além disso foram selecionados os fluxos de dados que melhor representam a interação entre tais elementos.

Vale ressaltar que, dada a extensão de fluxos de dados (interação entre os elementos) que poderiam ser considerados (descritos no STI), foram selecionados os que melhor representam a relação entre os elementos no STR e, também, que possuem um certo impacto em segurança crítica (dado o objetivo do framework).

A Figura 17 apresenta os elementos e os fluxos de dados representados pelos números de 1 a 6 - nome original entre parênteses. Em seguida, a Tabela 3 apresenta uma explicação do significado dos dados presentes em cada um dos fluxos de dados exibidos na Figura 17.

Um ponto importante da Figura 17 é que o único motorista que será representado de uma maneira diferente das demais é o motorista autônomo. Os demais veículos com seus motoristas (que podem ou não estarem no cenário) terão um comportamento simples e único: seguir uma trajetória pré definida (definida antes da simulação começar), frear e acelerar, conforme os limites de velocidade da via. Além disso, tais motoristas não darão preferência quando encontrarem com outros veículos, ou seja, os mesmos só freiam se o obstáculo ou veículo estiver exatamente na sua frente.

Figura 17 - Fluxo de dados dos elementos do STR sobre o contexto de STI

- 1 - CARACTERÍSTICAS DA VIA (*ROADWAY CHARACTERISTICS*)
- 2 - CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO (*TRAFFIC CHARACTERISTICS*)
- 3 - CONDIÇÕES AMBIENTAIS (*ENVIRONMENTAL CONDITIONS*)
- 4 - DADOS DE SEGURANÇA RODOVIÁRIA (*ROADWAY SAFETY DATA*)
- 5 - DADOS DE SINALIZAÇÃO DO VEÍCULO (*VEHICLE SIGNAGE DATA*)
- 6 - PRESENÇA FÍSICA (*PHYSICAL PRESENCE*)

- 7 - ATUALIZAÇÕES PARA O MOTORISTA (*DRIVER UPDATES*)
- 8 - ENTRADAS DO MOTORISTA (*DRIVER INPUTS*)

Fluxo de Dados	Significado
Características da Via	Dados a respeito das características físicas da via.
Característica do Tráfego	Dados que indicam a presença de veículos próximos.
Condições Ambientais	Dados que indicam o estado atual da via (por exemplo, via com gelo) e as condições climáticas do momento.
Dados de Segurança Rodoviária	Dados sobre a localização de veículos na via, a direção da via e a interdição de áreas da via.
Dados de Sinalização do Veículo	Dados a respeito da sinalização (placas fixas e móveis).
Presença Física	Dados que indicam a presença de obstáculos.
Atualizações do Motorista	Dados que auxiliam o motorista a guiar adequadamente o veículo.
Entradas do Motorista	Dados que representam os comandos de controle e, também, requisitos (rotas).

Tabela 3 - Detalhamento dos fluxos de dados

5.1.1.2 IMPLEMENTAÇÃO DOS ELEMENTOS DO STR

Na seção anterior foram apresentados os elementos e os fluxos de dados que representam o STR. Assim, no ambiente de simulação deve ser possível instanciar os elementos do STR e suas características - entende-se como características os dados necessários para representar o fluxo de dados entre dois determinados elementos. Por exemplo, o elemento Ambiente possui um fluxo de dados chamado Características da Via, o qual informa ao veículo os dados físicos da via (tipo de via, etc.); assim, este elemento deve possuir a característica: “Característica física da via”, a qual informará o tipo de via através do coeficiente de atrito.

A Tabela 4 apresenta quais características estão presentes em cada um dos fluxos de dados considerados. Já, a Tabela 5 apresenta como tais características serão instanciadas no ambiente de simulação.

Elemento	Fluxo de Dado	Características (dados)
Ambiente	Dados de Segurança Rodoviária	Área interditada
	Características da Via	Característica física da via
	Condições Ambientais	Condições climáticas
	Característica do Tráfego	Localização dos veículos
	Presença Física	Obstáculo na via
	Dados de Sinalização do Veículo	Sinalização
Veículo		Características básicas
	Atualizações do Motorista	Deteção
	Entradas do Motorista	Responder a comandos de controle
	Atualizações do Motorista	Status do veículo
	Atualizações do Motorista	Velocidade máxima e mínima
Motorista Autônomo	Entradas do Motorista	Disparar comandos

Tabela 4 - Relação entre os fluxos de dados (Figura 17) e sua respectivas características

Elemento	Característica	Instanciação
Ambiente	Área interditada	Representada pela presença de objetos na via que impedem que o veículo trafegue por um trecho dela.
	Característica física da via	Representada pelo coeficiente de atrito.
	Condições climáticas	Representada pela presença de: neve e/ou chuva e/ou neblina e pela intensidade das mesmas.
	Localização dos veículos	Representada por coordenadas (x,y,z) - de todos os veículos presentes.
	Obstáculo na via	Representada pela presença de objetos na via que impedem que o veículo trafegue por ela em um determinado momento. OBS: podem aparecer/desaparecer durante a simulação.
	Sinalização	Representada pelas placas de trânsito.
Veículo	Características básicas	Representada pelo peso, coeficiente de atrito das rodas, suspensão, RPM, etc.
	Deteção	Representada pela capacidade do veículo de detectar os objetos/obstáculos. No ambiente de simulação é determinado através da distância entre o veículo e o objeto a ser detectado. Assim, dependendo da distância ele detecta ou não. Porém, ele consegue ter consciência situacional dos obstáculos ao seu redor.
	Responder a comandos de controle	Representada pela capacidade do veículo de virar, frear e acelerar.
	Status do veículo	Representada por variáveis que indicam quando o veículo está realizando os comandos de controle (acelerando/freando/virando) e que indicam se a parte mecânica do mesmo está funcionando adequadamente.
	Velocidade máxima e mínima	Representada por valores de velocidades máxima (veículo não consegue passar esta velocidade) e mínima (veículo não consegue frear - mantém no mínimo esta velocidade).
Motorista Autônomo	Disparar comandos ²²	Representada pelos comandos emitidos pelo motorista autônomo (acelerar/frear/virar).

Tabela 5 - Características dos elementos do STR e instanciação de cada uma destas características

²² Os fluxos de dados não definem características para a característica “Disparar comandos”, porém como não está sendo considerada somente a nomenclatura definida pelo STI pode-se mencionar tal característica.

Vale ressaltar que no ambiente de simulação existem dois tipos de veículos: o autônomo e o não autônomo (dirigido por um motorista que não é representado por um sistema computacional). O primeiro é o que possuirá o motorista autônomo, já o segundo será considerado apenas como sendo um objeto em movimento. Ambos os veículos conseguem monitorar o ambiente e interagir uns com os outros, porém apenas o motorista autônomo possui habilidades de direção mais complexas. Assim, o motorista não-autônomo só freia se tiver um objeto/obstáculo exatamente à sua frente (caso contrário não freia). Isto foi decidido, pois o objetivo é avaliar o comportamento do veículo autônomo, principalmente quando o mesmo for constituído pelo CVA.

Quanto às ferramentas de simulação, o OpenDS, por ser um simulador de direção, já possui os elementos e algumas das características necessárias à simulação pretendida, já implementadas na ferramenta. Considerando as características apresentadas na Tabela 5, as que já estão presentes no OpenDS são: Característica física da via, Condições climáticas, Localização dos veículos, Sinalização, Características básicas, Responder a comandos de controle e Velocidade máxima e mínima. Desta forma, as demais características precisaram ser implementadas no OpenDS.

Uma das principais implementações que foram feitas foi a do veículo autônomo, o qual foi desenvolvido no Matlab. Assim, é utilizada a interface gráfica do OpenDS para representar o cenário, mas o controle autônomo, no qual foi instanciado o CVA, foi feito no Matlab.

