



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

ARTHUR DÓRIA MENESES DE FREITAS

Análise de Topologias de Fluxo de Informação (IFT) em Veículos Autônomos e Conectados (CAV) para aplicações *Platoon*

Recife

2022

ARTHUR DÓRIA MENESES DE FREITAS

Análise de Topologias de Fluxo de Informação (IFT) em Veículos Autônomos e Conectados (CAV) para aplicações *Platoon*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Engenharia da Computação

Orientador (a): Prof. Dr. Abel Guilhermino da Silva Filho

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecária Nataly Soares Leite Moro, CRB4-1722

F866a Freitas, Arthur Dória Meneses de
Análise de Topologias de Fluxo de Informação (IFT) em Veículos Autônomos e Conectados (CAV) para aplicações *Platoon* / Arthur Dória Meneses de Freitas. – 2022.
120 f.: il., fig., tab.

Orientador: Abel Guilhermino da Silva Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2022.
Inclui referências.

1. Engenharia da computação. 2. Information flow topology. 3. Segurança. 4. Connected and automated vehicles. 5. *Platoon*. I. Silva Filho, Abel Guilhermino da (orientador). II. Título

621.39

CDD (23. ed.)

UFPE - CCEN 2023 – 005

Arthur Dória Meneses de Freitas

“Análise de Topologias de Fluxo de Informação (IFT) em Veículos Autônomos e Conectados (CAV) para aplicações Platoon”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Engenharia da Computação.

Aprovado em: 29 de agosto de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Divanilson Rodrigo de Sousa Campelo
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva Teixeira
Faculdade do Gama / UnB

Prof. Dr. Abel Guilhermino da Silva Filho
Centro de Informática / UFPE
(Orientador)

RESUMO

Os Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) têm como foco a gestão da mobilidade urbana, otimização do uso de estradas, redução dos impactos ambientais e melhoria da segurança de todos os elementos envolvidos no tráfego, para isso, essa tecnologia considera que os veículos, os pedestres e a infraestrutura são nós de uma grande rede de informações colaborativas. Dentre as aplicações do ITS, o *platooning* é uma das que mais tem atraído interesse da comunidade científica e da indústria, uma vez que a ideia engloba simultaneamente inúmeros benefícios ITS. Um *platoon* veicular, ou pelotão de veículos, se refere a grupos de veículos, conectados e automatizados (CAVs), sincronizando movimentos durante o percurso numa rodovia. Essa estratégia permite que uma menor distância seja mantida entre os veículos, reduzindo o arrasto aerodinâmico e aumentando a densidade de veículos da via. No entanto, a sincronia entre os veículos e o desempenho global do platoon depende da Topologia de Fluxo de Informações (IFT), ou seja, da estratégia que o platoon utiliza para difundir informações entre os veículos, e de perturbações externas, como, por exemplo, falha na entrega de mensagens na rede intraveicular. Por consequência, a instabilidade de um platoon pode implicar desde a impossibilidade de manter o agrupamento até um cenário de risco de vida para ocupantes dos veículos. Diante do problema exposto, este trabalho analisa a influência das IFT em platoon em cenários com diferentes probabilidades de sucesso na recepção de mensagens para todos os pares de veículos. Os cenários foram simulados no framework PLEXE (Platooning Extension for Veins), e tem como base o protocolo para ambientes veiculares IEEE 802.11p. Os resultados foram obtidos a partir da análise de mais de cem mil simulações com diferentes IFT combinados com diversos percentuais de taxa perda de pacotes, e mostram que o controlador baseado em consenso com a topologia Predecessor-Follower (PF) tem melhor desempenho global com relação a estabilidade do platoon, com erro de espaçamento médio entre os veículos de 3,68%, mesmo sob uma taxa de 95% perda de pacotes.

Palavras-chaves: information flow topology; segurança; connected and automated vehicles; platoon; comunicação V2V.

ABSTRACT

Intelligent Transportation Systems (ITS) are focused on managing urban mobility, optimizing the use of roads, reducing environmental impacts, and improving the safety of all elements involved in traffic. For this, this technology considers that vehicles, pedestrians, and infrastructure are nodes in a network, where each one collects and provides information through a network of very high reliability, capable of keeping all ITS services functional. Among ITS applications, platooning is one of the ones that has attracted the most interest from the scientific community and industry. A vehicular platoon, or platoon of vehicles, is a group of connected and automated vehicles (CAVs) traveling in the same lane of a highway with a short distance between vehicles, coordinated by one of the vehicles in the group, called the leader. Each vehicle in a Platoon transmits its location, speed, and instantaneous acceleration to the others. The information is shared at all times between the vehicles in the group, ensuring the smallest possible spacing between them while ensuring requirements and driver safety. A Platoon's Information Flow Topology (IFT) represents the inter-vehicle communication connections each vehicle uses to acquire information. Therefore, the topology architecture represents the physical arrangement between the vehicles in the platoon and can significantly influence the platoon's collective and cooperative driving behavior. Information exchange is essential for effective control of the platoon. It synchronizes acceleration and braking actions while maintaining safe distances and relative speeds close to zero. IFTs can be described graphically, from directed graphs that represent the allowed interconnections, or through an adjacency matrix. The performance of a Platoon depends directly on the topology of the information flow and the quality of the wireless communications, which is highly influenced by the medium access control (MAC) protocol of the IEEE 802.11p protocol. This work analyzes the influence of IFTs in Platoon in simulated scenarios, where there are different probabilities of success in receiving messages for all pairs of vehicles. Furthermore, the study of an IFT needs to consider the various problems that can occur in a wireless vehicular communication system, such as poor connectivity between vehicles, high latency, or high packet loss rates.

Keywords: information flow topology, safety, connected and automated vehicles, platoon, V2V communication.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formato do <i>beacon</i> utilizado	20
Figura 2 – Fluxo de mensagens unidirecional em uma fila de veículos	22
Figura 3 – Exemplo de topologia bidirecional	22
Figura 4 – Topologia de vizinhança não direcionada h	22
Figura 5 – Topologia TPF	22
Figura 6 – Efeitos aerodinâmicos no <i>platoon</i>	23
Figura 7 – Configuração do sistema de <i>platoon</i> de veículos com base na política de CTH	25
Figura 8 – Estrutura modular do OMNeT++	30
Figura 9 – Visão geral da estrutura de simulação com acoplamento cliente-servidor . .	31
Figura 10 – Interface gráfica do SUMO durante uma simulação	32
Figura 11 – Visão geral da estrutura de simulação acoplada do VEINS	33
Figura 12 – Comunicação entre OMNeT++ e SUMO através da interface TraCi	35
Figura 13 – Simulação de <i>platoon</i> no <i>framework</i> Plexe	36
Figura 14 – IFT analisadas por WU et al. (2020) (a) PF; (b) LPF; (c) BD; (d) LTBD . .	37
Figura 15 – Resultados comparativo das IFT analisadas por WU et al. (2020): (a) BD; (b) LBD; (c) LTDB	38
Figura 16 – Representação das IFT testadas: (a) TPF, (b) LPF, (c) BDL e (d) IFT aleatória	40
Figura 17 – Resultados política de espaçamento de intervalo de tempo constante apre- sentada por ZHAO; CAI; CHENG (2021)	41
Figura 18 – IFT analisadas por GE et al. (2022): (a) BD; (b) LTBD; (c) LBD; (d) LPBD	44
Figura 19 – Desempenho do controlador DESM sob BD	45
Figura 20 – Sistema de controle de um <i>platoon</i>	46
Figura 21 – Plataforma de co-simulação desenvolvida	47
Figura 22 – Representação de um <i>platoon</i> com Hybrid LPF	48
Figura 23 – Protótipo de <i>platoon</i> no campus da Escola Central de Nantes (ECN) . . .	49
Figura 24 – Resultados experimentais do <i>platoon</i> : (a) Aceleração. (b) Velocidade. (c) Erro de espaçamento. (d) Erro de velocidade.	49

Figura 25 – Cenários de convergência: (a) para múltiplos platoons em múltiplas pistas (b) para formar um <i>platoon</i> mais complexo único <i>platoon</i> em uma única pista	50
Figura 26 – Representação controle longitudinal: (a) ACC (b) CACC e (c) CACC-granulado	52
Figura 27 – Resultados do método CACC-granulado proposto	53
Figura 28 – ICT e empresas do setor automobilístico participantes do SegurAuto	56
Figura 29 – Funções de Segurança Assistida ao Condutor e Ambiente para Veículos Autônomos	57
Figura 30 – Fluxo de análise da metodologia proposta	58
Figura 31 – <i>Highway</i> simulada pelo Plexe	60
Figura 32 – Simulação da comunicação V2V no <i>framework</i> Plexe	61
Figura 33 – Estrutura dos dados de um <i>Dataframe</i>	62
Figura 34 – LPF	72
Figura 35 – Deslocamento do <i>platoon</i> ao longo de uma rodovia	73
Figura 36 – Velocidade instantânea dos veículos de <i>platoon</i>	74
Figura 37 – Velocidade relativa para o Líder (RSL)	74
Figura 38 – Erro percentual de velocidade para o Líder (PSEL)(%)	75
Figura 39 – Aceleração instantânea de veículos em um <i>platoon</i>	75
Figura 40 – Distância para o predecessor	76
Figura 41 – Erro percentual da distância inter-veicular para o Predecessor - (PEP)	77
Figura 42 – Deslocamento do <i>platoon</i> ao longo de uma rodovia	78
Figura 43 – Velocidade instantânea dos Líderes	79
Figura 44 – Erro percentual médio de velocidade para o Líder	80
Figura 45 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Predecessor (MPEP)	80
Figura 46 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Líder (MPEL)	81
Figura 47 – Deslocamento do <i>platoon</i> ao longo de uma rodovia	83
Figura 48 – Velocidade instantânea dos Líderes durante o trajeto	84
Figura 49 – Erro percentual médio de velocidade para o Líder	84
Figura 50 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Predecessor (MPEP)	85
Figura 51 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Líder (MPEL)	85
Figura 52 – Erro percentual médio de velocidade para o Líder	88
Figura 53 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Predecessor (MPEP)	88
Figura 54 – MPEP de Baixa Velocidade	90

Figura 55 – MPEL de Baixa Velocidade	93
Figura 56 – MPEP de Média Velocidade	95
Figura 57 – MPEL de Média Velocidade	97
Figura 58 – MPEP de Elevada Velocidade	99
Figura 59 – MPEL de Elevada Velocidade	101
Figura 60 – MPEP de Ultra Elevada Velocidade	103
Figura 61 – MPEL de Ultra Elevada Velocidade	105
Figura 62 – Taxa de Colisões por IFT	109
Figura 63 – NC por velocidade	110
Figura 64 – Taxa de Colisões por faixa de velocidade	110
Figura 65 – NC por faixa de velocidade	111
Figura 66 – MPEP médio de todas simulações	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos campos do <i>beacon</i> utilizado na comunicação V2V do <i>platoon</i> .	20
Tabela 2 – Comparação do cenários de teste dos trabalhos relacionados	54
Tabela 3 – Comparação das métricas de desempenho dos trabalhos relacionados	55
Tabela 4 – Versões dos simuladores utilizados	59
Tabela 5 – Parâmetros da Simulação	64
Tabela 6 – Parâmetros de Simulação da Rede	65
Tabela 7 – Faixas de velocidade adotadas	69
Tabela 8 – Número de Simulações da Faixa de Velocidade por FER	70
Tabela 9 – Parâmetros da Simulação	72
Tabela 10 – Parâmetros da Simulação	77
Tabela 11 – Deslocamento do <i>platoon</i> ao longo de uma rodovia	78
Tabela 12 – Comparativo dos cenários utilizados na análise desta seção	82
Tabela 13 – Variação do parâmetro de cada uma das simulações	82
Tabela 14 – Velocidades médias, máximas e mínimas de cada cenário	83
Tabela 15 – Velocidades vs. desempenho do <i>platoon</i>	86
Tabela 16 – Variação da taxa de perda de pacotes	87
Tabela 17 – Comparativo dos cenários utilizados na análise de falhas na comunicação de um <i>platoon</i>	89
Tabela 18 – Faixas de velocidade adotadas para cada um dos cenários	90
Tabela 19 – Comparativo da MPEP de cada IFT utilizada na análise de falhas na co- municação para baixas velocidades	92
Tabela 20 – MPEL de Baixa Velocidade por IFT	94
Tabela 21 – MPEP de Média Velocidade por IFT	96
Tabela 22 – MPEL de Média Velocidade por IFT	98
Tabela 23 – MPEP de Elevada Velocidade por IFT	100
Tabela 24 – MPEL de Elevada Velocidade por IFT	102
Tabela 25 – MPEP de Ultra Elevada Velocidade por IFT	104
Tabela 26 – MPEL de Ultra Elevada Velocidade por IFT	106
Tabela 27 – MPEP - IFT melhor desempenho por FER	107
Tabela 28 – MPEL - IFT melhor desempenho por FER	108

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.1.1	<i>Objetivos Específicos</i>	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	COMUNICAÇÃO VEICULAR	17
2.2	<i>PLATOON</i>	18
2.3	TOPOLOGIA DE FLUXO DE INFORMAÇÕES (IFT)	20
2.3.1	Fluxo direcional, hierarquia e topologia	21
2.3.2	Dinâmica de Nós	23
2.3.3	Geometria de Formação	24
2.3.4	Estabilidade e Robustez	26
2.3.4.1	<i>Estabilidade Interna</i>	26
2.3.4.2	<i>Estabilidade de corda</i>	27
2.3.4.3	<i>Escalabilidade</i>	28
2.4	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	29
2.4.1	OMNeT++	29
2.4.2	SUMO	30
2.4.3	VEINS	32
2.4.4	Plexe	34
3	TRABALHOS RELACIONADOS	37
3.1	CONTROLE DISTRIBUÍDO DE MODO DESLIZANTE	37
3.2	COMUNICAÇÃO NÃO IDEAL	40
3.3	PLATAFORMA DE CO-SIMULAÇÃO PARA <i>PLATOONS</i>	45
3.4	PROTÓTIPO DE <i>PLATOON</i> UM AMBIENTE URBANO	47
3.5	INOVAÇÕES DE CONTROLE PARA <i>PLATOON</i>	50
3.6	COMPARAÇÃO DOS TRABALHOS RELACIONADOS	53
4	METODOLOGIA PROPOSTA PARA ANÁLISE DE IFT	56
4.1	SEGURAUTO	56
4.2	FLUXO DE ANÁLISE DA METODOLOGIA PROPOSTA	57

4.3	CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	58
4.4	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO	59
4.5	COLETA DE DADOS	60
4.6	ANÁLISE DE DADOS	61
4.7	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	62
4.8	MÉTRICAS DE DESEMPENHO	65
4.9	ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MOBILIDADE	69
4.10	ANÁLISE DE DESEMPENHO DA COMUNICAÇÃO	70
5	RESULTADOS	71
5.1	SIMULAÇÃO DE LPF SOB CONFIGURAÇÃO ESPECÍFICA	71
5.2	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UMA SIMULAÇÃO	77
5.2.1	Variação do <i>Oscillation Frequency</i> (OF)	77
5.2.2	Variação da Velocidade	82
5.2.3	Variação da taxa de perda de pacotes	86
5.3	ANÁLISE DE IFT	89
5.3.1	Baixa Velocidade	90
5.3.2	Média Velocidade	94
5.3.3	Elevada Velocidade	98
5.3.4	Ultra Elevada Velocidade	102
5.3.5	MPEP	106
5.3.6	MPEL	107
5.4	ESTUDO DAS COLISÕES POR IFT	108
6	CONCLUSÃO	112
7	TRABALHOS FUTUROS	114
	REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

Dados do relatório *Global Status Report On Road Safety* de 2021 da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021), mostram que mais de 1,2 milhão de pessoas morreram vítimas de acidentes rodoviários ao redor do mundo e que mais de 90% dessas mortes ocorrem em países de baixa e média renda, onde estão localizado 48% dos veículos do mundo (WHO, 2021). Estima-se que esse problema custe em torno de 3% do produto interno bruto da maioria dos países (OPAS, 2019).

No Brasil, em 2021, a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2021), registrou 64.452 acidentes nas rodovias federais, no qual 5.391 vidas foram interrompidas. O órgão estima que, só em 2020, acidentes ocorridos em rodovias federais no Brasil custaram aos cofres nacionais cerca de 60 bilhões de reais.