A comunicação entre OpenDS e Matlab é realizada através de uma aplicação desenvolvida em linguagem Java, cuja função é realizar as trocas de mensagens via protocolo TCP. O OpenDS já disponibiliza uma interface para troca de mensagens que implementa o protocolo CANbus, o qual permite configurar a mensagem a ser enviada. Assim, esta interface foi habilitada através de um arquivo do OpenDS, o qual permite configurar o endereço IP e a porta do servidor a ser conectada. Desta forma foi desenvolvida uma Interface de Comunicação.

A Interface de Comunicação (servidor) recebe as informações do OpenDS e as repassa ao Matlab (Figura 18) durante a simulação. Vale observar que o Matlab também manda informação para o OpenDS, representada pelos comandos enviados pelo motorista

autônomo, ao veículo autônomo. Os comandos enviados ao OpenDS são relacionados a (nova) taxa de aceleração do veículo, (novo) ângulo de direção e (nova) taxa de frenagem.

Figura 18 - Representação da interface de comunicação

Fonte: (MOLINA et al., 2017[a]).

O ambiente de simulação desenvolvido representa as interações presentes no STR, possuindo os principais elementos e características necessários. A Figura 19 apresenta o ambiente de simulação completo, mostrando os elementos e os fluxos de dados, e, as ferramentas (OpenDS ou Matlab) em que são implementados. Essa figura apresenta os elementos do STR e suas características representados na 'Simulação em Tempo Real'. Assim, é possível observar todos os fluxos de dados (Figura 17) que fazem parte do ambiente. O único fluxo de dados que não tinha sido mencionado é 'Informação de Detecção'. Este não foi especificado nos conceitos do STI do EUA, porém julgou-se importante ter uma interação entre tais elementos uma vez que permitiria possuir mais de um veículo no cenário e, para isso, os mesmos precisariam detectar-se entre eles, visando evitar colisões (o que acontece em um cenário real do STR).

Figura 19 - Representação completa do ambiente de simulação

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Continuando a análise da Figura 19, é possível observar, também, que a maioria das interações entre os elementos são representadas no OpenDS. Em outras palavras, toda a ação da simulação (veículos trafegando, colidindo, freando, obstáculos aparecendo, ambiente ao redor do veículo, entre outras coisas) é exibida no OpenDS. Já, no Matlab, está presente o controle autônomo que controla exclusivamente o veículo autônomo. Desta forma, os cálculos e decisões tomadas pelo veículo autônomo são feitas no Matlab com as informações recebidas a partir do OpenDS (a cada 10 milissegundos²³), durante a simulação. Portanto, tanto o OpenDS quanto o Matlab possuem funções primordiais para a realização da simulação.

²³ Este valor é configurável no OpenDS. O valor de 10 milissegundos é default do software, assim foi mantido.

5.2 AMBIENTE PARA TESTE DO CVA

Conforme mencionado, utilizou-se o framework para realizar o teste do CVA. Assim, houve a necessidade de ajustar as atividades explicadas anteriormente para que fosse possível representar o veículo autônomo considerando um cenário específico e seu motorista autônomo representado pelo sistema CVA. Desta forma, foram realizadas modificações e adaptações no ambiente de simulação, principalmente relacionadas à atividade 'Simulação em Tempo Real (troca de mensagens, geração de relatórios, criação do cenário, inclusão de rotinas do Matlab)', a qual é o foco desta explicação. Partindo deste ponto, a simulação ocorre conforme a Figura 20.

Figura 20 - Ambiente de simulação para realização dos testes

Fonte: Desenvolvido pela autora.

A Figura 20 é similar à Figura 19, porém possui três aspectos (numerados de 1 a 3 na Figura 20) que foram aprimorados para ser possível representar o CVA:

1. Natureza da troca de mensagens entre o OpenDS e o Matlab;
2. Códigos específicos para cada um dos módulos (Métodos de Entrada, Métodos de Saída, Base de Dados e Algoritmos de Supervisão e Controle) do Motorista Autônomo;
3. Natureza das informações contidas no relatório de simulação (pertencente ao submódulo 'Resultado' do framework).

A seguir são apresentados nas subseções 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 maiores detalhes sobre cada um dos aspectos listados anteriormente (numerados de 1 a 3).

5.2.1 TROCA DE MENSAGENS ENTRE OPENDS E MATLAB

Para controlar o veículo autônomo implementado no OpenDS foi desenvolvido um mecanismo de troca de mensagens entre este e o Matlab. Este mecanismo faz com que o veículo autônomo percorra um circuito desejado de acordo com o estipulado antes da simulação. Vale ressaltar que a rota do veículo autônomo já está presente em um dos submódulos do veículo autônomo, ou seja, este submódulo representa uma possível comunicação do motorista autônomo com alguma ferramenta de navegação, porém de uma maneira mais simplificada. Assim, o veículo autônomo recebe comandos sobre taxa de aceleração, frenagem e ângulo de direção, de modo a atingir seu ponto final sem sofrer qualquer tipo de dano. Este controle foi feito por meio de algoritmos escritos em Matlab que interagem com o software de simulação (OpenDS) através de uma Interface de Comunicação desenvolvida.

A seguir (subseções 5.2.1.1 e 5.2.1.2) são apresentados, respectivamente, a natureza e a maneira como é feita a troca de mensagens entre Matlab e OpenDS.

5.2.1.1 MENSAGENS DO OPENDS PARA O MATLAB

As mensagens enviadas pelo OpenDS foram configuradas por meio da classe ‘CANClient.java’ (já existente no código do OpenDS) de forma a colocar os parâmetros necessários para o controle de direção e velocidade do veículo autônomo.

O OpenDS cria um socket TCP de comunicação da simulação com o Servidor e começa a repassar as mensagens para esta Interface de Comunicação, por meio da função ‘sendCarData’. Esta função também foi modificada a fim de enviar as informações necessárias ao servidor, e o mesmo as reencaminha para o Matlab.

No teste que foi considerado para este trabalho o veículo só trafega em linha reta e, desta forma não foi preciso enviar informações sobre a localização do mesmo com relação à via em que se encontra. Maiores informações sobre o teste são apresentadas no capítulo 6 - Estudo de Caso.

Portanto, a Tabela 6 apresenta as informações (distâncias dos obstáculos e velocidade) que são enviadas e uma breve explicação sobre elas. Essas informações estão relacionadas com o fato de o motorista autônomo precisar ter uma consciência situacional do veículo autônomo (saber o seu entorno), o que é fornecido pela distância entre tal veículo e os obstáculos, e, também, do status do mesmo, no caso, sua velocidade. Vale ressaltar que as informações que são enviadas ao motorista autônomo estão condizentes com as previstas na Figura 8.

Informação	Descrição
Velocidade do veículo autônomo	Velocidade do veículo em km/h.
Distâncias frontais (ver Figura 21) entre o veículo autônomo e os obstáculos	No cenário de teste são inseridos obstáculos com os quais o veículo autônomo pode colidir. Assim, são passadas todas as distâncias (frontais) entre o veículo e um determinado obstáculo.
Distâncias laterais (ver Figura 21) entre o veículo autônomo e os obstáculos	No cenário de teste são inseridos obstáculos com os quais o veículo autônomo pode colidir. Assim, são passadas todas as distâncias (laterais) entre o veículo e um determinado obstáculo.

Tabela 6 - Informações enviadas ao Matlab

Figura 21 -Representação da distância frontal e lateral

Fonte: Desenvolvido pela autora.

5.2.1.2 MENSAGENS DO MATLAB PARA O OPENDS

O motorista autônomo foi implementado no Matlab de forma a receber e tratar adequadamente as mensagens enviadas pela ferramenta OpenDS, processar os dados contidos nessas mensagens e enviar ao OpenDS os comandos a serem realizados pelo veículo. A Figura 22 representa o esquema lógico do Matlab.

O código completo do motorista autônomo considerando o esquema lógico do Matlab (Figura 22) está apresentado no Apêndice A - Códigos da Implementação do CVA.

Desta forma, sabendo do funcionamento do CVA, as mensagens que trafegam do Matlab ao OpenDS estão relacionadas com a taxa de aceleração e com a taxa de frenagem. Tais mensagens estão sintetizadas na Tabela 7.

Informação	Descrição
Taxa de aceleração	Valor de 0 a 1 que é passado ao OpenDS e utilizado para calcular a nova velocidade do veículo autônomo.
Taxa de frenagem	Valor de 0 a 1,2 que é passado ao OpenDS e utilizado para calcular quanto vai ser a desaceleração do veículo autônomo.

Tabela 7 - Informações enviadas ao OpenDS

Figura 22 - Esquema lógico do Matlab

Fonte: Desenvolvido pela autora.

5.2.2 SUBMÓDULOS DO MOTORISTA AUTÔNOMO

De acordo com a Figura 20, o módulo relacionado ao motorista autônomo é constituído por 4 submódulos:

- Métodos de Entrada: usados para inicializar a conexão com o OpenDS, recebendo informações (dados) provenientes do mesmo e atualizando a Base de Dados (repositório dos dados que são trocados entre os Veículo Autônomo e o Motorista Autônomo).
- Métodos de Saída: usados para enviar comandos ao OpenDS. Tais comandos são relacionados com a taxa de aceleração, frenagem e ângulo de direção.
- Algoritmos de Supervisão e Controle: controlam o veículo (comportamento) usando as informações provenientes do veículo autônomo e do seu entorno.

- Base de Dados: contém todos os dados utilizados pelo controle autônomo. Este submódulo representa os dados propriamente ditos.

Para representar adequadamente os submódulos apresentados anteriormente foram criadas funções no Matlab (presentes na Figura 27 do Apêndice A - Códigos da Implementação do CVA). A Tabela 8 apresenta a correlação existente entre os submódulos e as funções do Matlab.

Motorista Autônomo	Funções do Matlab
Métodos de Entrada	initializeConnection.m; receiveData.m; runController.m; SplitStringPVA.m
Métodos de Saída	sendData.m
Algoritmos de Supervisão e Controle	calculateAccel.m; calculateAccelPVA.m; changeDVOTR.m; retDVOTR.m; returnInd.m
Base de Dados	-

Tabela 8 - Relação entre os submódulos do motorista autônomo e as funções do Matlab

Vale ressaltar que as funções do Matlab indicadas na Tabela 8 especificamente as relacionadas ao submódulo 'Algoritmos de Supervisão e Controle', são as responsáveis pela implementação do CVA. Assim, se uma outra arquitetura de controle autônomo for testada, utilizando o framework em questão, provavelmente, o submódulo que sofrerá mais alteração com relação ao conteúdo de suas funções do Matlab será o 'Algoritmos de Supervisão e Controle'.

5.2.3 RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO

O OpenDS fornece, ao término da simulação, um relatório em formato .txt com alguns dados de simulação (por exemplo: velocidade do veículo autônomo em determinado momento, posição de um obstáculo, entre outras coisas). Este relatório é gerado pelo submódulo 'Resultado'. Assim, o mesmo, após algumas modificações com relação ao conteúdo que continha, fornece a informação necessária para análise do CVA.

A Tabela 9, apresenta os elementos presentes nos relatórios de simulação que foram obtidos após três conjuntos de testes (em cada conjunto de teste foram realizadas duas simulações) com o CVA.

Elementos do relatório	Descrição
Tempo de simulação	Tempo/instante (em ms) em que as informações/dados são gravados no relatório.
Velocidade	Velocidade do veículo autônomo em km/h a cada instante.
Taxa de aceleração	Valor entre 0 e 1 da taxa de aceleração do veículo autônomo a cada instante.
Taxa de frenagem	Valor entre 0 e 1,2 da taxa de aceleração do veículo autônomo a cada instante.
Distância frontal	Distância frontal (em metros) entre o veículo autônomo e um determinado obstáculo (outro veículo não autônomo ou placa de trânsito). Este valor fica negativo caso o obstáculo já tenha sido ultrapassado pelo veículo autônomo.

Tabela 9 - Dados contidos nos relatórios de simulação

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Este capítulo apresentou o ambiente de simulação que foi utilizado para realização dos testes do sistema CVA. Assim, foi possível compreender, primeiramente, que o ambiente de simulação do framework consegue representar um STR de uma maneira adequada graças aos elementos e características que foram consideradas em sua implementação. Em seguida, apresentaram-se as modificações feitas em tal ambiente para que fosse possível realizar os testes com o sistema CVA.

Portanto, ao final deste capítulo, observou-se que as informações necessárias são enviadas ao motorista autônomo (presente no Matlab) e que as funções que o representam, conseguem analisar os dados que recebem e calcular o comportamento que o veículo autônomo deve ter, baseado em tais dados.

6 ESTUDO DE CASO

Esta seção apresenta o Estudo de Caso que foi desenvolvido para testar/analisar o sistema CVA. Primeiramente apresenta-se o objetivo e, com base nele, como o cenário de teste foi desenvolvido. Em seguida, detalham-se os testes e apresentam-se os resultados obtidos.

6.1 OBJETIVO

O Estudo de Caso foi desenvolvido para que fosse possível testar, adequadamente, o sistema CVA, gerando resultados para uma posterior análise, quanto à prevenção de acidentes, tornando possível analisar se o PVA consegue evitar colisões em situações em que a camada de operação não atinge tal objetivo.

6.2 CENÁRIO DE TESTE

Conforme mencionado anteriormente, com o ambiente de simulação desenvolvido é possível modelar o ambiente e o veículo autônomo (no OpenDS), bem como o motorista autônomo (no Matlab).

O cenário de tráfego (ambiente e veículo autônomo) considerado está ilustrado na Figura 23. O veículo autônomo trafega em uma trajetória em linha reta, com uma velocidade máxima de 120 km/h. Após atingir tal velocidade, um obstáculo surge em seu caminho e o veículo precisa frear para não colidir com o obstáculo em questão (no caso, uma placa). A simulação termina quando o veículo é freado totalmente ou quando o mesmo colide com o obstáculo. A Tabela 10 apresenta outras configurações que foram adotadas para os elementos em questão, as quais são relacionadas às características dos elementos já apresentadas.

Elemento	Característica
Veículo Autônomo	Aceleração máxima: 2,6 m/s ²
	Taxa de frenagem máxima: 7,6 m/s ²
	Faixa de velocidade: 0 a 120km/h
	Velocidade máxima: 120 km/h
Ambiente	Via com geometria uniforme

Tabela 10 - Características consideradas no cenário de teste

Figura 23 - Cenário utilizado nos testes

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Vale ressaltar que o cenário, mesmo representando uma configuração relativamente simples para os elementos do STR, continua condizente com o que foi apresentado no capítulo 4 deste trabalho. Assim, foi possível observar que os elementos tiveram um comportamento que se assemelhou ao observado em situações do STR atual.

Já, quanto ao motorista autônomo, é constituído por uma abordagem de controle veicular autônomo baseado em inteligência artificial proposta por NAUFAL et al. (2017) e denominado A²CPS Engine.

O A²CPS Engine é uma abordagem de gerenciamento de risco centrada no veículo autônomo, a qual é baseada em software e executada em tempo real. Além disso, seu algoritmo (implementado no Matlab) foi desenvolvido usando Lógica Fuzzy. Assim, os algoritmos do A²CPS Engine monitoram o ambiente e o comportamento do veículo autônomo, controlando as ações do mesmo de modo a diminuir os riscos e a reduzir a gravidade de eventuais acidentes relacionados à operação do veículo autônomo. Assim, dependendo do Nível de Risco (nenhum risco; baixo risco; risco moderado; alto risco; risco muito alto) calculado e de seus Critérios de Risco (insignificante; indesejável; intolerável) é realizado um tratamento específico (ação a ser executada pelo veículo autônomo).

Como desejava-se comparar o CVA a um outro controle autônomo, foram feitas duas configurações para motorista autônomo:

1. Motorista Autônomo representado pelo CVA: possui as duas camadas (PVA e OVA), sendo que a camada OVA é constituído pelo A²CPS Engine.
2. Motorista Autônomo representado exclusivamente pelo A²CPS Engine (neste caso não existe a camada de proteção que é uma das importantes características do sistema CVA).