Boa parte desses acidentes, vem da incapacidade humana de reagir a situações adversas em tempo hábil. JOHANSSON; RUMAR (1971), estimam que o tempo de reação de frenagem dos motoristas em situações inesperadas pode ser maior que 1,2 segundos, de forma que, 90% dos acidentes de trânsito são provocados por falhas humanas (National Highway Traffic Safety Administration, 2015).

Esses números contrastam com a "tímida" evolução tecnológica da indústria automobilística, quando comparada com os avanços da visão computacional e da inteligência artificial, principalmente no que diz respeito à forma como outras áreas, como medicina, física, engenharia elétrica e etc, têm se beneficiado dessas tecnologias. Pode-se dizer que a interação entre motorista e veículo se mantém praticamente a mesma do século passado para a esmagadora parcela dos condutores de veículos ao redor do mundo.

Contudo, empresas como Tesla, Audi, Mercedes, Renault, PSA, Nissan e Fiat tem buscado soluções voltadas para veículos autônomos e conectados (SHARMA; MURALI, 2017).

Diante da quantidade de mortes, dos custos materiais gerados pelos acidentes em rodovias e do desejo de aumentar a segurança e a capacidade de tráfego das estradas (ZHU; ZHU; ZHANG, 2020), empresas especializadas em segurança, montadoras de carros e universidades, uniram forças para desenvolver o conceito de Sistemas de Transporte Inteligentes (*Intelligent Transportation Systems, ITS*) (SHLADOVER, 2007), uso da cooperação e do compartilhando de informações, em tempo real, entre todos os elementos que compõem o tráfego. No ITS, veículo, infraestrutura e pedestre são vistos como componentes de rede, capazes de enviar e

receber sinais dos elementos na sua vizinhança (PRAYITNO; NILKHAMHANG, 2021), dessa forma, os nós desta rede devem trocar informações de tráfego e de segurança, a fim de garantir uma condução segura baseada no trabalho cooperativo (AL-JHAYYISH; SCHMIDT, 2018). Estudos mostram que o emprego do ITS pode reduzir o número de acidentes em até 18%, o consumo de combustível em até 12% e emissões de gases poluentes em 15% (ZHAO et al., 2021b).

Contudo, um ITS precisa do pleno funcionamento de tecnologias base como cidades inteligentes, condução autônoma, internet das coisas e principalmente de Redes Veiculares Ad-Hoc (*Vehicle Ad-Hoc Networks*, VANET).

Uma VANET se baseia no princípio das redes ad-hoc móveis, e foca na interação de veículos entre si e entre toda a infraestrutura. A troca de informações numa VANET pode acontecer de veículo-para-veículo (do inglês *Vehicle-to-Vehicle*, V2V), ou veículo-para-infraestrutura (do inglês *Vehicle-to-Infrastructure*, V2I) e de forma mais ampla pelo modelo veículo-para-tudo (*Vehicle-to-Everything*, V2X), cuja proposta é conectar os carros a tudo (GAO; SHI; CHEN, 2019). Dentre as aplicações ITS, uma estratégia promissora de gestão de tráfego tem despertado o interesse da comunidade científica e do setor de transporte rodoviário, é o agrupamento de vários veículos conectados em pelotões (*platoons*) (ROBINSON; CHAN; COELINGH, 2010).

Os veículos de um *platoon* são organizados em fila na rodovia, e deslocam-se de forma cooperativa, acelerando ou freando simultaneamente como um trem (RODONYI, 2018), mantendo a velocidade relativa dos veículos próximas de zero e um espaçamento seguro entre eles. A aplicação do *platoon* pode reduzir o congestionamento das rodovias, uma vez que todos os veículos têm velocidades coordenadas, e o uso da via é otimizado, devido ao aumento da densidade de veículos (RUAN et al., 2022a). Outra vantagem é que o menor espaçamento entre os carros reduz o arrasto aerodinâmico e, por consequência, reduz o consumo de combustível, principalmente num *platoon* composto por veículos de carga (GAO; SHI; CHEN, 2019; LESCH et al., 2021).

Com relação ao agrupamento dos veículos, pode-se dividir o *platoon* em dois tipos, o *platoon* Homogêneo e o Heterogêneo (ZHU; ZHAO; ZHONG, 2019). O primeiro diz respeito a um grupo formado apenas por veículos idênticos, ou seja, veículos de um mesmo modelo ou com características mecânicas e físicas muito similares, e o último refere-se ao grupo em que um veículo é de modelo, marca ou porte diferente dos demais. Dessa forma um ou mais veículos de um *platoon* Heterogêneo, tem características mecânicas e físicas diferente dos outros (WU et al., 2020; ZAKERIMANESH; QIU; TAVAKOLI, 2021; YAN et al., 2022).

O *platoon* também pode ser classificado de acordo com a topologia, ou seja, a forma

como os veículos se comunicam entre si na rede V2V (PRAYITNO; NILKHAMHANG, 2021). As principais topologias são: *Leader-Follower* (LF), onde apenas o carro líder envia informações para todos os automóveis do grupo; *Predecessor-Follower* (PF), no qual cada veículo recebe informações apenas do carro à sua frente; e *Two-Predecessor-Follower* (TPF), onde cada veículo se comunica com o carro predecessor e com o carro a frente do seu predecessor. A combinação desses três grupos básicos é comumente explorada para criar outras topologias como, por exemplo, *Leader-Predecessor-Follower* (LPF), *Two Predecessor-Leader Follower* (TPLF) e outros (ZHENG et al., 2014; ZHENG et al., 2016; LI; CHEN, 2017; ZHENG et al., 2017; GAO; SHI; CHEN, 2019; PRAYITNO; NILKHAMHANG, 2021).

A troca de mensagens entre veículos é classificada como Unidirecional ou Bidirecional (ZHENG et al., 2017). Na primeira forma, as informações são passadas somente do carro na hierarquia mais alta, ou seja, mais próximo do líder, para os de hierarquia mais baixa, ou seja, de menor proximidade com o líder (IVANCHEV et al., 2021). A topologia unidirecional de fluxo de informação, permite apenas que o veículo receba mensagens do veículo da frente. Enquanto que na bidirecional, ambos os carros podem trocar mensagens (CHEHARDOLI; GHASEMI, 2018).

O *platooning* pode ser visto como uma combinação de quatro componentes principais (LI et al., 2015a). A Dinâmica de Nós (DN), que descreve o comportamento dinâmico não linear de cada veículo do grupo, a Topologia de Fluxo de Informação (IFT) que define como os nós trocam informações entre si (ZHENG et al., 2016), o Controlador, que tenta garantir a estabilidade do platoon, mesmo em cenários onde há problemas de rede, e a Geometria de Formação (GF), a qual é responsável pelas políticas de espaçamento entre veículos (YADLAPALLI; DARBHA; RAJAGOPAL, 2006; ORKI; AROGETI, 2019; GAO; SHI; CHEN, 2019).

Com relação a comunicação V2V num *platoon*, o grande desafio está em como superar obstáculos da rede sem fio móvel (LENARSKA; WESOLOWSKI; SYBIS, 2020), uma vez que velocidades e distâncias relativas dos veículos, além de possíveis mudanças no seu entorno, podem provocar falhas de comunicação e baixa Qualidade de Serviço (*Quality of Service*, QoS) na rede, levando instabilidade ao *platoon* (KHAKSARI; FISCHIONE, 2012). A perda de pacotes pode criar situações onde avisos sobre frenagem de emergência, vindos do líder ou do veículo predecessor, não cheguem a tempo ao destinatário, reduzindo o tempo de reação, podendo provocar acidentes e até a morte dos ocupantes dos veículos (SCHAEUFELE et al., 2017; PRAYITNO; NILKHAMHANG, 2021).

Assim, faz-se necessário investigar a influência do QoS (BOBAN et al., 2018), sob a ótica da perda de pacotes, no comportamento dos veículos de um *platoon*, e como os diferentes

tipos de IFT se comportam sob esses cenários, uma vez que IFT está intimamente relacionada à forma como um veículo do grupo adquire informações dos veículos ao seu redor, além disso tem uma influência significativa no comportamento coletivo do pelotão (LI et al., 2015b). Outro ponto importante nessa problemática é a velocidade relativa dos veículos e a distância mantida entre eles conforme o QoS varia (NAIK; CHOUDHURY; PARK, 2019; COELHO et al., 2022).

Dessa forma, esse trabalho se propõe a analisar, através de simulações, o comportamento de veículos de um *platoon* sob diferentes configurações de IFT, faixas de velocidade e níveis de perda de pacotes. A combinação de valores desses parâmetros, permitirá simular desde cenários ideais até situações catastróficas com perdas total da comunicação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho global de um comboio de CAV, agrupados, na forma de um *platoon*, sob diferentes estratégias de IFT, e como cada uma dessas estratégias se comporta quando exposta a cenários onde há falhas na entrega de mensagens na rede inter-veicular, buscando identificar qual a melhor combinação de controlador e IFT para situações com substancial taxa de perda de pacotes.

O ponto de partida será a construção de um ambiente de simulação baseado no PLEXE, SUMO e OMNET++, *frameworks open source*, respaldados pela comunidade científica, o quais, de forma conjunta irão pavimentar os meios para obtenção dos resultados da proposta deste trabalho.

A ideia é que a partir do *framework* proposto, cenários sejam simulados onde seja possível mensurar o desempenho de um *platoon* com seis veículos sob diferentes combinações de IFT e diferentes probabilidades de sucesso na recepção de mensagens para todos os pares de veículos, e a partir daí montar um *dataset* com valores de referência e erro relativos de distância e velocidades dos veículos.

Ao fim, pretende-se expor os resultados obtidos e compará-los de forma crítica, para que novos trabalhos possam aplicar técnicas ligadas a inteligência artificial e aprendizagem de máquina, focando em propostas adaptativas para manutenção da estabilidade de *platoon*.

1.1.1.1 *Objetivos Específicos*

- Levantamento do estado da arte em redes veiculares e platoon;
- Estudo de IFT para *platoon*;
- Análise de simuladores e *frameworks open source* ligados ao tema da pesquisa;
- Definição de estratégias IFT e cenários de simulação;
- Montagem de ambiente de simulação;
- Validação do ambiente de simulação.
- Simulação de cenários e coleta de resultados;
- Análise dos resultados obtidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 COMUNICAÇÃO VEICULAR

As redes veiculares são divididas em redes intra-veiculares e inter-veiculares. As redes intraveiculares (*In-Vehicle Networking*) permitem que as informações de dentro dos veículos, como por exemplo sensores, sejam compartilhadas entre centrais eletrônicas (*Electronic Control Unit*, ECU). No Brasil, desde 2010 e nos EUA desde 1996, é obrigatório que cada veículo possua uma lista de todos os sensores e dispositivos de autodiagnóstico (do inglês *On Board Diagnostics*, OBD). Em contrapartida, as redes inter-veiculares VANET, foco deste trabalho, são formadas por sistemas de comunicação entre elementos que fazem parte de um ambiente de trânsito. Num sistema de rede veicular, cada elemento da rede, seja ele veículo, infraestrutura ou pedestre é denominado de nó. Estes nós são capazes de enviar e receber sinais na vizinhança, estando isentos de restrições devido as condições meteorológicas ou de tráfego (PRAYITNO; NILKHAMHANG, 2021).

Os sistemas de comunicação inter-veiculares têm um papel significativo na otimização do tráfego rodoviário e na melhoria da segurança ao permitir a colaboração em tempo real entre veículos e outros dispositivos nas proximidades. Os veículos conectados têm o potencial de melhorar significativamente a segurança, aumentar a eficiência, reduzir acidentes, diminuir o congestionamento do tráfego e reduzir o número de fatalidades (NAIK; CHOUDHURY; PARK, 2019; ZHU; ZHU; ZHANG, 2020).

As VANETs transmitem e recebem informações sobre a condição de tráfego atual com latência insignificante, permitindo que dispositivos de uma rede sem fio se comuniquem diretamente sem a necessidade de uma infraestrutura, como uma estação base, para coordenação de transferência de dados. Vários dispositivos podem usar uma rede VANET ao mesmo tempo e cada dispositivo participa do processo de roteamento calculando o caminho e transmitindo dados para outros dispositivos ao longo dessa rota (COELHO et al., 2022; GE et al., 2022).

Neste contexto, surgiram dois padrões de comunicação inter-veicular, IEEE 802.11p e 3GPP *Long-Term Evolution* (LTE) versão 14 (atualmente na versão 17). Baseado no protocolo 3GPP, surgiu o *Cellular-V2X* (C-V2X). Este protocolo usa conectividade celular móvel, 4G LTE ou 5G, para enviar e receber sinais de um veículo para outros veículos. Uma alternativa ao 3GPP é o IEEE 802.11p. Baseado neste padrão surgiram nos últimos anos dois protocolos: o *Intelligent Transportation System G5* (ITS-G5) desenvolvido pelo *European Telecommunications*

Standards Institute (ETSI) e *Dedicated Short-Range Communications* (DSRC) desenvolvido nos EUA, sendo o último o protocolo de comunicação veicular utilizada neste trabalho (ZHAO et al., 2021a).

O padrão IEEE 802.11p foi baseado no padrão IEEE 802.11a para Wi-Fi 3 com modificações nas camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC) para se adequar ao ambientes veiculares (MOLINA-MASEGOSA; GOZALVEZ; SEPULCRE, 2020). A camada MAC, localizada entre a camada Dados e a camada PHY, permite o controle dos nós dos sistemas de comunicação inter-veicular. A camada PHY permite a alta transferência de dados. A FCC (*Federal Communications Commission*) nos EUA reservou uma faixa de frequência entre 5,850 e 5,925 Gigahertz para comunicações dedicadas de curto alcance em ambientes veiculares (WAVE, 2010).

2.2 PLATOON

Platoon pode ser definido como uma tecnologia emergente capaz de agrupar e controlar veículos viajando em grupo com ações coordenadas de aceleração e frenagem (LI et al., 2018). Por ser uma tecnologia que minimiza a interação do motorista com o carro, é uma técnica não compatível com todos os veículos, sendo focada em veículos de última geração com maior grau de comportamento autônomo (SHARMA; MURALI, 2017).

Dentro das aplicações do ITS, o *platoon* é uma das tecnologias que mais tem atraído interesse da comunidade científica e da indústria, principalmente por ser capaz de prover uma série de benefícios simultâneos, tais como: a redução e controle de congestionamentos de rodovias; o melhor aproveitamento dos espaços em rodovias, devido a otimização do espaçamento entre os carros; menor arrasto aerodinâmico, devido à maior proximidade entre os veículos; e a redução do consumo de combustível (GAO; SHI; CHEN, 2019; LESCH et al., 2021).

A primeira implementação de um sistema de controle de *platoon* pode ser atribuída ao programa California PATH (SHLADOVER et al., 1991) no final da década de 1980. No programa PATH foram empregadas estratégias de controle linear para modelos de veículos linearizados em uma formação rígida, o radar foi o único sensor utilizado para detectar automóveis próximos, limitando a propagação do fluxo de informações para enlaces direcionados (SHLADOVER, 2007). Portanto, o sistema desenvolvido no projeto California PATH explora uma topologia de controle PF na qual os veículos do *platoon* só obtêm informações de seus vizinhos mais próximos, notadamente os veículos dianteiros e traseiros (SHEN et al., 2022).

Desde então, outros grupos de pesquisa realizaram o controle de *platoon* no mundo real, incluindo o SARTRE na Europa (ROBINSON; CHAN; COELINGH, 2010), Energy-ITS no Japão (TSUGAWA; KATO; AOKI, 2011), GCDC na Holanda (KHAKSARI; FISCHIONE, 2012) e ANR VALET na França (KHALIFA et al., 2021).