Desta forma, foi possível gerar condições para que o A²CPS Engine falhasse ou não conseguisse controlar adequadamente o veículo autônomo, levando-o a uma colisão com o obstáculo à frente. Assim, foi plausível analisar se, em tais situações, o PVA conseguiria prevenir o acidente. Já que, o objetivo era fazer com que o veículo autônomo fosse exposto a uma maior quantidade de situações de perigo possível, o que permitiria avaliar a eficiência do motorista (com e sem PVA) quanto à prevenção de acidentes.

Portanto foram feitos três conjuntos de testes no ambiente apresentado na Figura 23, considerando os dois tipos de motorista: um motorista controlado pelo A²CPS Engine, e, o outro, também controlado pelo A²CPS Engine, porém com uma camada de proteção extra (PVA).

6.3 TESTES E RESULTADOS

Conforme dito anteriormente existem duas configurações de motoristas autônomos e os mesmos foram testados em sistemas que não apresentam falhas e em sistemas que apresentam falhas.

Assim, dentre as falhas mapeadas na árvore de falhas (Figura 9), foram escolhidas duas falhas: falha mecânica (relacionada ao atuador do veículo) e falha do controle autônomo (relacionada a algum erro de código), as quais são representadas/implementadas no cenário da Figura 23. Assim, ambos os motoristas autônomos têm que lidar com estas falhas e espera-se que o motorista representado pelo módulo CVA consiga evitar um maior número de acidentes devido ao submódulo PVA quando comparado ao motorista representado pelo A²CPS Engine.

Desta forma, são apresentados três conjuntos de testes:

1. Um conjunto de teste que analisa o comportamento do motorista no cenário da Figura 23, sem inserir nenhum tipo de falha.

2. Um conjunto de teste que analisa o comportamento do motorista no cenário da Figura 23, com falha de controle autônomo.
3. Um conjunto de teste que analisa o comportamento do motorista no cenário da Figura 23, com falha mecânica (comunicação com o atuador).

A seguir são apresentados os conjuntos de testes e seus respectivos resultados. Porém, antes dos testes serem apresentados, detalha-se uma característica importante do A²CPS Engine.

No algoritmo há uma variável denominada AZI (alerta de zona de incidência), que representa uma região de proteção ao redor do veículo (seção 4.2.3.1.1). Na validação do A²CPS Engine considerou-se diferentes valores para o AZI e, conseqüentemente, obteve-se diferentes resultados. Assim, tais resultados foram utilizados para realização dos testes deste trabalho. A fim de esclarecer o resultado que se obtém ao se ter diferentes valores de AZI, a Tabela 11 apresenta dois exemplos de configuração do AZI e seus respectivos resultados.

Comparando os exemplos presentes na Tabela 11, percebe-se que os valores adotados podem interferir na segurança crítica do veículo autônomo, assim como na sua eficiência. Desta forma a validação de tal algoritmo foi feita considerando diferentes valores de AZI.

Portanto nos testes apresentados a seguir são considerados quatro níveis de AZI, os quais estão apresentados na Tabela 12.

Características avaliadas	Primeira Configuração dos Níveis de Alerta (AZI')	Segunda Configuração dos Níveis de Alerta (AZI')
Especificação	5 metros - próximo 15 metros - médio 25 metros- distante 35 metros - muito distante	20 metros - próximo 50 metros - médio 80 metros- distante 110 metros - muito distante
Cenário hipotético de teste ²⁴	Um veículo com alta velocidade detecta um obstáculo a 30 metros, ou seja, ativa os níveis: distante e muito distante	Um veículo com alta velocidade detecta um obstáculo a 30 metros, ou seja, ativa os níveis: próximo e médio
Tratamento executado pelo veículo	Por ter ativado os níveis menos restritivos (distante e muito distante), provavelmente a intensidade de frenagem não será tão alta naquele instante o que pode fazer com que o veículo não consiga reduzir totalmente a velocidade antes de atingir o obstáculo, ou seja, detecte o obstáculo quando já estiver muito próximo do mesmo.	Por ter ativado os níveis mais restritivos (próximo e médio), provavelmente a intensidade de frenagem será mais alta do que a do AZI'. Assim, esta configuração de AZI terá uma chance maior de não colidir com o obstáculo detectado.

Tabela 11 - Exemplos de diferentes valores de AZI

²⁴ Representa uma situação (instante) na qual o A²CPS age de acordo com os valores definidos do AZI.

Configuração dos Níveis de Alerta			
AZI 1	AZI 2	AZI 3	AZI 4
5 metros - próximo	10 metros - próximo	20 metros - próximo	20 metros - próximo
15 metros - médio	30 metros - médio	60 metros - médio	60 metros - médio
23,75 metros- distante	47,5 metros - distante	95 metros- distante	150 metros- distante
45 metros - muito distante	90 metros - muito distante	180 metros - muito distante	180 metros - muito distante

Tabela 12 - AZI's considerados

6.3.1 PRIMEIRO CONJUNTO DE TESTES - CENÁRIO SEM FALHA

Neste primeiro conjunto de testes os dois motoristas autônomos são implementados no cenário (Figura 23). Assim, é observado o comportamento deles ao detectarem um objeto em seu percurso, tendo que frear totalmente o veículo para não colidir com o mesmo, conforme Figura 24.

Figura 24 - Estado de término do teste

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Vale ressaltar que as duas configurações do motorista autônomo (com e sem a camada PVA) seguem as características definidas na Tabela 10.

A Tabela 13 apresenta os valores para o motorista representado pelo CVA (com PVA) e a Tabela 14 apresenta os valores para o motorista representado pelo A²CPS Engine (sem PVA).

Configuração dos Níveis de Alerta	Distância de Parada	Parou devido ao
AZI 1	6,92 metros	PVA
AZI 2	7,21 metros	PVA
AZI 3	7,05 metros	A ² CPS Engine
AZI 4	10,16 metros	A ² CPS Engine

Tabela 13 - Distância de Parada do conjunto de testes número 1 - motorista com PVA

Configuração dos Níveis de Alerta	Distância de Parada	Parou devido ao
AZI 1	colidiu (veloc. colisão = 86,37 km/h)	-
AZI 2	colidiu (veloc. colisão = 62,51 km/h)	-
AZI 3	7,20 metros	A ² CPS Engine
AZI 4	9,90 metros	A ² CPS Engine

Tabela 14 - Distância de Parada do conjunto de testes número 1 - motorista sem PVA

Comparando a Tabela 13 com a Tabela 14 percebe-se que a camada PVA foi acionada no momento correto, ou seja, quando o algoritmo de controle do veículo não conseguiu frear o mesmo. Isto pode ser observado pelas duas primeiras configurações do AZI (1 e 2), as quais fazem com que o motorista perceba o obstáculo quando o mesmo já se encontra muito próximo do veículo.

Analisando mais detalhadamente a Tabela 13, pode-se perceber que a distância de parada quando a camada PVA é acionada é quase a mesma, isto deve-se ao fato de que essa camada tem condições fixas e bem definidas para ser ativada (relacionadas a velocidade veicular e a distância do veículo a obstáculos). Desta forma, quando as condições são satisfeitas a camada PVA vai agir sempre da mesma maneira (com a relação à taxa de

frenagem) e isto, faz com que o veículo tenha uma distância de parada semelhante em diferentes casos.

Analisando a Tabela 14 e considerando a configuração para AZI 1, pode-se perceber, ao estudar os dados obtidos pelo relatório (dados na Tabela 22 do apêndice), que houve colisão uma vez que o motorista começa a frear efetivamente quando o veículo está a 16 metros do obstáculo. Porém, como o veículo estava em alta velocidade, o mesmo não conseguindo frear a tempo.

A mesma análise pode ser feita para o caso AZI 2 (Tabela 14), neste caso o motorista começa a frear efetivamente quando o veículo está a 36 metros do obstáculo.

Portanto, as análises feitas confirmam que a camadas PVA e OVA (consiste do A²CPS Engine) foram estruturados da maneira adequada, pois a camada PVA só é acionada quando a camada OVA não é capaz de parar/reduzir a velocidade do veículo. Isto era um comportamento desejado e esperado.

6.3.2 SEGUNDO CONJUNTO DE TESTES - CENÁRIO COM FALHA A²CPS ENGINE

Neste segundo conjunto de testes os dois motoristas autônomos, também são implementados no cenário da Figura 23. Porém, é inserida um falha no código do A²CPS Engine e deseja-se observar o comportamento dos motoristas ao detectarem um objeto em seu percurso, tendo que frear totalmente o veículo.

A grande diferença neste conjunto de testes é a falha. Ela consiste de um mecanismo chamado '*simFail*', o qual descarta alguns dos valores de distâncias de obstáculos detectados (como se os mesmos não existissem). Assim, foi implementado que as distâncias entre veículo e obstáculo maiores do que 20 metros seriam ignoradas.

Assim, foram realizados testes variando o AZI, o parâmetro '*simFail*' e o motorista (PVA presente ou não presente). Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 15 e na Tabela 16.

Vale ressaltar que as duas configurações do motorista autônomo seguem as características definidas na Tabela 10.

A Tabela 15 apresenta os valores para o motorista representado pelo sistema CVA (com a camada PVA) e a Tabela 16 apresenta os valores para o motorista representado pelo A²CPS Engine (sem a camada PVA).

Configuração dos Níveis de Alerta	Distância de Parada	Parou devido ao
AZI 1	7,75 metros	PVA
AZI 2	6,74 metros	PVA
AZI 3	7,40 metros	PVA
AZI 4	6,89 metros	PVA

Tabela 15 - Distância de Parada do conjunto de testes número 2 - motorista com PVA

Configuração dos Níveis de Alerta	Distância de Parada	Parou devido ao
AZI 1	colidiu (veloc. colisão = 88,16 km/h)	-
AZI 2	colidiu (veloc. colisão = 86,19 km/h)	-
AZI 3	colidiu (veloc. colisão = 84,78 km/h)	-
AZI 4	colidiu (veloc. colisão = 83,90 km/h)	-

Tabela 16 - Distância de Parada do conjunto de testes número 2 - motorista sem PVA

Analisando a Tabela 15 e a Tabela 16, pode-se notar que o PVA é importante, pois conseguiu evitar colisões em todas as configurações de AZI. Pode-se observar, também, que por ser uma falha na lógica do A²CPS Engine e pelo fato do mesmo não ter nenhum tipo de detecção de falha interno, o mesmo acaba sendo ineficiente para proteger o veículo autônomo neste caso.

Porém, seria necessário realizar outros testes para observar se com o aumento do valor da distância que é desconsiderada, o A²CPS Engine conseguiria prevenir colisão pelo menos para as duas últimas configurações de AZI (3 e 4).

Além disso, este conjunto de testes salientou ainda mais o ganho que se pode ter por ter camadas separadas e independentes.

6.3.3 TERCEIRO CONJUNTO DE TESTES - FALHA COMUNICAÇÃO/COMANDO

Neste terceiro conjunto de testes é feita a mesma configuração dos demais, tanto em relação aos dois motoristas autônomos e ao cenário, quanto em relação às características presentes na Tabela 10. Porém, é inserida uma falha no comando que é passado aos atuadores do veículo e deseja-se observar o comportamento dos motoristas ao detectarem um objeto em seu percurso.

Além da falha de detecção de objetos, foi inserido um segundo mecanismo de forma a simular falha no envio do comando de frenagem pelo controle (Matlab) para o veículo (OpenDS). Um conjunto de intervalos de frenagem foi estabelecido para inserir um comportamento anormal de aceleração no veículo e, dessa forma, verificar a atuação do controle PVA.

Desta forma, a falha consiste em fazer com que o veículo acelere (intensidade 1 de aceleração e 0 de frenagem) ao invés de frear em determinados valores de freio. Vale ressaltar que esse erro não afeta o comando da camada PVA, ele está relacionado somente com o comando da camada OVA. Assim, foram consideradas duas falhas: uma que afetaria todos os comandos de freio que fossem menores que a intensidade 0,8 e, outra que faria a mesma coisa só que para intensidades menores que 0,3.

Os resultados obtidos considerando as duas falhas e as duas configurações de motoristas estão nas Tabelas 17, 18, 19 e 20.

1) Falha para valores de intensidade de freio menor do que 0,3

A Tabela 17 apresenta os valores para o motorista representado pelo sistema CVA (com a camada PVA) e a Tabela 18 apresenta os valores para o motorista representado pelo A²CPS Engine (sem a camada PVA).

Configuração dos Níveis de Alerta	Distância de Parada	Parou devido ao
AZI 1	colidiu (veloc. colisão = 44 km/h)	-
AZI 2	2,91 metros	PVA
AZI 3	5,98 metros	A ² CPS Engine
AZI 4	8,75 metros	A ² CPS Engine

Tabela 17 - Distância de Parada do conjunto de testes número 3 (falha 1) - motorista com PVA

Configuração dos Níveis de Alerta	Distância de Parada	Parou devido ao
AZI 1	colidiu (veloc. colisão = 106,73 km/h)	-
AZI 2	colidiu (veloc. colisão = 78,31 km/h)	-
AZI 3	5,62 metros	A ² CPS Engine
AZI 4	8,58 metros	A ² CPS Engine

Tabela 18 - Distância de Parada do conjunto de testes número 3 (falha 1) - motorista sem PVA

Analisando os valores da Tabela 17 e da Tabela 18, pode-se concluir que a camada PVA conseguiu evitar a colisão em apenas um dos casos. Isto ocorreu uma vez que a camada PVA detectou a situação de risco quando não tinha mais espaço suficiente para parar. Em outras palavras, o veículo estava a uma velocidade muito alta e não tinha uma distância suficiente entre o mesmo e o obstáculo com o qual colidiu. Olhando os dados obtidos na simulação, o veículo precisaria de mais 5 metros aproximadamente. Porém, ele conseguiu minimizar o dano, já que no caso em que a camada PVA não estava ativo o veículo colidiu a uma velocidade de 106,73 km/h (dados na Tabela 24 do apêndice) e, com a camada PVA, o mesmo colidiu a 44 km/h (dados na Tabela 23 do apêndice).

2) Falha para valores de intensidade de freio menor do que 0,8

A Tabela 19 apresenta os valores para o motorista representado pelo CVA (com PVA) e a Tabela 20 apresenta os valores para o motorista representado pelo A²CPS Engine (sem PVA).

Configuração dos Níveis de Alerta	Distância de Parada	Parou devido ao
AZI 1	colidiu (veloc. colisão = 42,84 km/h)	-
AZI 2	colidiu (veloc. colisão = 46,5 km/h)	-
AZI 3	colidiu (veloc. colisão = 26,00 km/h)	-
AZI 4	3,85 metros	PVA

Tabela 19 - Distância de Parada do conjunto de testes número 3 (falha 2) - motorista com PVA

Configuração dos Níveis de Alerta	Distância de Parada	Parou devido ao
AZI 1	colidiu (veloc. colisão = 122,00 km/h)	-
AZI 2	colidiu (veloc. colisão = 108,63 km/h)	-
AZI 3	colidiu (veloc. colisão = 91,74 km/h)	-
AZI 4	colidiu (veloc. colisão = 92,21 km/h)	-

Tabela 20 - Distância de Parada do conjunto de testes número 3 (falha 2) - motorista sem PVA

Nestas duas últimas tabelas, a mesma análise que foi feita anteriormente (falha para valores de intensidade de freio menor que 0,3) pode ser aplicada. Observou-se um número crescente de colisões uma vez que começou a se eliminar as taxas de frenagem mais baixas. Nestes casos nem mesmo o PVA conseguiu evitar a colisão, já que quando o mesmo era acionado, na maioria dos casos, o veículo estava muito rápido e a distância disponível entre ele e o obstáculo não era suficiente para parar. Porém, o PVA conseguiu reduzir bastante a velocidade de colisão.

7 CONCLUSÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho de mestrado, seguida das propostas de trabalhos futuros derivados dos assuntos aqui tratados.