Dentro de um *platoon* existem quatro funções diferentes que cada membro pode exercer: Líder, Gerente, Membro Simples e Membro Solitário (OLIVEIRA, 2020). O Líder é o veículo a frente de *platoon*, sendo responsável por gerenciar as solicitações de entrada e saída de veículos, além de tomar as decisões em relação a dinâmica longitudinal do *platoon*. Periodicamente o Líder envia mensagens de atualização de velocidade, espaçamento e forma de condução para todo o *platoon*. O Gerente tem a responsabilidade de gerir a dinâmica interna do *platoon*, verificando periodicamente se existem mudanças na dinâmica ou de destino de cada membro (GE et al., 2020). O Membro Simples é um dos membros dentro de um *platoon* e não possui funções ativas na dinâmica do grupo. O Membro Solitário é um veículo que não pertence a um *platoon* ainda. Este não pode ingressar no *platoon* sem antes solicitar a autorização ao Líder. Caso um Membro Solitário seja autorizado a entrar no *platoon*, o mesmo deve calcular a viabilidade da manobra, variação de velocidade necessária, e se mover em direção a posição determinada pelo Líder (GONZALEZ, 2020).

Após entrar no *platoon*, o Membro Solitário passa a ser um Membro Simples e a depender da dinâmica, pode se tornar Gerente ou Líder do *platoon*. Quando agrupados, a forma como os veículos se comunicam determina a topologia do *platoon*. As três principais topologias são LF, PF e TPF.

Na topologia LF, apenas o líder envia informações para todos os veículos do grupo. A grande vantagem desse método é a simplicidade do modelo de negócio para troca de informações e a baixa demanda pelo canal de comunicação. Por outro lado, os carros mais distantes do líder podem sofrer com a cobertura limitada do sinal de rádio. Na PF, todos os veículos recebem mensagens do veículo imediatamente à sua frente (predecessor), através de sensores ou da rede veicular. Essa abordagem garante que todos os veículos estarão cobertos pelo sinal de rádio, por outro lado a informação é repassada apenas de um veículo ao próximo, demandando maior tempo para chegar ao destinatário. Outro ponto negativo é que o canal de comunicação pode ficar congestionado uma vez que o recurso será disputado por todos os veículos seguidores. Na topologia TPF, o veículo faz uso de informações do veículo predecessor e do veículo à frente do predecessor, para executar ações de controle. Porém, por receber mensagens de um maior número de veículos, o uso do canal de comunicação tende a ser maior que nas topologias

previamente mencionadas, além de requerer uma estratégia de controle mais complexa em relação. Outro detalhe é que a comunicação V2V dessas topologias pode ser unidirecional ou bidirecional (ZHENG et al., 2014;ZHENG et al., 2016;AL-JHAYYISH; SCHMIDT, 2018;ZHAO et al., 2021b).

Quando em formação, os membros do *platoon* trocam mensagens periódicas, chamadas de *beacons* (WAVE, 2010). Essas mensagens são disseminadas por cada veículo do grupo e basicamente levam informações de velocidade, posição, aceleração, coordenadas GPS da localização, e outras informações pertinentes para o controle do *platoon* (CHANG et al., 1991). O *dataframe* do *beacon* ilustrado na Figura 1, e o significado de cada campo do pacote está na Tabela 1. O intervalo para transmissão de *beacons* para as aplicações de *platooning* definido pelo ITS é de 100ms, ou seja, cada veículo do *platoon* envia 10 *beacons* por segundo (GALLARDO; MAKRAKIS; MOUFTAH, 2009;KHAKSARI; FISCHIONE, 2012;ZHU; ZHU; ZHANG, 2020).

Figura 1 – Formato do *beacon* utilizado

Cabeçalho	IdPlatoon	PosX	PosY	Timestamp	Comprimento	VelX	VelY	PacketSize	IdBeacon
-----------	-----------	------	------	-----------	-------------	------	------	------------	----------

Fonte: O Autor (2022)

Tabela 1 – Descrição dos campos do *beacon* utilizado na comunicação V2V do *platoon*.

Campo	Descrição
IdPlatoon	Identificador de <i>platoon</i> do veículo emissor da mensagem
PosX	Informa a posição do veículo no eixo das abscissas em plano cartesiano
PosY	Informa a posição do veículo no eixo das ordenadas em plano cartesiano
Timestamp	Informa o momento em que o beacon for gerado
Comprimento	Informa o tamanho do veículo para realizar o cálculo do espaçamento seguro
VelX	Informa a velocidade do veículo no eixo das abscissas em plano cartesiano
VelY	Informa a velocidade do veículo no eixo das ordenadas em plano cartesiano
PacketSize	Informa o tamanho da mensagem
IdBeacon	Informa o número sequencial da mensagem

Fonte: O Autor (2022)

2.3 TOPOLOGIA DE FLUXO DE INFORMAÇÕES (IFT)

O rápido desenvolvimento da comunicação sem fio V2V e da tecnologia de CAV enriqueceu as áreas de pesquisa focadas no fluxo de informações dentro de um *platoon*, uma vez que um

veículo pode se comunicar com veículos além de seu entorno imediato.

A IFT de um *platoon* descreve as conexões de comunicação inter-veicular que cada veículo utiliza para adquirir informações dos veículos ao seu redor. Dessa forma, a IFT influencia significativamente no comportamento de condução coletiva e cooperativa do *platoon*.

Portanto, uma topologia de rede inter-veicular V2X constitui uma rede *ad hoc* móvel com as seguintes características principais: todos os nós são provedores e encaminhadores de dados; a transmissão de dados advém de sensores em cada nó. Além disso, a topologia da rede é dinâmica devido às velocidades relativas entre os veículos e possíveis mudanças na vizinhança dos nós (ZHENG et al., 2014; PRAYITNO; NILKHAMHANG, 2021; RUAN et al., 2022b).

O sensoriamento entre veículos e a qualidade da comunicação também impactam o comportamento do *platoon*. Para considerar uma topologia de comunicação ideal, é necessário ignorar efeitos como atraso de troca de mensagens e efeitos de troca de papéis dentro do *platoon* (ZHU; ZHU; ZHANG, 2020).

A topologia do fluxo de dados define como cada nó recebe informações dos outros nós da rede. Como o IFT afeta significativamente o comportamento de um *platoon*, é crucial adaptar o IFT (por exemplo, controlando o poder de transmissão das comunicações) com base nas necessidades de controle do *platoon*. O controle do comportamento coletivo de vários CAV é baseado no conhecimento mútuo dos veículos sobre seus estados.

A decisão por qual IFT é feita com base nas necessidades de controle do *platoon* e na qualidade da comunicação. Várias topologias de fluxo de informação têm sido estudadas na literatura. As topologias de fluxo de informações mais usadas incluem PF, LPF, TPF, LTPF e *Bidirecional* (BD) (GAO; SHI; CHEN, 2019).

2.3.1 Fluxo direcional, hierarquia e topologia

O fluxo das informações trocadas entre os veículos de um *platoon* pode ser unidirecional ou bidirecional. Na troca unidirecional de informações, as informações são encaminhadas apenas do veículo da hierarquia mais alta, que está mais próximo do líder, para o veículo da hierarquia mais baixa, que está mais distante do líder. Sob uma topologia unidirecional PF, representada na Figura 2 abaixo, por exemplo, um *platoon* pode ser visto naturalmente como um sistema em cascata, com o veículo de trás, ou *Follower*, recebendo mensagens do veículo exatamente a frente, *Predecessor*.

Em uma topologia de fluxo de informações bidirecional, o controlador usa informações

Figura 2 – Fluxo de mensagens unidirecional em uma fila de veículos



Fonte: O Autor (2022)

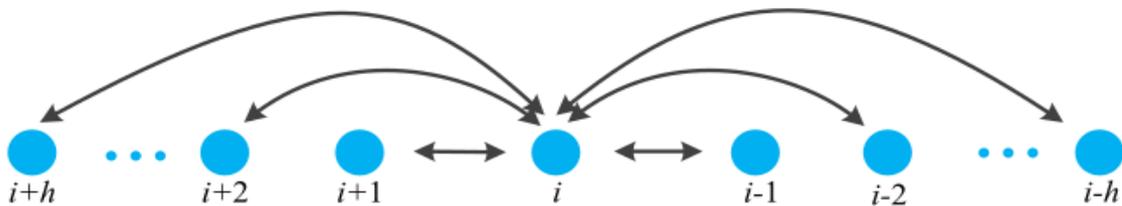
provenientes do veículo *Follower*, e do veículo *Predecessor* em sua estratégia de controle (CHEHARDOLI; GHASEMI, 2018), vide Figura 3.

Figura 3 – Exemplo de topologia bidirecional



Fonte: O Autor (2022)

Uma topologia de comunicação é chamada de h -vizinhança se cada seguidor puder alcançar seus h -vizinhos mais próximos no grafo. Portanto, a topologia bidirecional é um exemplo de topologia não direcionada em que $h = 1$, Figura 4.

Figura 4 – Topologia de vizinhança não direcionada h 

Fonte: (ZHENG et al., 2018)

Na topologia TPF, cada nó recebe mensagens do nó da hierarquia com até 2 *ranks* acima do seu e as transmite para nós com até 2 abaixo dele, Figura 5.

Figura 5 – Topologia TPF



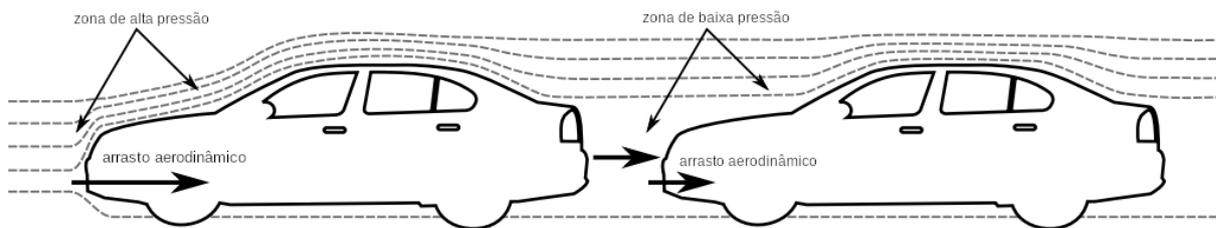
Fonte: O Autor (2022)

Conseqüentemente, à medida que o tamanho do *platoon* aumenta, o atraso de informação do veículo na cauda do *platoon* aumentará, reduzindo a estabilidade e limitando a escalabilidade do *platoon*.

2.3.2 Dinâmica de Nós

A ND define o comportamento dinâmico longitudinal dos veículos do *platoon*, como aceleração e frenagem movendo em linha reta em uma rodovia (ORKI; AROGETI, 2019). Segundo GAO; SHI; CHEN (2019) a dinâmica longitudinal do veículo é não linear e consiste de um modelo integrado do motor, sistema de freio, resistência ao rolamento, força gravitacional e arrasto aerodinâmico (demonstrado na Figura 6). No entanto, é difícil analisar o desempenho explícito de um modelo de controle de alta ordem, e muitos dos estudos sobre *platoons* não requerem problemas tão complexos. Mesmo assim, a suposição de modelos utilizados nos estudos ainda captura muitas características da dinâmica do veículo. E segundo SHEN et al. (2022), a estabilidade do modelo pode ser garantida selecionando cuidadosamente os parâmetros de controle de ordem inferior.

Figura 6 – Efeitos aerodinâmicos no *platoon*



Fonte: (LESCH et al., 2021)

A dinâmica do veículo é comumente classificada em modelos não lineares, lineares, de segunda ordem, de terceira ordem e de entrada única e saída única (SISO). Modelos lineares são usados com mais frequência para problemas em que a dinâmica do veículo não afeta os resultados, como por exemplo, estudos relacionados a qualidade da comunicação (KHALIFA et al., 2021). A grande maioria das aproximações utilizam a técnica de linearização por malha de realimentação para reduzir a ordem de grandeza do modelo da dinâmica do veículo (ABOLFAZLI; BESSELINK; CHARALAMBOUS, 2022). O modelo de integrador único é o caso mais simples, pois utiliza apenas a velocidade do veículo como entrada de controle e a posição como estado. Uma dinâmica veicular de segunda ordem, apesar de mais complexa, não leva em consideração muitas das características principais, como por exemplo, atraso inercial na dinâmica do *powertrain*.

Considerando um *platoon* longitudinal de $N + 1$ veículos com um líder e N seguidores, em que o índice 0 indica o veículo líder e os índices de 1 a N denotam os seguintes veículos. A

dinâmica longitudinal do i -ésimo veículo é descrita como

$$\dot{r}_i(t) = v_i(t) \quad (2.1)$$

$$v_i(t) = \frac{1}{M_i} u_i(t) \quad (2.2)$$

em que $r_i(t)$ é a i -ésima posição do veículo em metros (m), $v_i(t)$ é a i -ésima velocidade do veículo em metros por segundo [m/s] e $M_i(t)$ é massa em quilograma (kg). A dinâmica do líder é descrita pela posição do veículo líder, $r_0(t)$, e pela velocidade do veículo líder, $v_0(t)$. A força de entrada do controle, u_i , é descrita pela equação:

$$\dot{u}_i = \frac{1}{th} (u_{i-1} - u_i + k_p(r_{i-1} - r_i - c - d_{(i,i-1)}) + k_d(v_{i-1} - v_i)) \quad (2.3)$$

em que k_p é o ganho proporcional, k_d é o ganho derivativo, c é o comprimento do veículo, $d_{(i,i-1)}$ é interdistância entre os veículos adjacentes descrita na seção 2.3.3, th é a constante de tempo de headway também descrita na seção 2.3.3, $k_p(r_{i-1} - r_i - c - th * v_i - d_{(i,i-1)})$ é a componente da força de controle relativa ao erro de distância e $k_d(v_{i-1} - v_i - th * a_i)$ é a componente da força de controle relativa ao erro de velocidade (LESCH et al., 2022).

Os estudos na literatura sobre controle de *platoon* enfatizam apenas comportamentos dinâmicos longitudinais, e poucos estudos discutem o controle longitudinal e lateral integrado.

2.3.3 Geometria de Formação

A FG, também conhecido como política de espaçamento, define a distância desejada entre veículos adjacentes em um *platoon*. O objetivo do controle longitudinal de um *platoon* é garantir que todos os membros do *platoon* trafegue com velocidade constante, mantendo o espaçamento (e erro de espaçamento) entre veículos definida pelas políticas de espaçamento. A política de espaçamento específica a distância desejada entre veículos. Há três políticas predominantes de FG estudadas na literatura: a política de distância constante (*Constant Distance*, CD), a política de intervalo de tempo constante (*Constant Time Headway*, CTH) e a política de distância não linear (*Non-Linear Distance*, NLD) (ORKI; AROGETI, 2019; FANOODI; YAZDIZADEH, 2020).

Em uma política de CD, os veículos mantêm uma distância constante desejada entre dois veículos consecutivos, independentemente da variação da velocidade do veículo. A implementação de uma política de CD tem o potencial de aumentar a capacidade de veículos nas rodovias

devido às pequenas interdistâncias entre os veículos. Em contrapartida, devido às pequenas interdistâncias entre os veículos, em cenários em que há falhas na comunicação, esta política de espaçamento tende a ser uma das mais perigosas, pois os veículos trafegam sem a informação das distâncias para os outros veículos na rodovia (RAZZAGHPOUR et al., 2022).

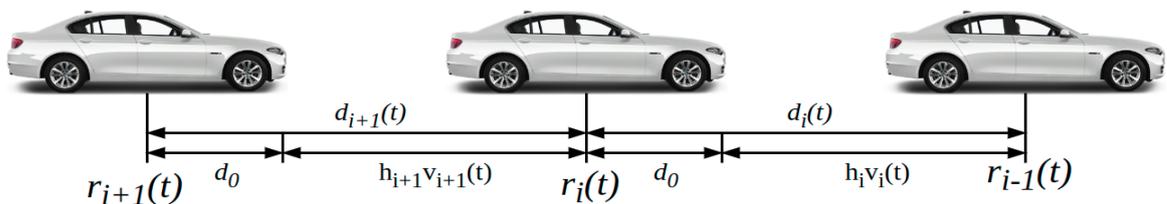
Para a política de CD,

$$d_{(i,i-1)} = d_0, i \in \mathbb{N} \quad (2.4)$$

em que $d_{(0)}$ é um número positivo constante e $d_{(i,i-1)}$ é a interdistância entre os veículos adjacentes i e $i - 1$.

Uma política CTH determina que o espaçamento desejado entre veículos seja proporcional à velocidade do veículo predecessor. Quanto maior a velocidade em que os veículos trafegam a rodovia, maior o distanciamento entre os mesmos, como visto na Figura 7. A política CTH baseia-se nas informações de aceleração e velocidade do veículo predecessor e do líder. Desta forma, o espaçamento entre os veículos em um *platoon* não é constante. Em cenários de mudança de velocidade, quando o *platoon* está acelerando ou desacelerando, os espaçamentos entre os pares de veículos de um *platoon* não é constante (FANOODI; YAZDIZADEH, 2020; SHEN et al., 2022).