7.1 CONCLUSÕES DA DISSERTAÇÃO

O objetivo deste trabalho de dissertação foi propor, implementar e avaliar um sistema denominado Controle Veicular Autônomo (CVA), o qual foi projetado para ser utilizado em veículos totalmente autônomos (sem nenhuma interação humana).

A principal motivação deste trabalho foi a de projetar um sistema que fosse capaz de proporcionar maior segurança ao veículo e a seus ocupantes ao se comparar a demais configurações de sistemas diferentes do sistema CVA. A configuração do CVA é baseada na separação do sistema de controle em duas camadas independentes, a camada de Operação Veicular Autônoma (OVA) e a de Proteção Veicular Autônoma (PVA).

Conforme mencionado no trabalho, a principal característica do sistema CVA é a presença da camada PVA. Tal camada monitora o ambiente ao redor do veículo e o status do mesmo, a fim de identificar e de evitar eventos e/ou condições perigosas. Assim, essa proposta concede uma camada de proteção extra sem interferir no algoritmo de controle (seja ele qual for) presente na camada OVA - responsável por coordenar a missão veicular.

Com a realização dos testes apresentados na seção 6.3, foi observado, primeiramente, que o módulo CVA consegue representar as funcionalidades necessárias para se desenvolver corretamente um veículo autônomo uma vez que conseguiu controlar adequadamente o veículo autônomo no cenário em questão. Além disso, também foi observado que o PVA consegue prevenir colisões quando ocorrem eventuais falhas no sistema de controle veicular e até mesmo, quando o sistema não consegue prevenir colisões (observado em algumas configurações da variável AZI do algoritmo A²CPS Engine utilizado para realização dos testes). Desta forma, o PVA pode ajudar na prevenção de acidentes uma vez que reage a partir do monitoramento de elementos e características bem definidas, os quais possuem uma ação clara (no caso em questão, frear).

Os resultados obtidos na seção de testes confirmou que além de prevenir o veículo autônomo contra colisões, o CVA (em especial o PVA), também mitiga o impacto de

colisões inevitáveis, protegendo, assim, o veículo autônomo e seus passageiros (como pode ser observado no teste de número 1 da seção 6.3.3).

Além de tais resultados, também foi possível observar a importância da redundância em sistemas críticos em segurança, principalmente para obtenção de informação provenientes do ambiente ao redor do veículo. Este fato pode ser observado no segundo conjunto de testes, no qual o A²CPS Engine possui falha em seu sistema de sensoriamento (observado na seção 6.3.2).

Portanto, conclui-se que o objetivo do trabalho foi atingido conforme esperado. Porém existem outros pontos que poderiam ter sido abordados neste trabalho. Tais pontos estão apresentados na seção de trabalhos futuros.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Conforme mencionado anteriormente, alguns pontos importantes não foram considerados neste trabalho. Tal discussão será apresentada a seguir.

Conforme apresentado, o sistema CVA foi testado considerando situações de operação normal e algumas situações de falhas em alguns dos elementos que fazem parte do sistema veicular autônomo. Porém, não foi considerado nenhuma falha no PVA. Assim, seria interessante estudá-lo mais profundamente a fim de proporcionar métodos para que o PVA tenha uma taxa de falha baixa. Além disso, seria interessante, também, que o mesmo conseguisse detectar tais situações.

Um outro ponto, lidando novamente com a camada PVA, seria estudar qual a reação (ao detectar uma condição de perigo) mais adequada do PVA. Existem outras tecnologias que estão sendo utilizados que poderiam dar uma maior consciência situacional ao PVA e, assim, fazer com que o mesmo, por exemplo, desvie o trajeto de um veículo ao invés de para-lo. Neste contexto espera-se que a comunicação veicular possa auxiliar em tais situações. No entanto, deve-se ter em mente que o PVA não deve perder suas características principais.

Considerando a arquitetura e atuação (sobre os atuadores do veículo) do CVA, seria interessante, também, estudar a viabilidade de se ter uma independência de atuação entre PVA e OVA, principalmente com relação ao atuadores relacionados a frenagem do veículo autônomo.

Além destes campos de pesquisa, seria interessante, também, estudar sobre estruturas de redundância e sobre acurácia de sensores. Este é um ponto crucial, uma vez que o reconhecimento do ambiente ao redor do veículo autônomo é fundamental para o funcionamento adequado do mesmo.

Os tópicos mencionados anteriormente provam que alguns pontos precisam ser melhor estudados. Porém, o trabalho apresentado mostra que o sistema CVA tem um grande potencial na área de veículos autônomos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, R.; FETH, P.; SCHNEIDER, D. Safety Engineering for autonomous vehicles. In: ANNUAL IEEE/IFIP INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEPENDABLE SYSTEMS AND NETWORKS WORKSHOPS, 46. **Proceedings...** Toulouse, France, 2016. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7575374>. Acesso em: Julho, 2017.

BERGER, C.; RUMPE, B. Autonomous Driving - 5 Years after the Urban Challenge: The Anticipatory Vehicle as a Cyber-Physical System. In: IEEE/ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATED SOFTWARE ENGINEERING, 27. **Proceedings...** Essen, Germany, 2012. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1409.0413.pdf>. Acesso em: Agosto, 2017.

BEVLY, D.; CAO, X.; GORDON, M.; OZBILGIN, G.; KARI, D.; NELSON, B.; WOODRUFF, J.; BARTH, M.; MURRAY, C.; KURT, A.; REDMILL, K.; OZGUNER, U. Lane Change and Merge Maneuvers for Connected and Automated Vehicle: A Survey. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, v. 1, n. 1, p. 105-120, Março 2016.

CAMARGO JR, J. B.; NAUFAL JR, J. K.; VISMARI, L. F.; MOLINA, C. B. S. T.; GONZÁLEZ, I. R. Technical Report #4 High-Level Preliminary Framework Specification, Design and Development Lifecycle. Janeiro, 2017.

CAMARGO JR, J.B.; VISMARI, L.F. Challenges in Safety Assessment of Complex Critical Infrastructures. In: IEEE FIFTH LATIN-AMERICAN SYMPOSIUM ON DEPENDABLE COMPUTING WORKSHOPS. **Proceedings...** São José dos Campos, Brazil, 2011. Acesso em: Março, 2017

CAMPBELL, M.; EGERSTEDT, M.; HOW, J. P.; MURRAY, R. M. Autonomous driving in urban environments: approaches, lessons and challenges. **Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 368, n. 1928, p. 4649-4672, Outubro 2010.

DARPA. Urban Challenge. Disponível em: <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/>. Acesso em: 22 de Dezembro de 2016.

E. OHN-BAR, E.; TRIVEDI, M. M. Looking at Humans in the Age of Self-Driving and Highly Automated Vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, v. 1, n. 1, p. 90-104, Março 2016.

IEEE Std 1474.1. IEEE Standard for Communications - Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements. IEEE Vehicular Technology Society. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1405808>. Acesso em: Fevereiro, 2017.

ISO. International Organization for Standardization. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/43464.html>. Acesso em: 24 de Março de 2017.

KALRA, N.; PADDOCK, S. M. Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 94, pp.182–193, 2016.

KHAITAN, S. K.; MCCALLEY, J. D. Design Techniques and Applications of Cyberphysical Systems: A Survey. **IEEE Systems Journal**, v. 9, n. 2, p. 350–365, 2015.

LITMAN, T. Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. **Transportation Research Board Annual Meeting**, p. 36–42, 2014.

MOLINA, C. B. S. T.; GONZÁLEZ, R. I. R.; CAMARGO, J. B.; ALMEIDA, J. R.; VISMARI, L. F.; NAUFAL, J. K.; INAM, R.; AZEVEDO, C. R. B. A comparison of two simulators to support safety analysis in autonomous vehicles. In: INTERNATIONAL EUROPEAN SAFETY AND RELIABILITY CONFERENCE (ESREL), 27. **Proceedings...** Portorož, Slovenia, 2017. Acesso em: Julho, 2017[a].