Figura 7 – Configuração do sistema de *platoon* de veículos com base na política de CTH



Fonte: O Autor (2022)

Para a política CTH,

$$d_{(i,i-1)} = th * v_i + d_0, i \in \mathbb{N} \quad (2.5)$$

em que th é o intervalo de tempo, v_i é a velocidade do veículo i e $d_{(i, i-1)}$ é o intervalo entre distância entre veículos adjacentes i e $i - 1$. De acordo com RAZZAGHPOUR et al. (2022), atrasos ou perda de pacotes da comunicação sem fio interferem na capacidade da política CTH em manter o espaçamento desejado, o que pode introduzir incertezas nos sistemas e afetar significativamente o desempenho do controle. Entretanto, ZHAO; CAI; CHENG (2021) afirmam que a política de CTH, quando comparada com a política de CD, melhora a escalabilidade e estabilidade do *platoon* de veículos com diferentes topologias de fluxo de informações.

A política de NLD é utilizada quando uma função de velocidade não linear é necessária para descrever o espaçamento entre os veículos. Por exemplo, esta política é utilizada se veículos pesados, como ônibus e caminhões, estiverem dirigindo em terrenos montanhosos ou quando a comunicação não for confiável e causar perda de pacotes nos *platoons*. A política NLD pode potencialmente melhorar a estabilidade e a capacidade do fluxo de tráfego em comparação com as políticas CD e CTH devido à sua capacidade de superar não linearidades naturais do tráfego rodoviário (ORKI; AROGETI, 2019).

Para a política NLD,

$$d_{(i,i-1)} = g(v_i), i \in \mathbb{N} \quad (2.6)$$

em que $g(v_i)$ é uma função não linear da velocidade e $d_{(i,i-1)}$ é a interdistância desejada entre os veículos adjacentes i e $i - 1$.

2.3.4 Estabilidade e Robustez

O *platoon* de CAV em uma estrada plana tem um veículo à frente e outros veículos que seguem em movimento, mantendo o espaçamento desejado entre os veículos. Nesta seção, discutimos o desempenho de um *platoon* de CAV.

No controle de *platoon*, existem três métricas de desempenho importantes e comumente discutidas: estabilidade interna, estabilidade de corda e escalabilidade. Em geral, as duas primeiras métricas focam na estabilidade de um *platoon*, enquanto a última foca na capacidade de adesão de mais veículos a um *platoon* (RODONYI, 2018). Além dessas medidas de desempenho, algumas outras métricas, como convergência e estabilidade marginal, também são importantes ao projetar um sistema de *platoon* prático, entretanto, não serão discutidas neste trabalho.

2.3.4.1 Estabilidade Interna

Independentemente da topologia empregada, um *platoon* deve ser capaz de reagir a perturbações externas, em outras palavras, garantir a estabilidade interna do *platoon*. Existem duas abordagens principais: uma estratégia global e uma estratégia local. A primeira estratégia é ver todo o *platoon* como um sistema único organizado e então utilizar um controlador centralizado no qual a IFT desempenha um papel menos crucial, pois a troca de informações

entre os veículos é determinada pelo controlador centralizado. No entanto, uma desvantagem significativa é que a eficiência do controlador centralizado diminui drasticamente à medida que o tamanho do *platoon* aumenta, isso se dá devido a limitação computacional do sistema. Para garantir a estabilidade interna de um *platoon*, o sistema deve ser capaz de realizar um grande número de cálculos por segundo com uma conexão de comunicação confiável (NUNEN et al., 2019).

A segunda estratégia reparte um *platoon* em *subplatoons*, grupos de *platoons* que fazem parte de um *platoon* maior. Consequentemente, esta abordagem diminui a complexidade do problema, pois distribui em diversos controladores as computações necessárias para manter a estabilidade. A grande maioria dos estudos analisados utilizam um *platoon* fragmentado em subsistemas com controle descentralizado (GAO; SHI; CHEN, 2019).

Um *platoon* empregando uma topologia PF unidirecional analisa a estabilidade entre dois veículos sucessivos, uma vez garantida a estabilidade de cada par de veículos dentro de um *platoon*, a estabilidade de todo o sistema é garantido. No entanto, a estratégia de análise local é inadequada para um *platoon* de topologia bidirecional, uma vez que o erro de espaçamento entre um par de veículos se propaga tanto para hierarquias mais altas quanto para hierarquias mais baixas (LI et al., 2019).

2.3.4.2 Estabilidade de corda

A estabilidade de um *platoon* é garantida quando todos os veículos convergem para o espaçamento e a velocidade desejada. Um critério crítico para garantir a estabilidade de um *platoon* é a estabilidade de corda. A estabilidade de corda é um tipo de estabilidade em relação ao comprimento do *platoon*. Um sistema rigorosamente estável responde a perturbações externas sem amplificá-las. As perturbações não devem ser amplificadas quando passadas de um veículo a frente do *platoon* para outro (ORKI; AROGETI, 2019).

Existem muitas estratégias para melhorar a estabilidade de corda (RODONYI, 2018):

- Aumentar a constante de tempo na política de espaçamento CTH;
- Relaxar a rigidez da FG;
- Utilizar controladores não idênticos para veículos diferentes;
- Utilizar IFT mais complexas para estender o fluxo de informações.

No entanto, há um *trade-off* entre estabilidade e capacidade rodoviária. Por exemplo, atrasos na comunicação podem comprometer a estabilidade interna e externa de um *platoon*. Por isso, aumentar a constante de tempo da política de CTH é o método mais simples de garantir a estabilidade. No entanto, o aumento *headway*, também significa um aumento no espaçamento entre os veículos em *platoon* e por consequência uma diminuição no número de veículos na rodovia (ABOLFAZLI; BESSELINK; CHARALAMBOUS, 2022).

2.3.4.3 Escalabilidade

Em geral, a escalabilidade do *platooning* é a capacidade de adicionar mais veículos ao *platoon*, sem perder a estabilidade de corda. As ações realizadas pelo líder são percebidas apenas pelos veículos mais próximos por meio da propagação de informações ou por envio de mensagens diretas (GAO; SHI; CHEN, 2019).

Portanto, com o aumento do tamanho do *platoon*, o atraso de informação na parte de trás do *platoon* é amplificado, degradando a estabilidade e limitando a escalabilidade (ZHENG et al., 2016). YADLAPALLI; DARBHA; RAJAGOPAL (2006) destacaram que um veículo deve se comunicar com um número maior possível de veículos para que os erros de espaçamento no *platoon* sejam minimizados. De acordo com LI et al. (2018), a escalabilidade do *platoon* é mais do que apenas a capacidade de conectar mais veículos de *platoon*, tem a ver também com a estabilidade do *platoon*. A troca de informações e a estratégia de controle afetam diretamente a escalabilidade do *platooning*. O alcance da comunicação efetiva do veículo líder com qualquer membro do *platoon* é limitado (300m utilizando os protocolos de comunicação inter-veicular como IEEE 802.11p ou C-V2X) e depende significativamente da potência de transmissão do sinal e da confiabilidade da comunicação (LENARSKA; WESOLOWSKI; SYBIS, 2020).

A LPF, por exemplo, está sujeita a problemas de escalabilidade porque todos os membros do *platoon* precisam receber informações do líder (ZHENG et al., 2016). Uma maneira de melhorar a escalabilidade é dividir o *platoon* em *sub platoons*, com cada *subplatoon* com seu líder. Assim, a informação não necessita chegar ao último veículo do *platoon*, mas ao líder do último *platoon*. GAO; SHI; CHEN (2019) propuseram uma estratégia de controle longitudinal de *platooning* baseada no método de granulação de inteligência artificial para melhorar a escalabilidade dos *platoons*.

2.4 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Esta seção introduz o ambiente de simulação com uma breve descrição dos simuladores de rede, de tráfego escolhidos para os experimentos.

2.4.1 OMNeT++

OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed in C++*) (NARDINI et al., 2020) é um simulador *open-source* modular de eventos discretos, escrito em linguagem de programação orientada a objetos, capaz de simular uma rede inter-veicular. OMNeT++ é baseado no conceito de módulos, permitindo a criação de diferentes protocolos, modelos, ou topologia de rede. O principal objetivo da OMNeT++ é facilitar o desenvolvimento de simuladores de rede. Devido a sua estrutura modular (Figura 8), os módulos se comunicam trocando mensagens que podem ser personalizadas para conter quaisquer dados arbitrários que o programador ache relevante, além do *timestamp*¹ específico. Um módulo simples, portas e parâmetros, pode ser agrupado em módulos compostos e serve como base para a construção de simulações complexas. Neste simulador, cada simulação é uma instância de um tipo de módulo composto e pode ser executado através da linha de comando ou com uma *Interface Gráfica Interativa* (*Graphical User Interface*, GUI), o que facilita a execução de simulações complexas (RANGO; RAIMONDO; AMENDOLA, 2019).

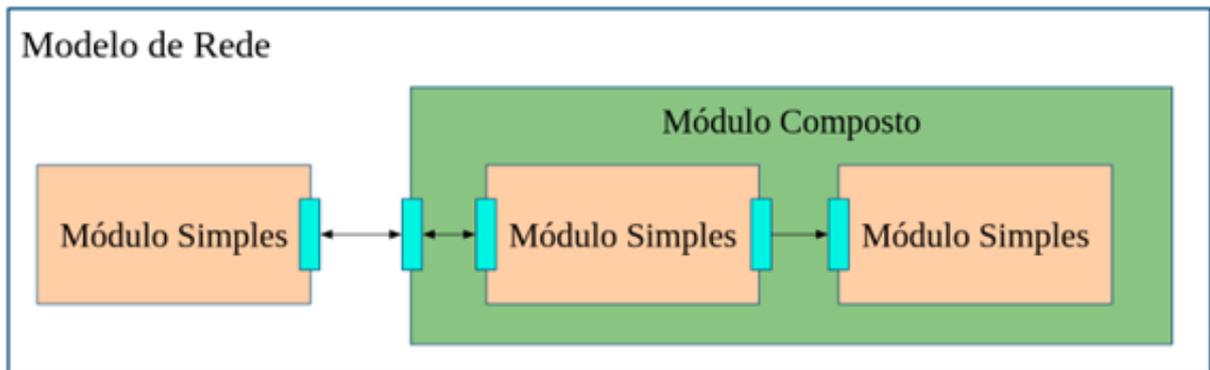
Os *gates* são as interfaces entre a entrada e a saída de um módulo. Por exemplo, ao enviar uma mensagem, o módulo de destino a receberá através de seu *gate* de entrada, enquanto o nó de envio a enviará através de seu *gate* de saída. A ligação entre os *gates* de entrada e saída é conhecida como conexão e só pode ser definida com um nível hierárquico. Por fim, os módulos podem conter parâmetros. Estes são usados para passar dados para os módulos simples. Estes parâmetros podem receber valores numéricos, *booleanos* ou *strings*. Como os parâmetros são representados como objetos no OMNeT++, eles podem conter não apenas valores constantes, mas também gerar valores aleatórios.

O usuário define os módulos e suas conexões, a estrutura do modelo, utilizando a linguagem de descrição de rede (*NEtwork Description*, NED). Quando um determinado módulo composto

¹ Um *timestamp*, marca temporal, é uma cadeia de caracteres denotando a hora ou data que certo evento ocorreu. É geralmente apresentada em um formato consistente, permitindo fácil comparação entre duas marcas temporais distintas. Elas são padronizadas pela Organização Internacional para Padronização (ISO) por meio da ISO 8601.

ou uma rede está sendo projetada, o arquivo NED pode ser escrito como a integração de uma ampla gama de arquivos NED ou de apenas alguns submódulos. Um exemplo de modelo de rede é visto na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura modular do OMNeT++



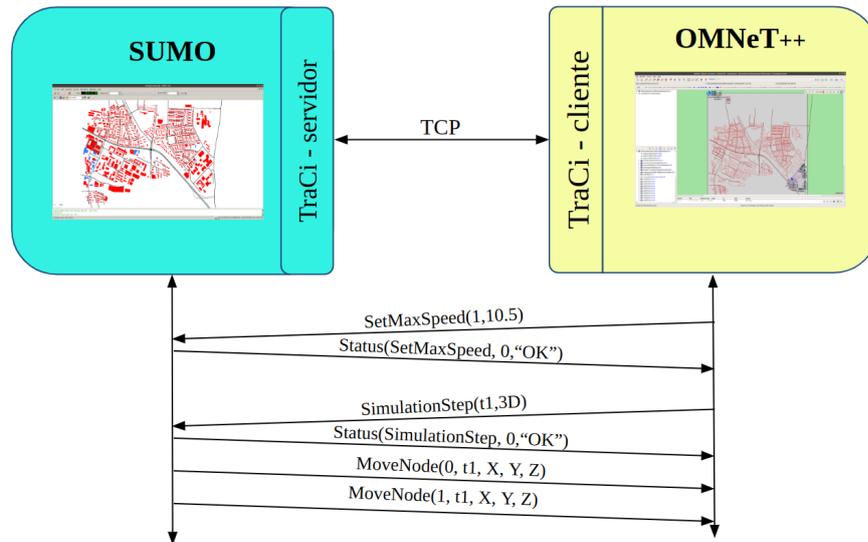
Fonte: O Autor (2022)

O *framework* INET, uma das principais bibliotecas do OMNeT++, pode ser visto como um módulo composto ou um submódulo adicional em uma simulação maior. Além disso, a escolha do simulador OMNeT++/INET se deve ao fato de que o INET possui extensa documentação, na qual existem vários protocolos e padrões para redes com fio, redes sem fio, MANET (*Mobile Ad Hoc Network*), VANET (*Veicular Ad Hoc Networks*), e redes *Bluetooth*, entre outros, que facilitam o desenvolvimento de aplicações e são amplamente utilizados no ambiente acadêmico.

2.4.2 SUMO

Simulador de Mobilidade Urbana (*Simulation of Urban MObility*, SUMO) (LOPEZ et al., 2018) é um simulador de tráfego microscópico contínuo (em que cada veículo é considerado um indivíduo e tem propriedades como a posição e a velocidade) utilizado para emular o fluxo de tráfego para um grande número de nós de uma VANET. Uma simulação VANET requer modelos precisos de comunicação entre nós (por exemplo, carros, trens, RSU) e sua posição exata. Infelizmente, o SUMO é um gerador de tráfego puro, o que significa que o simulador não foi desenvolvido para ser acoplado diretamente com simuladores de rede. A *Interface de Controle de Tráfego* (*Traffic Control Interface*, TraCi) (WEGENER et al., 2008) permite a integração em tempo real com o simulador de rede OMNeT++ para tornar as simulações mais realistas, Figura 9.