MOLINA, C. B. S. T.; ALMEIDA, J. R.; VISMARI, L. F.; GONZÁLEZ, R. I. R.; NAUFAL, J. K.; CAMARGO, J. B. Assuring Fully Autonomous Vehicles Safety by Design: The Autonomous Vehicle Control (AVC) Module Strategy. In: ANNUAL IEEE/IFIP INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEPENDABLE SYSTEMS AND NETWORKS WORKSHOPS, 47. **Proceedings...** Denver, USA, 2017. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8023692>. Acesso em: Julho, 2017[b].

NAUFAL, J.K. et al., 2017. A2CPS: A Vehicle-Centric Safety Conceptual Framework for Autonomous Transport Systems. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, pp.1–15.

ÖZGÜNER, Ü.; REDMILL, K.; STILLER, C. System for Safety and Autonomous Behavior in Cars: The DARPA Grand Challenge Experience. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, p. 397-412, 2007.

PADEN, B.; ČÁP, M.; YONG, Z. S.; YERSHOV, D.; FRAZZOLI, E. Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, v. 1, n. 1, p. 33-55, Março 2016.

POST GAZZETE. Disponível em: <http://www.post-gazette.com/opinion/OpEd/2016/09/19/Barack-Obama-Self-driving-yes-but-also-safe/stories/201609200027>. Acesso em: Junho, 2017.

QU, F.; WANG, F. Y.; YANG, L. Intelligent Transportation Spaces: Vehicles, Traffic, Communications, and Beyond. **IEEE Communications Magazine**, v. 48, n. 11, p. 136–142, 2010.

REIF, K. Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems: Function, Regulation and Components. Germany: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-658-03978-3.

SAE INTERNACIONAL J3016. Surface Vehicle Recommended Practice. Disponível em: J3016_201609.pdf. Acesso em: Fevereiro, 2017.

SALAY, R.; QUEIROZ, R.; CZARNECKI, K. An Analysis of ISO 26262: Using Machine Learning Safely in Automotive Software. arXiv 1709.02435, 2017.

SUSSMAN, J. M. **Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS)**. Springer, 2005. ISBN: 0-387-23257-5.

VISMARI, L. F.; MOLINA, C. B. S. T.; CAMARGO, J. B.; ALMEIDA, J. R.; INAM, R.; FERSMAN, E.; MARQUEZINI M. V. A simulation-based safety analysis framework for autonomous vehicles - assessing impacts on Road Transport System's safety and efficiency. In: INTERNATIONAL EUROPEAN SAFETY AND RELIABILITY CONFERENCE (ESREL). **Proceedings...** Trondheim,Norway,2018. Acesso em: Junho, 2018[a].

VISMARI, L. F.; CAMARGO, J. B.; JAMIL, K. N.; ALMEIDA, J. R.; MOLINA, C. B. S. T.; INAM, R.; FERSMAN, E.; MARQUEZINI M. V. A Fuzzy logic, risk-based autonomous vehicle control approach and its impacts on road transportation safety. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON VEHICULAR ELECTRONICS AND SAFETY (ICVES). **Proceedings...** Madrid, Spain, 2018. Acesso em: Setembro, 2018[b].

WORK, D.; BAYEN, A.; JACOBSON, Q. Automotive Cyber Physical Systems in the Context of Human Mobility. In: NATIONAL WORKSHOP ON HIGH-CONFIDENCE AUTOMOTIVE CYBER-PHYSICAL SYSTEMS. **Proceedings...** Troy, USA, 2008. Disponível em: <http://bayen.eecs.berkeley.edu/sites/default/files/conferences/cps1.pdf>. Acesso em: Dezembro, 2016.

ZHANG, L. An integration approach to specify and model automotive cyber physical systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONNECTED VEHICLES AND EXPO (ICCVE). **Proceedings...** Las Vegas, USA, 2013. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6799856>. Acesso em: Dezembro, 2016.

APÊNDICE A - CÓDIGOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO CVA

Este apêndice apresenta os códigos do CVA (implementado no Matlab) e o do PVA (camada de proteção do CVA) representados pela Figura 25 e Figura 26, respectivamente. Vale ressaltar que o do OVA não será apresentado uma vez que o mesmo não é o foco deste trabalho.

Por fim é apresentado o código completo do motorista autônomo.

1. Código do sistema CVA

Figura 25 - Código do Controle Veicular Autônomo

```
while(1==1)

    DataRead = receiveData(t);

    [objectProjDist, objectWidthDist, v] = SplitStringPVA(DataRead);
    [accelPVA, brakePVA, Dmin] = calculateAccelPVA(v, objectProjDist, objectWidthDist);
    [accel, brake] = calculateAccel(v, objectProjDist, objectWidthDist, fis, simFail);

    if(previousBrake == 1.2)
        sendData(t, 0.0 , 1.2);
        previousAccel = 0.0 ;
        previousBrake = 1.2 ;
    else
        if(brakePVA == 1.2)
            sendData(t, 0.0, 1.2);
            previousAccel = 0.0;
            previousBrake = 1.2;
        else
            sendData(t, accel, brake);
            previousAccel = accel;
            previousBrake = brake;
        end
    end
end
end
```

Fonte: Desenvolvido pela autora

Fazendo um paralelo entre a Figura 10 e o código do CVA apresentado acima, observa-se que:

1. Os dados do veículo autônomo são recebidos pelas camadas por meio das funções '*receiveData*' e '*SplitStringPVA*'. Em seguida, estes dados são passados para as funções: '*calculateAccelPVA*' e '*calculateAccel*', as quais calculam, respectivamente, as taxas de aceleração e frenagem do PVA e do OVA.
2. Em seguida as taxas são analisadas conforme apresentado na Figura 10. A lógica apresentada pode ser resumida da seguinte maneira:

- se o PVA tiver sido acionado, ou seja, se o último valor de taxa de frenagem enviada for de 1,2. Tal valor (1,2) continua sendo enviado ao veículo autônomo por meio da função '*sendData*';
- caso o PVA não tenha sido acionado, verifica se o valor de frenagem calculado pelo PVA é 1,2 (o que indica que o mesmo está sendo acionado no momento).
 - Se a verificação for verdadeira, ou seja, se a taxa de frenagem calculada pelo PVA for 1,2; o valor 1,2 é enviado ao veículo autônomo por meio da função '*sendData*'.
 - Se a verificação for falsa, ou seja, se a taxa de frenagem calculada pelo PVA for 0; o valor de taxa de frenagem calculado pelo OVA é enviado ao veículo autônomo por meio da função '*sendData*'.

A explicação dada anteriormente conclui a relação entre as linhas de código (Figura 25) com a Figura 10 apresentada no desenvolvimento do trabalho.

2. Código da camada PVA

Figura 26 - Código da Proteção Veicular Autônoma

```
function [ accel, brake, Dmin ] = calculateAccelPVA( v, objectProjDist, objectWidthDist)

    conflictDistance = 3;
    maximumBrake = 7.6;
    sensorRange = 60;

    Dmin = (v*v)/(2 * maximumBrake);
    danger = false;

    for i = 1:length(objectProjDist)
        if ((objectProjDist(i) > 0) && (objectProjDist(i) < sensorRange) &&
            (objectWidthDist(i) < conflictDistance) && (objectProjDist(i) < Dmin))
            danger = true;
        end
    end

    if danger
        accel = 0;
        brake = 1.2;
    else
        accel = 0;
        brake = 0;
    end
end
```

Fonte: Desenvolvido pela autora.

A Tabela 21 apresenta uma explicação de cada um dos parâmetros utilizados no programa (Figura 26) e uma breve explicação sobre eles. A partir desta tabela é possível fazer um paralelo com o que foi explicado a partir da Figura 11.