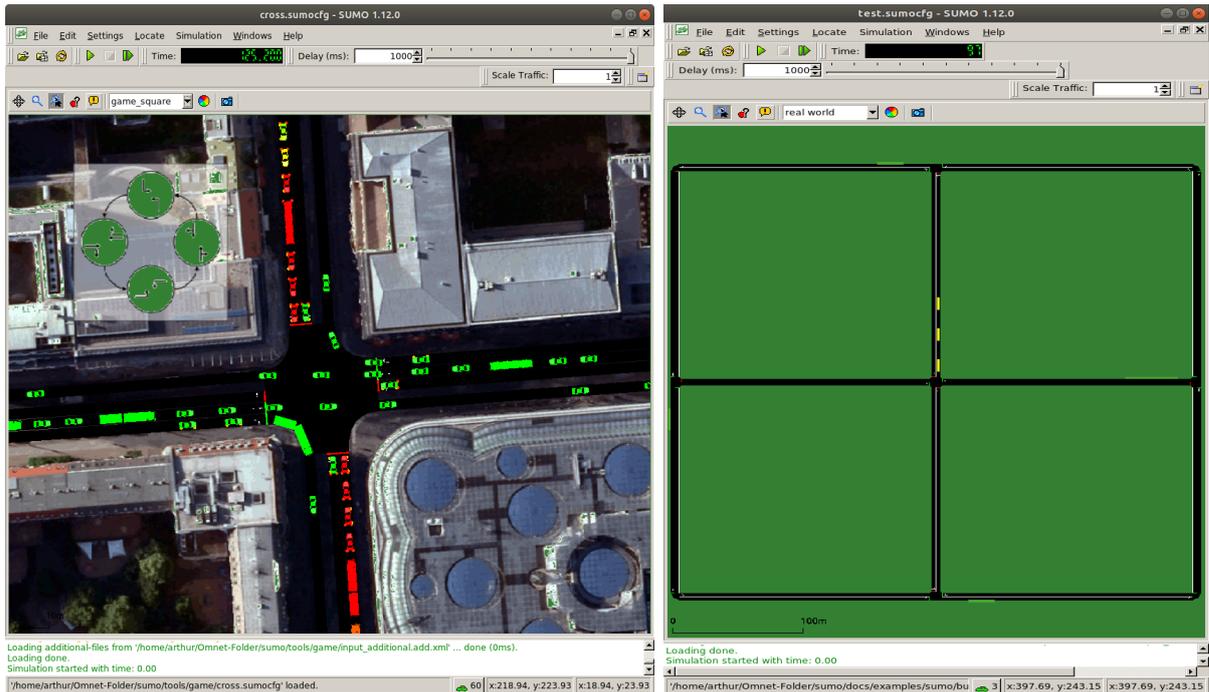
Figura 9 – Visão geral da estrutura de simulação com acoplamento cliente-servidor



Fonte: O Autor (2022)

O SUMO permite simular e avaliar um grande conjunto de tópicos relacionados ao gerenciamento de tráfego. Ele permite ao usuário criar mapas, classes de veículos (ônibus, carros e motocicletas), ou quaisquer propriedades físicas do cenário de simulação. Cada tipo de veículo tem suas propriedades físicas e o modelo da dinâmica veicular. Cada veículo no SUMO por sua vez, tem um identificador (ID), o horário de partida e chegada, a rota do veículo através da rede, a pista a ser usada, a velocidade e a posição de partida. Também é possível atribuir ao veículo classes de emissão de poluentes ou ruídos. Variáveis adicionais permitem também que o usuário defina a aparência da simulação dentro da GUI, Figura 10.

Figura 10 – Interface gráfica do SUMO durante uma simulação



Fonte: O Autor (2022)

2.4.3 VEINS

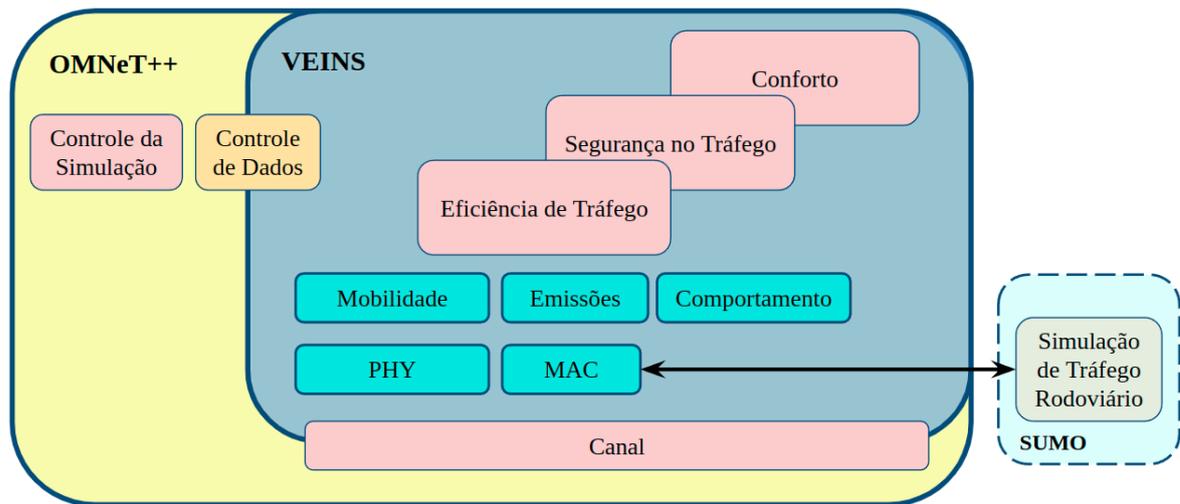
O *framework* VEINS (VEHicles In Network Simulation) (SOMMER et al., 2019) é um submódulo de comunicação inter-veicular *open source* do OMNeT++. O VEINS permite a interação dinâmica entre dois simuladores, o OMNeT++ (simulador de rede) e o SUMO (simulador de mobilidade ou tráfego).

Em uma rede veicular, os nós se movem e trocam mensagens com muita frequência. Portanto, uma análise mais realista requer um acoplamento bidirecional de ambos os simuladores. Os simuladores de rede e de mobilidade funcionam independentemente um do outro. Entretanto, o VEINS permite um acoplamento bidirecional através de um soquete confiável (*Transmission Control Protocol, TCP*), de modo que uma simulação ocorra em paralelo nos dois simuladores (MENA-OREJA; GOZALVEZ, 2018).

Desta forma, o uso do simulador VEINS pode analisar a influência das redes veiculares no tráfego rodoviário antes de ser implementada no mundo real. Isto é possível devido a um acoplamento bidirecional feito através da TraCi no OMNeT++. Este acoplamento permite ao simulador de rede controlar diretamente o tráfego rodoviário e simular a influência dos protocolos de comunicação inter-veicular no tráfego urbano. O VEINS utiliza de uma arquitetura

do tipo cliente-servidor para promover o acoplamento bidirecional entre os dois simuladores, em que o cliente é OMNeT++ e o servidor é SUMO, respectivamente. A Figura 11 apresenta uma visão geral da estrutura de simulação acoplada do VEINS (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011).

Figura 11 – Visão geral da estrutura de simulação acoplada do VEINS



Fonte: (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011)

O SUMO, assim como a OMNeT++, avança o tempo de simulação em intervalos discretos. No início de uma simulação acoplada, o SUMO envia a posição inicial de todos os veículos para o OMNeT++. OMNeT++ controla a mobilidade dos veículos em sua simulação através de um agendamento dos movimentos dos nós em intervalos regulares de tempo. Durante a execução da simulação, os módulos de comunicação trocam comandos através da conexão TCP (*Transmission Control Protocol*). O SUMO, assim como a OMNeT++, avança o tempo de simulação em intervalos discretos. A cada passo, o OMNeT++ envia as ações tomadas pelos veículos para o SUMO (por exemplo, ordens de mudança de velocidade ou de pista) e acionando a próxima etapa correspondente da simulação do tráfego rodoviário. Ao completar esta etapa de simulação de tráfego rodoviário, o SUMO envia a posição de todos os veículos instanciados de volta para o OMNeT++. Isto permite ao OMNeT++ adicionar novos nós as posições recebidas do SUMO e eliminar nós anteriores, pois estes nós chegaram a seu destino. Avançando, assim, os nós de acordo com a simulação de tráfego rodoviário e garantindo a execução síncrona dos comandos (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011).

O *framework* implementa o protocolo IEEE 802.11p e os modelos de camada superior da pilha do IEEE 1609.4 DSRC/WAVE para trocar informações entre veículos através de

Mensagens de Conscientização Cooperativa (Cooperative Awareness Messages, CAM) (WAVE, 2010; SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011).

O VEINS oferece uma ampla gama de métricas de avaliação para rede veicular, como *QoS*, *SNR*, número de pacotes enviados e número de pacotes perdidos. Além disso, é possível importar projetos de mapeamento colaborativos do *OpenStreetMap*² para criar um mapa livre e editável do mundo, incluindo edifícios, faixa de pedestres, paradas de ônibus e semáforos (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011).

2.4.4 Plexe

O *framework* Plexe (*Platooning Extension for VEINS*) (SEGATA et al., 2014) é um submódulo *open source* do OMNeT++ utilizado para simular ambientes de *platooning*. O modelo de *platoon* implementado pelo Plexe permite que os veículos acelerem e desacelerem, mudem de faixa e realizem manobras de entrada e saída de um *platoon*. Atualmente, o *framework* Plexe é o ambiente de simulação mais utilizado para *platoon*, pois os módulos do Plexe formam a ponte que permite a troca de dados entre o simulador de comunicação sem fio VEINS e o simulador de tráfego SUMO. Em SEGATA et al. (2014) foram feitas alterações no código fonte do SUMO para que a formação de *platoon* pudesse acontecer. Estas alterações foram incorporadas nas versões mais novas do SUMO permitindo que outros *frameworks* também possam simular ambientes de *platooning* em outros simuladores de rede (SEGATA et al., SEGATA et al.; MENA-OREJA; GOZALVEZ, MENA-OREJA; GOZALVEZ).

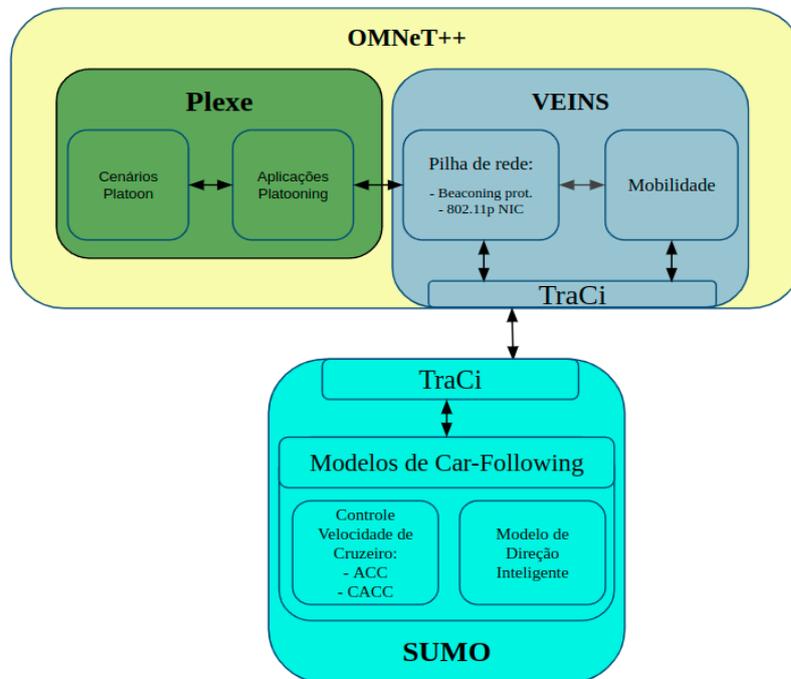
O SUMO utiliza modelos complexos de controladores longitudinais de malha aberta e fechada, além de um técnica simples de controle lateral utilizada em manobras de mudança de faixa. Entretanto, esses modelos não podem ser modificados. O Plexe permite a implementação dos modelos de dinâmica longitudinal do SUMO com a utilização da troca de informações do protocolo de comunicação IEEE 802.11p. O servidor TraCi TCP sempre escuta a conexão entre os simuladores para receber e enviar mensagens, conforme Figura 12.

A *interface* do Plexe permite que os dados obtidos dos modelos de controle dos veículos do SUMO sejam acessados e repassados, através dos protocolos de *platoon*, para outros veículos na simulação. Utilizando o acoplamento bidirecional do TraCi, é possível alternar entre controladores durante a execução de uma simulação. Também é possível configurar cenários de rodovias para análise de métricas da rede de comunicação, como colisões, taxa de

² Disponível em: <https://www.openstreetmap.org>. Acessado em: agosto de 2022.

entrega de pacotes, ou de desempenho do *platoon*, como políticas de espaçamento, distância de segurança e velocidade desejada.

Figura 12 – Comunicação entre OMNeT++ e SUMO através da interface TraCi



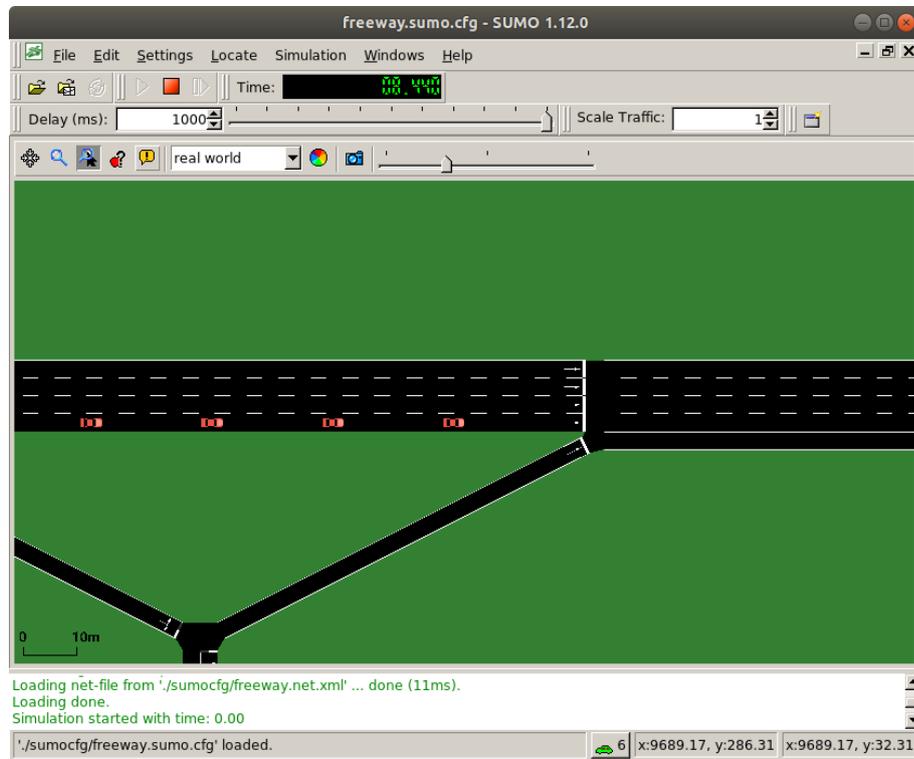
Fonte: (RANGO; RAIMONDO; AMENDOLA, 2019)

Além do cenário tradicional de análise de rodovias, também é possível simular o tráfego misto em que veículos com motoristas humanos coexistem com veículos autônomos com diferentes modelos de controle. Neste cenário, as informações de qualquer veículo do *platoon*, autônomos ou não, são utilizadas pelo controlador, criando ou mudando topologias de *platoon*. Este tipo de simulação é muito útil para analisar os efeitos condução de um ser humano em cenários de trânsito automatizado (SEGATA et al., SEGATA et al.; MENA-OREJA; GOZALVEZ, MENA-OREJA; GOZALVEZ; RANGO; RAIMONDO; AMENDOLA, 2019).

O Plexe permite que o usuário escolha e adapte o modelo de dinâmica longitudinal dos veículos com base em dos quatros modelos de velocidade de cruzeiro (*Cruise Control*, CC) já implementados no simulador SUMO: ACC, CACC-PATH, CACC-Ploeg e Consensus. O *framework* Plexe fornece também uma classe de motor veicular genérica, que pode ser modificada para implementar modelos que reproduzam a dinâmica de um motor real de forma mais fidedigna, a fim de fornecer cenários mais realistas para a simulação de *platooning*. Por exemplo, a Plexe utiliza, por padrão, o modelo PATH CACC da Califórnia para o controle longitudinal de veículos em um *platoon*. Entretanto, os usuários podem alterar o modelo CACC ao criar

um novo cenário, Figura 13.

Figura 13 – Simulação de *platoon* no *framework* Plexe



Fonte: O Autor (2022)

3 TRABALHOS RELACIONADOS

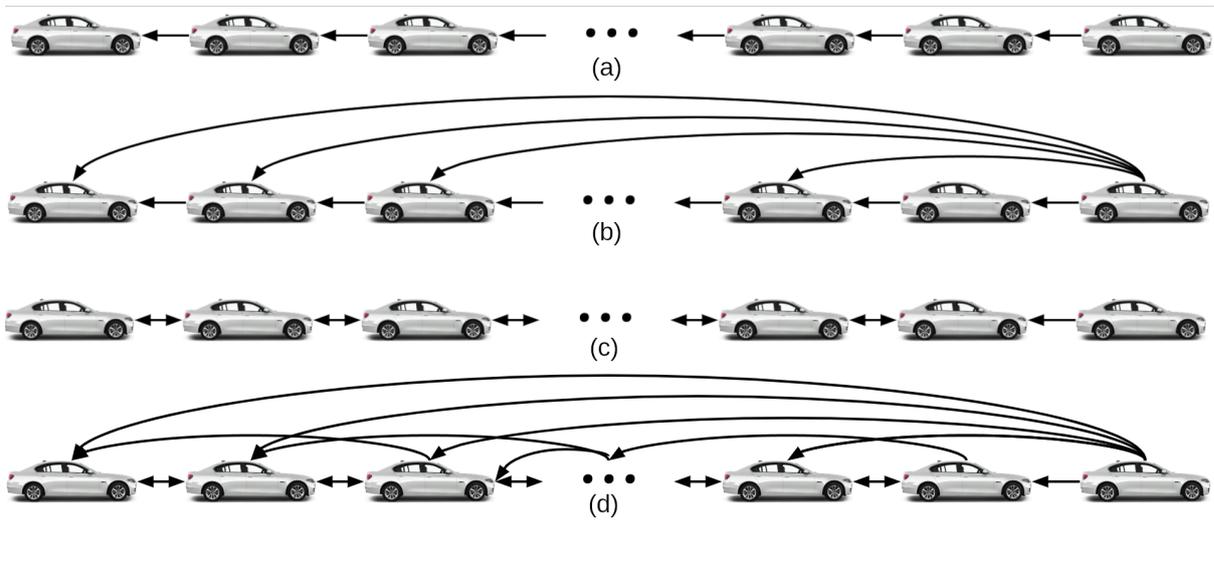
A colaboração entre IFT de controle e IFT de comunicação em um *platoon* é uma área que vem sendo amplamente explorada pela academia e pela indústria (OLIVEIRA, 2020). As soluções resultantes desta colaboração são capazes de aumentar a densidade de tráfego e, ao mesmo tempo, atendendo aos rígidos padrões de segurança. Pois a própria IFT orienta o comportamento do controlador e também determina os requisitos da rede.

Nesta seção, serão analisadas as publicações que se relacionam à esta pesquisa (OLIVEIRA, 2020; GONZALEZ, 2020; ZHU; ZHAO; ZHONG, 2019).

3.1 CONTROLE DISTRIBUÍDO DE MODO DESLIZANTE

WU et al. (2020) e YAN et al. (2022) propuseram estratégias de controle baseada no método de Controle Distribuído de Modo Deslizante (*Distributed Sliding Mode Control, DSMC*) para avaliar o desempenho do *platoon* sob diferentes IFT. Ambos artigos são apresentados e discutidos a seguir.

Figura 14 – IFT analisadas por WU et al. (2020) (a) PF; (b) LPF; (c) BD; (d) LTBD



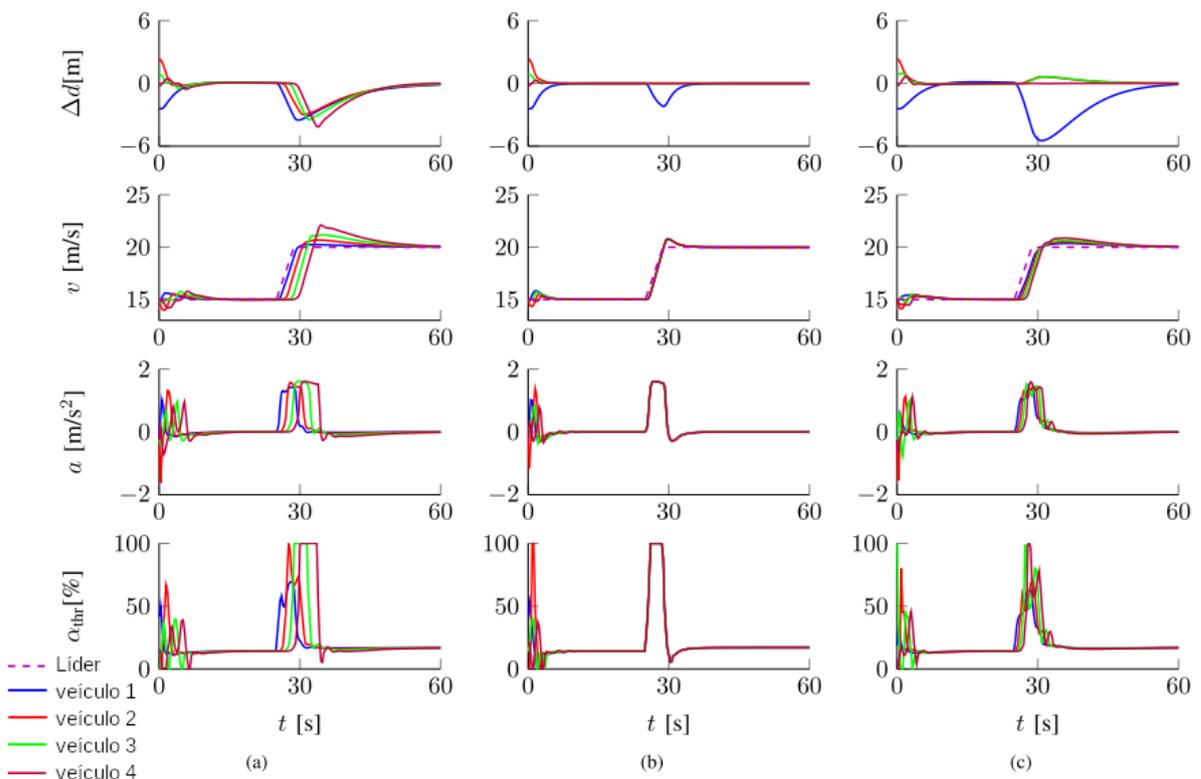
Fonte: (WU et al., 2020)

WU et al. (2020) propuseram um *framework* para análise de aplicações *platoon* heterogêneos com dinâmicas longitudinais não lineares que suporta uma variedade de topologias de fluxo de informações. O método de controle DSMC é utilizado para resolver o problema da formação

de um *platoon* de múltiplos veículos em múltiplas faixas. O projeto se baseia no pressuposto de que a topologia do fluxo de informação entre os seguidores é bidirecional e que o líder está conectado a pelo menos um seguidor, como representado na Figura 14.

A simulação numérica foi executada sob quatro tipos diferentes de IFT para verificar a eficácia do método controle em relação as métricas de índice de rastreamento do veículo predecessor, desvio padrão de aceleração e economia de combustível. Além disso, a estabilidade do sistema em malha fechada descontínua foi verificada através da simulação utilizando a técnica Lyapunov. Os resultados, apresentados na Figura 15, indicaram que um *platoon* de múltiplas faixas poderia ser formado se utilizada uma topologia fixa de fluxo de informações. Além disso, WU et al. (2020) aplicaram o filtro Kalman para lidar com atrasos de comunicação e projetaram um modelo de aceleração adaptativa para o *platoon* de veículos. Entretanto, pequenas flutuações em torno das velocidades desejadas continuaram a ocorrer.

Figura 15 – Resultados comparativo das IFT analisadas por WU et al. (2020): (a) BD; (b) LBD; (c) LTDB



Fonte: (WU et al., 2020)

Apesar de avaliar o desempenho do *platoon* sob quatro diferentes topologias de fluxo de informações, o método proposto por WU et al. (2020) só é viável para IFT bidirecionais, eliminando assim todas as variações unidirecionais das IFT e restringindo o uso do *framework*.

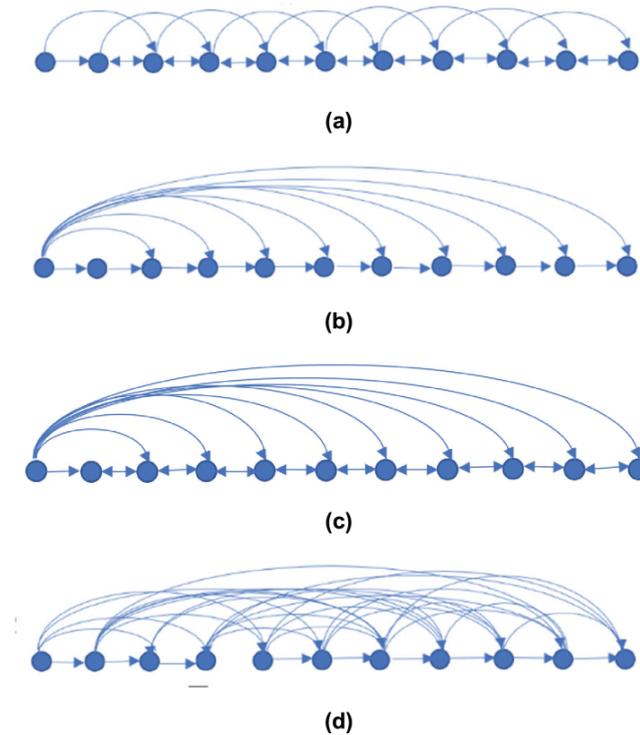
Outra limitação do *framework* é não suportar comunicações não-ideais (com falhas). Por estas razões, a estrutura de teste é ineficaz para avaliar aplicações *platoon* no mundo real.

YAN et al. (2022) propuseram uma estratégia de controle DSMC assimétrico para CAV heterogêneos com modelos de dinâmica longitudinal não lineares de terceira ordem. Cada veículo do *platoon* tem um grau assimétrico diferente, sendo usado para caracterizar a intensidade da conectividade entre veículos. Este parâmetro é incorporado ao modelo proposto através de modificações na matriz topológica da IFT. Em seguida, os autores utilizam a desigualdade Riccati e a análise Lyapunov para encontrar os ganhos do controlador. Um Algoritmo Genético de Classificação por Não Dominância II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*, NSGA-II) é proposto para encontrar os graus assimétricos ideais de Pareto em relação ao desempenho geral do *platoon*, analisando a capacidade de rastreamento, consumo de combustível e desvio padrão de aceleração.

Devido aos bloqueios no caminho da comunicação causados pelas diferentes dimensões físicas dos veículos, os *platoons* com veículos heterogêneos são especialmente suscetíveis aos efeitos adversos da comunicação sem fio (ZAKERIMANESH; QIU; TAVAKOLI, 2021). Por este motivo, as simulações e análises são realizadas para validar o método de controle proposto tanto em cenários de estradas urbanas quanto em rodovias. Quatro topologias foram testadas, três IFT tradicionais (TPF, LPF e BDL) e uma IFT aleatória construída com base na taxa de perda de pacotes, ilustradas na Figura 16. O *platoon* é modelado usando *Simulink*, e a simulação é realizada utilizando o MATLAB.

Um dos pontos positivos do trabalho de YAN et al. (2022) é considerar um cenário urbano, além do cenário tradicional de rodovias. A principal diferença entre ambos os cenários está na distância segura desejada entre dois veículos consecutivos. Em um cenário urbano, a velocidade média entre os veículos é consideravelmente inferior às velocidades encontradas nas rodovias. Consequentemente, a distância segura desejada entre veículos em um cenário urbano também é inferior a distância em um cenário de rodovias. Outra diferença entre os cenários é a dinâmica de aceleração longitudinal do veículo líder, a equação utilizada para a aceleração foi modelada a partir de uma equação de velocidade sinusoidal com diferentes parâmetros de amplitude para cada cenário analisado. Entretanto, um ponto a ser ressaltado é que o algoritmo não considera o *tradeoff* entre o poder computacional necessário e o tempo mínimo para a otimização dos parâmetros em tempo real.

Figura 16 – Representação das IFT testadas: (a) TPF, (b) LPF, (c) BDL e (d) IFT aleatória



Fonte: (YAN et al., 2022)

3.2 COMUNICAÇÃO NÃO IDEAL

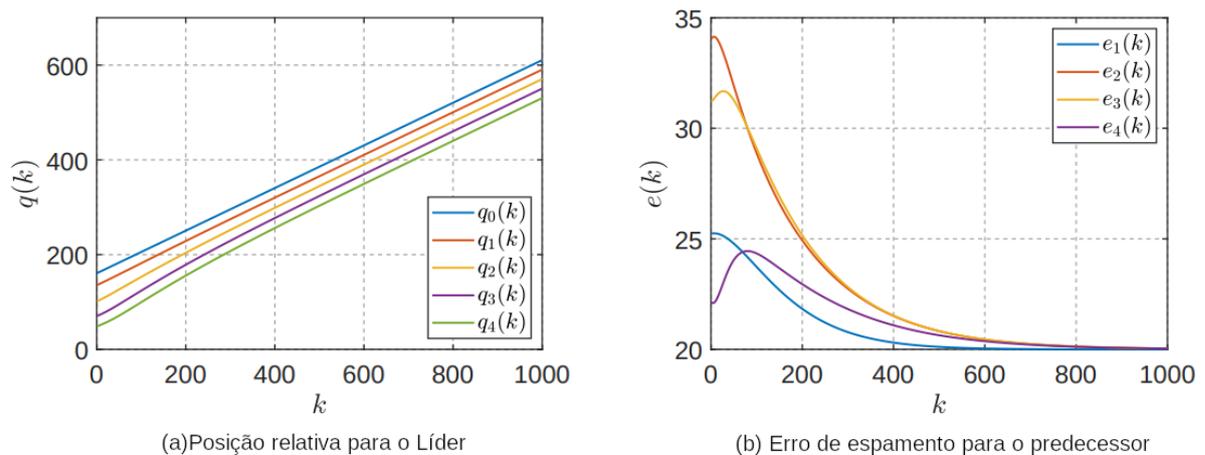
Um grande desafio com relação a um *platoon* é como superar obstáculos da rede sem fio móvel. Falhas de comunicação podem gerar situações onde informações não cheguem a tempo ao destinatário. ZHAO; CAI; CHENG (2021), ZHAO et al. (2021), GE et al. (2022) e SHEN et al. (2022) analisaram o desempenho de *platoons* lidando com falhas na comunicação, como alcance limitado da comunicação entre os veículos, perdas aleatórias de pacotes, atrasos na comunicação e recursos finitos disponíveis para comunicação.

ZHAO; CAI; CHENG (2021) analisaram o desempenho de um *platoon* cooperativo em um cenário de política de espaçamento de intervalo de tempo constante (CTH) com falhas na comunicação. Os autores consideram cenários em que o alcance da comunicação V2V é limitado. As informações, provenientes do veículo líder ou predecessores, utilizadas pelo controlador local do veículo, tais como velocidade, aceleração e posição, podem não chegar ao veículo requerente da informação.

ZHAO; CAI; CHENG (2021) também investigaram como as perdas aleatórias independentes do tempo de pacotes afetam o desempenho do controle do *platoon* com uma IFT de múltiplos PF. Para garantir a estabilidade do *platoon*, os autores determinam o limite superior para o

atraso de comunicação e a taxa de perda de pacotes para manter a convergência do controle longitudinal. Os autores utilizaram o método da matriz de perturbação para obter o limite superior da taxa de perda de pacotes para garantir que todos os veículos do *platoon* possam manter uma distância segura inter-veicular baseada na velocidade do veículo. Os resultados da análise de ZHAO; CAI; CHENG (2021) são encontrados na Figura 17.

Figura 17 – Resultados política de espaçamento de intervalo de tempo constante apresentada por ZHAO; CAI; CHENG (2021)



Fonte: (ZHAO; CAI; CHENG, 2021)

Embora os autores analisem os efeitos das imperfeições na comunicação V2V na estabilidade do *platoon* em mais de um cenário, apenas uma topologia de fluxo de informação é utilizada em todos os cenários, limitando a análise do autores. Além disso, a dinâmica longitudinal de todos os membros do *platoon* é descrita pela mesma equação, em que o líder conduz com velocidade constante e a única perturbação acrescentada ao sistema é o arrasto aerodinâmico. A descrição de uma dinâmica longitudinal veicular para *platoon* em um mundo real necessita considerar perturbação introduzida pelo movimento de outros veículos na estrada.

Por esta razão, uma simulação fidedigna de um *platoon* deve levar em consideração outras perturbações, como por exemplo, o comportamento de um motorista humano, em que os veículos aceleram e freiam diversas vezes e a velocidade não é constante. O espaçamento desejado entre veículos deve ser mantido independentemente das condições do tráfego.

ZHAO et al. (2021) analisaram o desempenho de um controle cooperativo longitudinal para *platoon* com uma política de espaçamento de tempo constante para uma IFT de múltiplos PF. O cenário de teste analisado contém falhas na comunicação, como alcance limitado, perdas aleatórias de pacotes e atrasos de comunicação variáveis no tempo. Além disso, os autores

determinam o limite superior para o atraso na comunicação a fim de que o controle longitudinal consiga garantir a estabilidade do *platoon*. Três cenários de controle longitudinal são analisados: Um cenário em que o veículo líder do *platoon* conduz a uma velocidade constante com comunicação ideal; Um cenário de frenagem de *platooning* com diferentes taxas de perda de pacotes, e um cenário de frenagem de *platooning* sob velocidade constante, entretanto, com atrasos de comunicação.