Parâmetro	Descrição
<i>conflictDistance</i>	Distância mínima lateral para que o veículo autônomo não esbarre em nenhum obstáculo. Este é um valor fixo de 3 metros.
<i>maximumBrake</i>	É a desaceleração máxima que será considerada. Vale ressaltar que esta não é a desaceleração máxima permitida, porém foi considerada uma margem de erro - até mesmo para que a desaceleração não seja abrupta (a próxima subseção explica como funciona a frenagem neste ambiente de simulação). Assim, foi considerada uma desaceleração de $7,6 \text{ m/s}^2$.
<i>sensorRange</i>	É o raio de cobertura dos sensores. No OpenDS não existe o conceito de sensores e, sim, de posição (em termos de coordenadas). Assim, todas as distâncias de todos os possíveis obstáculos são enviadas ao Matlab. No entanto, para representar um ambiente real, o motorista autônomo só pode considerar o que estiver dentro da sua área de detecção. No caso em questão esta área é de 60 metros ²⁵ (valor fixo).
<i>objectProjDist</i>	É um vetor que contém todas as distâncias frontais a cada instante de todos os obstáculos presentes no cenário.
<i>objectWidthDist</i>	É um vetor que contém todas as distâncias laterais a cada instante de todos os obstáculos presentes no cenário.
<i>danger</i>	É um parâmetro booleano que indica se o veículo autônomo se encontra em uma situação de risco em um determinado instante, na qual o PVA é ativado. Assim, se este parâmetro for <i>true</i> o PVA é ativado (mandando o valor de 1,2 para a taxa de frenagem), caso contrário não (quando for <i>false</i>).
<i>accel</i>	É um parâmetro que indica a taxa de aceleração calculada pelo PVA em um determinado instante. Sempre terá seu valor igual a zero.
<i>brake</i>	É um parâmetro que indica a taxa de desaceleração calculada pelo PVA em um determinado instante. Terá seu valor igual a zero (risco não

²⁵ Valor obtido no dia 15 de Novembro de 2017 em: <https://www.tesla.com/autopilot?redirect=no>

Parâmetro	Descrição
	detectado) ou 1,2 (risco detectado).

Tabela 21 - Parâmetros do código fonte do submódulo PVA

3. Código do motorista autônomo

Figura 27 - Código do motorista autônomo

```

t = initializeConnection();
simFail = 0; % simulate A2CPS sensor failure
fis = [readfis('IZW'), readfis('RLM'), readfis('brake')];
previousMark = 'delim1';
previousAccel = 0.01;
previousBrake = 0.01;

while(1==1)

    DataRead = receiveData(t);

    [objectProjDist, objectWidthDist, v] = SplitStringPVA(DataRead);
    [accelPVA, brakePVA, Dmin] = calculateAccelPVA(v, objectProjDist, objectWidthDist);
    [accel, brake] = calculateAccel(v, objectProjDist, objectWidthDist, fis, simFail);

    if(previousBrake == 1.2)
        sendData(t, 0.0 , 1.2);
        previousAccel = 0.0 ;
        previousBrake = 1.2 ;
    else
        if(brakePVA == 1.2)
            sendData(t, 0.0, 1.2);
            previousAccel = 0.0;
            previousBrake = 1.2;
        else
            sendData(t, accel, brake);
            previousAccel = accel;
            previousBrake = brake;
        end
    end
end
end

```

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Analisando a Figura 27, percebe-se que primeiramente o programa inicializa a conexão com o servidor (*initializeConnection*) e passa a receber a mensagem enviada pelo OpenDS a cada iteração (*receiveData*). Em seguida, a mensagem passa por um função chamada '*SplitStringPVA*' que extrai os dados da mensagem recebida para que sejam utilizadas nas demais funções. Os cálculos para obtenção da taxa de aceleração e de frenagem são feitos

através das funções '*calculateAccelPVA*' e '*calculateAccel*', as quais recebem os dados enviados pelo OpenDS e retornam os valores de intensidade de aceleração e frenagem que devem ser enviados ao OpenDS pela função '*sendData*'. O código de cada uma destas funções foi explicado na seção de Estudo de Caso.

APÊNDICE B - TABELAS DE DADOS

Este apêndice apresenta as tabelas de dados que foram utilizadas na avaliação dos testes feitos neste trabalho. As tabelas estão divididas em seções de acordo com o conjunto de teste ao qual pertencem.

Vale ressaltar que os dados que foram destacados indicam que houve colisão.

1. Primeiro conjunto de testes

Velocidade (km/h)	Taxa de Aceleração	Taxa de Frenagem	Distância do Obstáculo (m)
100,11	0,3	0,65008	19,4008
100,14	0,3	0,65008	17,9933
99,82	0	0,65006	16,6048
98,81	0	0,65026	15,2219
97,8	0	0,6513	13,8373
96,79	0	0,65311	12,4681
95,77	0	0,67353	11,0883
94,71	0	0,7415	9,7564
93,59	0	0,7488	8,4425
92,45	0	0,7488	7,1555
91,29	0	0,74999	5,8807
90,14	0	0,75723	4,6129
88,96	0	0,79673	3,3765
87,7	0	0,87398	2,1126
86,37	0	0,87398	0,9652
6,34	0	0,87398	0,9369
3,67	0	0,87398	0,9715
2,05	0	0,74857	0,9973

Tabela 22 - Tabela de dados referente a Tabela 15 (linha 1)

2. Terceiro conjunto de testes

a. Falha para valores de intensidade de freio menor que 0,3

Velocidade (km/h)	Taxa de Aceleração	Taxa de Frenagem	Distância do Obstáculo (m)
126,01	1	0	59,2219
126,2	1	0	57,437
126,39	0	1,2	55,6788
125,22	0	1,2	53,9253
123,38	0	1,2	52,1909
121,55	0	1,2	50,4871
119,73	0	1,2	48,808

117,91	0	1,2	47,149
116,1	0	1,2	45,5011
114,3	0	1,2	43,8952
112,5	0	1,2	42,3011
110,7	0	1,2	40,7243
108,9	0	1,2	39,2006
107,1	0	1,2	37,696
105,3	0	1,2	36,2088
103,5	0	1,2	34,7443
101,7	0	1,2	33,3142
99,9	0	1,2	31,9034
98,11	0	1,2	30,5131
96,31	0	1,2	29,151
94,51	0	1,2	27,8189
92,71	0	1,2	26,5191
90,91	0	1,2	25,244
89,11	0	1,2	23,9728
87,31	0	1,2	22,753
85,51	0	1,2	21,5553
83,71	0	1,2	20,3624
81,91	0	1,2	19,1783
80,11	0	1,2	18,042
78,31	0	1,2	16,944
77,11	0	1,2	16,2293
75,31	0	1,2	15,1468
72,91	0	1,2	14,1163
71,12	0	1,2	13,112
69,32	0	1,2	12,1344
67,52	0	1,2	11,1699
65,72	0	1,2	10,2419
63,92	0	1,2	9,3299
62,12	0	1,2	8,4496
60,32	0	1,2	7,5747
58,52	0	1,2	6,7464
56,72	0	1,2	5,9361
54,92	0	1,2	5,1572
53,12	0	1,2	4,4038
51,32	0	1,2	3,6633
49,52	0	1,2	2,9605
47,72	0	1,2	2,2905

45,93	0	1,2	1,6512
44,13	0	1,2	1,0561
3,6	0	1,2	0,9567

Tabela 23 - Tabela de dados referente a Tabela 17 (linha 1)

Velocidade (km/h)	Taxa de Aceleração	Taxa de Frenagem	Distância do Obstáculo (m)
128,21	1	0	37,4118
128,39	1	0	35,6313
128,57	0	0,33921	33,8451
128,21	0	0,42975	32,0437
127,71	0	0,6156	30,8515
126,44	0	0,6334	29,0524
125,42	0	0,64989	27,2904
124,37	0	0,66652	25,5485
123,31	0	0,66652	23,825
122,23	0	0,70354	22,1158
121,11	0	0,73507	20,4119
119,95	0	0,7488	18,7337
118,77	0	0,74961	17,0761
117,6	0	0,74683	15,4127
116,43	0	0,73447	13,7817
115,28	0	0,76931	12,166
114,1	0	0,79319	10,5766
112,88	0	0,79319	8,9899
111,67	0	0,78033	7,4293
110,48	0	0,769	5,8749
109,3	0	0,81576	4,3346
108,06	0	0,87398	2,8293
106,73	0	0,87398	1,3737
15,78	0	0,87398	1,0131

Tabela 24 - Tabela de dados referente a Tabela 18 (linha 1)