Por fim, os autores concluem que a eficácia do controle depende da frequência de recepção de pacotes ou do atraso até que um novo pacote seja recebido. Portanto, diferentes IFT requerem diferentes taxas de perda de pacotes para garantir a estabilidade do *platoon*. Os autores afirmaram: "O desempenho e a eficácia de um *platoon* dependem da topologia do fluxo de informações e da qualidade das comunicações."

Os autores argumentaram que a estabilidade interna do *platoon* é garantida quando o veículo líder conduz a uma velocidade constante. Entretanto, isto é válido para qualquer cenário em que um CAV se movimenta a uma velocidade constante independentemente da qualidade da comunicação ou qual IFT é utilizado porque, sem uma mensagem para alterar a velocidade, os CAV manterão a mesma velocidade ao longo de todo o percurso. Embora os autores analisem os efeitos de uma comunicação V2V com falhas em mais de um cenário, apenas uma IFT é utilizada em todos os cenários, restringindo a análise do autores. Além disso, a dinâmica longitudinal veicular para *platoon* em um mundo real necessita considerar perturbações ao sistema.

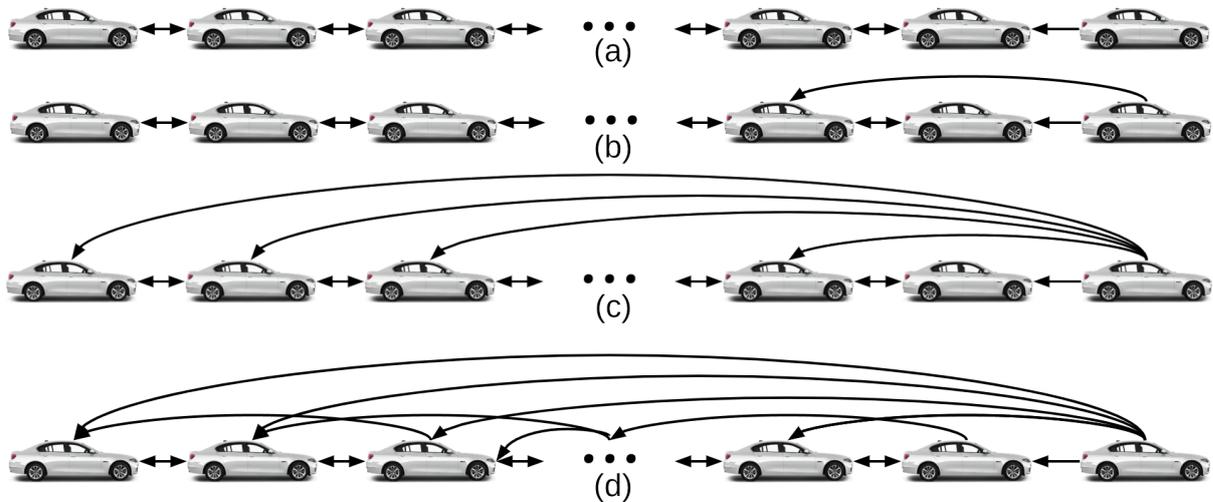
SHEN et al. (2022) investigaram os efeitos da qualidade da comunicação entre veículos e da dinâmica do veículo no desempenho do *platoon*. Primeiro, os autores discutem o cenário em que veículos se comunicam com veículos em sua vizinhança através de um canal de comunicação não-ideal. Em seguida, os autores definem uma IFT não direcionada (UIFT), onde cada um dos veículos seguidores recebem informações diretamente ou indiretamente do veículo líder. A fim de avaliar a resposta do sistema e compará-lo com os resultados da simulação, um protocolo de controle baseado em consenso linear de tempo contínuo é amostrado e transformado em um sistema *platoon* de tempo discreto. Os autores também estabeleceram que cada veículo só pode acessar informações de localização e velocidade de seus vizinhos no momento da amostragem. Portanto, o protocolo de controle de amostras proposto depende não apenas da IFT e do período de amostragem, mas também das qualidades do canal de comunicação entre veículos. Por fim, foram realizadas simulações variando a dinâmica longitudinal dos veículos, o período de amostragem e a qualidade do canal comunicação para poder comparar

o desempenho do *platoon* utilizando controlador com o ganho ótimo e um não otimizado.

O método proposto no artigo pode ser aplicado a uma ampla gama de IFT, especialmente os que incluem informações de radar e outros sensores. Entretanto, a comunicação entre os veículos é limitada, pois os veículos apenas podem comunicar informações com seus vizinhos a cada intervalo de tempo amostrado. Para que este método proposto funcione em um cenário real, o tempo de amostragem periódica necessário é muito baixo, exigindo alto poder computacional em cada veículo para calcular o ganho ótimo antes do próximo intervalo de tempo. Uma possível solução para este problema é aumentar a distância de segurança entre os veículos, entretanto, outros tipos de perturbações seriam acrescentadas ao controlador, como, por exemplo, o arrasto aerodinâmico. Os autores também assumiram um modelo de dinâmica longitudinal muito simples e linear, uma suposição que não é realista e não poderia ser testada em um cenário não simulado.

GE et al. (2022) investigaram os efeitos da comunicação acionada por evento agendados sujeita a recursos finitos no controle de *platoon*. Primeiro, os autores apresentam um modelo de dinâmica longitudinal do veículo que incorpora a presença de uma perturbação externa desconhecida em cada veículo Seguidor e uma entrada desconhecida no controlador do veículo líder para descrever o comportamento coordenado do *platoon* sob uma IFT LF. Um novo mecanismo de agendamento dinâmico de eventos (*Dynamic Event-triggered Scheduling Mechanism*, DESM) foi desenvolvido para aliviar o gasto de recursos de comunicação de forma eficiente. Isto é feito ajustando dinamicamente os parâmetros de limiar nas leis de acionamento desejadas com base em um parâmetro de reconhecimento de largura de banda, de modo que o número de pacotes de dados transmitidos sobre VANET pode ser significativamente reduzido quando a largura de banda está ocupada ou a largura de banda pode ser reduzida quando o sistema está ocioso. Para preservar a estabilidade do controle do *platoon* em malha fechada, uma abordagem de *co-design* de controle é implementada para resolver o problema de controle independentemente dos efeitos de distúrbios externos desconhecidos sobre os veículos seguidores ou mudanças na entrada do controlador do veículo líder. Para verificar o desempenho da técnica proposta, os autores realizaram uma análise comparativa envolvendo quatro IFT, ilustradas na Figura 18, variação no tempo dos distúrbios externos, na aceleração do líder e diferentes mecanismos de agendamento de eventos (*Event-triggered Scheduling Mechanism*, ESM).

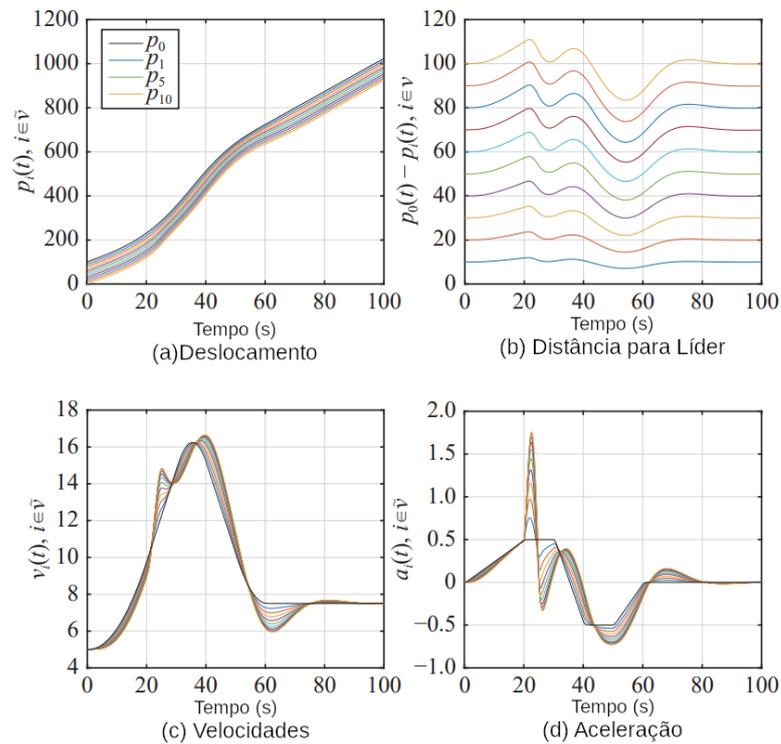
Figura 18 – IFT analisadas por GE et al. (2022): (a) BD; (b) LTBD; (c) LBD; (d) LPBD



Fonte: (GE et al., 2022)

O método proposto por GE et al. (2022) pode ser benéfico para cenários de tráfego pesado e largura de banda ocupada devido ao *trade-off* entre eficiência de comunicação e desempenho do controle de *platoon*. O mecanismo proposto foi testado sob um número limitado de cenários. Por exemplo, os autores apenas testaram o também método proposto em quatro IFT sem explicar a razão por trás desta escolha. Além disso, não é explicado porque apenas um distúrbio externo sinusoidal foi introduzido na equação aceleração da dinâmica longitudinal do líder. A dinâmica longitudinal veicular é inerentemente não-linear, incerta e complexa. Por esta razão, o teste da abordagem, com apenas um espaçamento específico desejado entre veículos mantendo as mesmas velocidades e acelerações, carece os requisitos necessários para aplicações não simuladas. O desempenho do controlador proposto por GE et al. (2022), é visto na Figura 19.

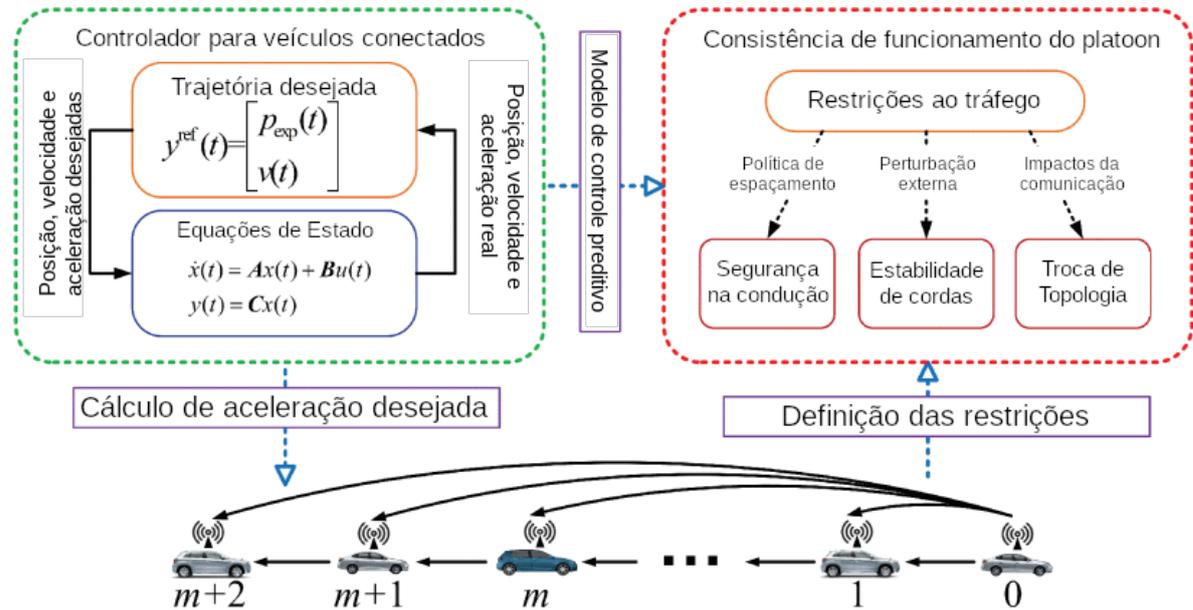
Figura 19 – Desempenho do controlador DESM sob BD



Fonte: (GE et al., 2022)

3.3 PLATAFORMA DE CO-SIMULAÇÃO PARA *PLATOONS*

WANG; LIU (2021) propuseram um algoritmo de Controle Distribuído Preditivo (*Model Predictive Control*, MPC) de segunda ordem para *platoon* de veículos conectados baseado em informações do tráfego rodoviário detectadas por meio de comunicações V2V/V2I, câmeras, radares e radares de ondas milimétricas, vide Figura 20. O controlador proposto por WANG; LIU (2021) oferece um algoritmo para controlar o *platoon* de acordo com a trajetória do veículo líder, analisando a troca de topologias de comunicação e estratégias de controle sob comunicação não ideal. Em seguida, o algoritmo de controle do *platoon* é estabelecido, e um conjunto de restrições é analisado. Como resultado, os autores argumentam que o controlador proposto pode alcançar a estabilidade e velocidade, aceleração e espaçamento entre veículos desejados sob topologias comutantes de comunicação para um líder com estados de variantes.

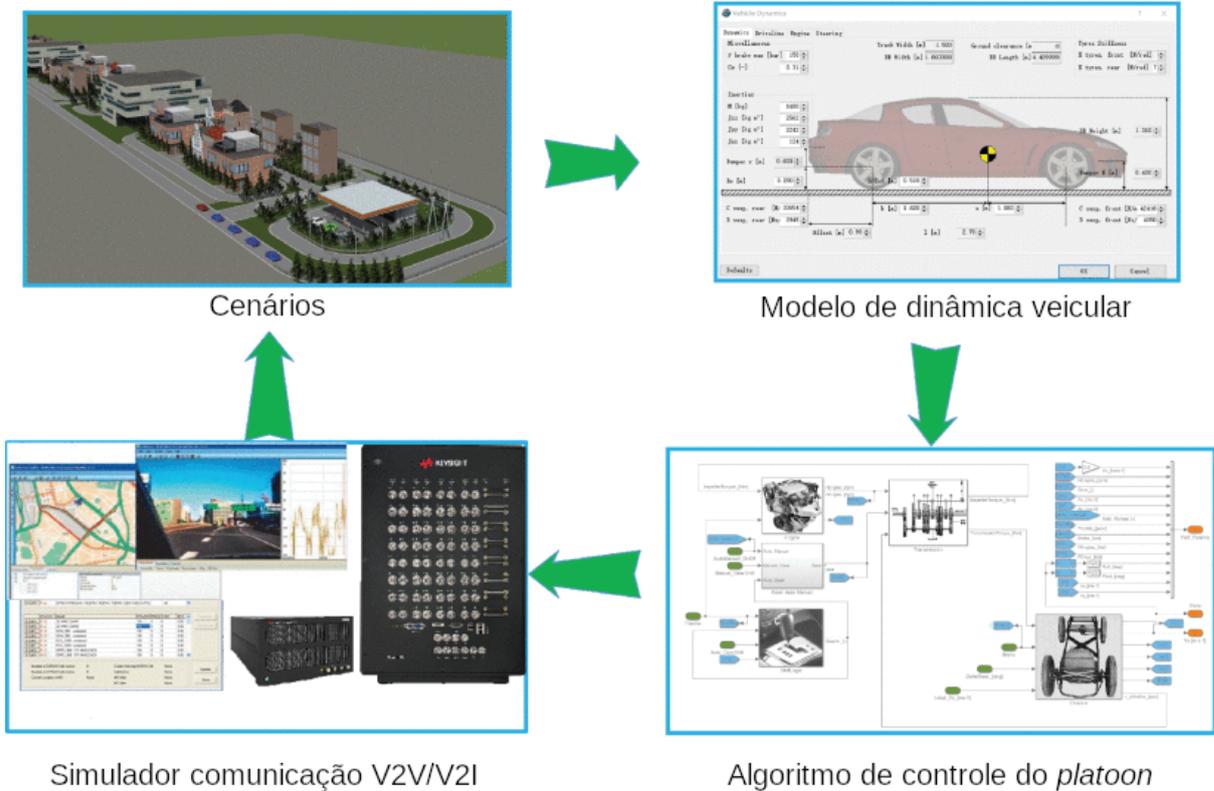
Figura 20 – Sistema de controle de um *platoon*

Fonte:(WANG; LIU, 2021)

Finalmente, uma plataforma de co-simulação para *platoons* de veículos conectados foi desenvolvida com base no simulador de comunicação Prescan/Matlab/V2X, ilustrado na Figura 21. A plataforma é usada para verificar o efeito da topologia de comunicação variável no algoritmo de controle do *platoon*. Três cenários de tráfego são utilizados na plataforma: comunicação normal, veículo líder com comunicação anormal, e o seguinte veículo com comunicação anormal.

O trabalho de WANG; LIU (2021) é um dos primeiros passos para uma aplicação prática de um sistema de *platoon* veicular. Entretanto, há muitos tópicos controversos que não são discutidos. Por exemplo, as restrições de situações práticas devido às limitações de comunicação sem fio que não são discutidas pelos autores. A perda de pacotes é definida pelos autores como um atraso no tempo de chegada dos dados. No entanto, não está claro se o controlador descarta os dados destes pacotes. Os autores também argumentam que o controlador do *platoon* pode ser mudado para diferentes topologias de comunicação para garantir a segurança. Entretanto, não está claro quanto tempo leva para atualizar as funções de todos os veículos do *platoon* e se as funções são automaticamente atualizadas quando o líder sai do *platoon*. Embora o título se refira a troca de topologias de comunicação, apenas uma IFT é utilizada, a LPF, e os autores não afirmam se o algoritmo MPC proposto funcionaria para outras IFT.

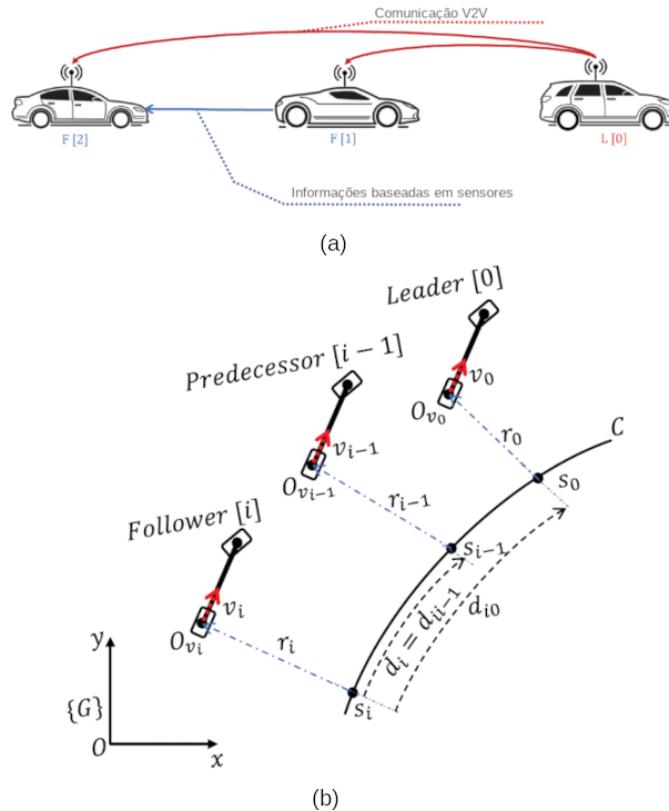
Figura 21 – Plataforma de co-simulação desenvolvida



Fonte: (WANG; LIU, 2021)

3.4 PROTÓTIPO DE *PLATOON* EM AMBIENTE URBANO

KHALIFA et al. (2021) propuseram uma abordagem controle distribuído para controlar o movimento longitudinal de um *platoon* em um ambiente urbano curvilíneo. As informações do movimento lateral do líder são utilizadas para o controle dos veículos que o seguem, em outras palavras, a traseira do veículo predecessor é utilizado como o centro da pista para o controlador do veículo Seguidor nas funções de *Lane-Keeping*. No experimento, apenas o veículo líder é conduzido por um ser humano, os veículos seguidores são CAV, vide Figura 22. O controlador longitudinal distribuído de terceira ordem depende de uma IFT híbrida PLF, onde o líder transmite seu estado para todos os veículos do *platoon*, e cada veículo Seguidor obtém a posição de seu Predecessor através do LiDAR instalado em cada carro. Assim, o observador estima a velocidade do veículo precedente e a leva em consideração seu controlador local.

Figura 22 – Representação de um *platoon* com Hybrid LPF

Fonte: (KHALIFA et al., 2021)

A Figura 23 exibe um protótipo de *platoon* no campus da Escola Central de Nantes (ECN). A pesquisa conduzida pelos autores é altamente relevante, pois a grande maioria dos cenários testados por outros artigos apenas utilizam longas rodovias sem curvas. Entretanto, em muitos cenários urbanos a trajetória dos veículos é altamente curvilínea, e sensores, como radar, teriam um campo de visão estreito. Conseqüentemente, impedindo que os veículos mantenham um campo de visão contínuo por longos períodos.

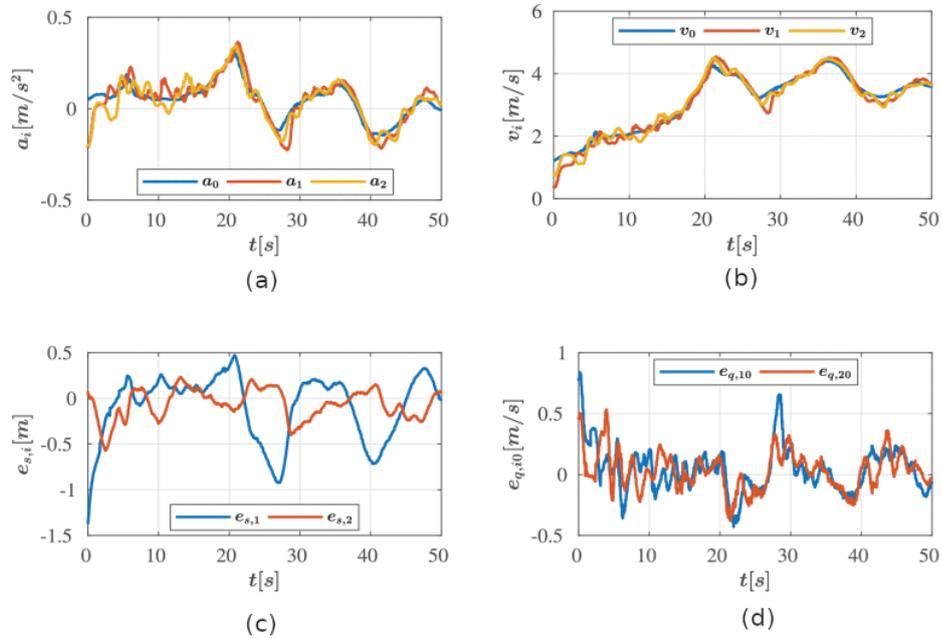
KHALIFA et al. (2021) compararam os resultados da simulação com os obtidos pelos veículos em escala real validando a viabilidade da abordagem sugerida, vide Figura 24. No entanto, os autores não analisam os efeitos de falhas na comunicação V2V sobre a estabilidade do *platoon*. Também não é discutido o que acontece com o *platoon* quando a comunicação com o líder é encerrada, visto que este é o único veículo conduzido por um ser humano. Por esta razão, o teste de veículos reais ainda é bastante perigoso e precisa ser ainda mais discutido.

Figura 23 – Protótipo de *platoon* no campus da Escola Central de Nantes (ECN)



Fonte: (KHALIFA et al., 2021)

Figura 24 – Resultados experimentais do *platoon*: (a) Aceleração. (b) Velocidade. (c) Erro de espaçamento. (d) Erro de velocidade.



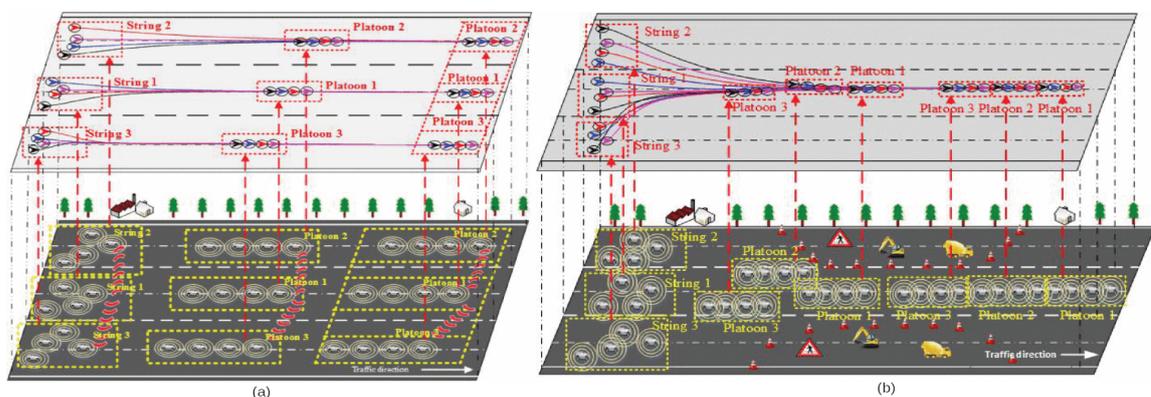
Fonte: (KHALIFA et al., 2021)

3.5 INOVAÇÕES DE CONTROLE PARA *PLATOON*

LI et al. (2019) propuseram um modelo de controle longitudinal para múltiplos veículos em múltiplas pistas. Enquanto GAO; SHI; CHEN (2019) propuseram uma estratégia de controle longitudinal baseada em inteligência artificial. Ambos os trabalhos se destacam pela complexidade do problema abordado. Por esta razão, os trabalhos de LI et al. (2019) e GAO; SHI; CHEN (2019) merecem destaque e uma seção para a discussão discutir os resultados obtidos. LI et al. (2019) propuseram um modelo de controle longitudinal não-linear de terceira ordem baseado em estratégias de consenso para Veículos Conectados (*Connected Vehicles CV*). O modelo de controle foi testado em um cenário multi-*platoon* homogêneo de múltiplas pistas a fim de averiguar a estabilidade do *platoon* e aumento da capacidade de veículos na rodovia.

Os autores de LI et al. (2019) propuseram um *framework* que leva em consideração o movimento de cada CAV, a topologia de comunicação utilizada, a estratégia de controle e o padrão de direção cooperativa para avaliar a direção cooperativa de múltiplos veículos em múltiplas faixas. Primeiro, os autores projetaram protocolos de controle para CV com comunicação V2V baseados no papel do veículo dentro do *platoon*, ou seja, para o líder ou seguidor. Em seguida, controladores longitudinais para cenários com um único *platoon* e com múltiplos de *platoons* foram projetados. Ao incorporar a distância e a diferença de velocidade entre o veículo líder e o veículo seguidor, os protocolos de controle propostos garantem que os veículos seguidores rastreiem o líder dentro de cada *platoon*. Em contraste, também é possível que diferentes *platoons* convergirem para formar um de *platoon* mais complexo, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Cenários de convergência: (a) para múltiplos platoons em múltiplas pistas (b) para formar um *platoon* mais complexo único *platoon* em uma única pista



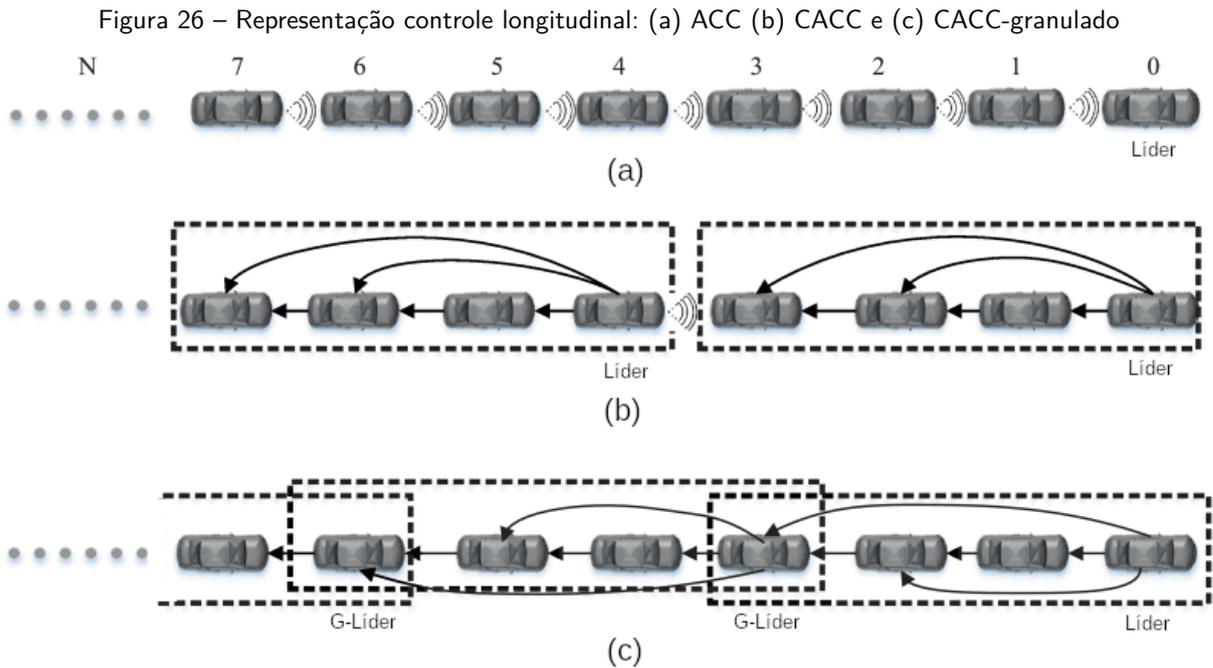
Fonte: (LI et al., 2019)

LI et al. (2019) projetaram protocolos de controle cooperativos para facilitar a formação de um *platoon* ao nível local (ou seja, subgrupos) e veículos de múltiplos *platoons* para alcançar um padrão cooperativo desejado ao nível global. Por fim, foram realizadas simulações numéricas para dois mecanismos cooperativos, paralelo e em série. Os resultados dos experimentos numéricos ilustram os efeitos dos protocolos de controle propostos para atingir o consenso de posição e velocidade. Os autores analisaram dois métodos de condução cooperativa, paralela e em série, para avaliar a estabilidade dos protocolos de controle propostos usando o critério de estabilidade de Routh-Hurwitz e a técnica Lyapunov. O estudo concluiu que, quando comparada à cooperação em série, a cooperação paralela pode aumentar a capacidade da rodovia.

O diferencial do trabalho de LI et al. (2019), quando comparado aos outros trabalhos analisados por esta dissertação, foi a proposta de usar controladores longitudinais e laterais não lineares para *platoons* simples ou múltiplos na mesma pista ou em várias pistas. Entretanto, apesar de afirmar que o sistema proposto pode operar em cenários de comunicação não confiáveis, os autores não descrevem o que compõe um cenário de comunicação não confiável e para quais tipos falhas de comunicação o sistema proposto não é resistente. Outra limitação do trabalho é o uso de apenas uma topologia, *Bidirecional Leader-Predecessor-Follower* (BLPF), sem mencionar o motivo pelo qual outras topologias não foram testadas.

GAO; SHI; CHEN (2019) propuseram uma estratégia de controle longitudinal CACC baseada em técnicas de granulação, utilizadas em inteligência artificial, a fim de melhorar a escalabilidade dos *platoons*, vide Figura 26.

O método proposto, chamado de CACC-granulado, utiliza as conexões estabelecidas pela topologia de fluxo de informações para resolver os problemas de limite de alcance da comunicação com o líder e o atraso propagação das informações dos sensores. Para o CACC-granulado, cada granulação de *platoon*, ou *subplatoon*, é uma parte do *platoon* global, e cada granulação de *platoon* por si só também é um *platoon* completo. O G-Líder é o líder da próxima granulação do *platoon* e, ao mesmo tempo, o último veículo da granulação do *platoon* anterior. Cada G-Líder se comunica com os membros de seu *subplatoon* e com o próximo G-Líder. O processo de granulação é reversível, portanto o método de granulação simplifica a topologia do fluxo de informações do *platoon* e aumenta a escalabilidade do *platoon*. Em um *platoon* comum, que não utiliza a técnica de granulação, quando o número de membros do *platoon* aumenta, o alcance da comunicação do líder e o atraso propagado das informações dos sensores limita o tamanho do *platoon* e, por consequência, a escalabilidade.

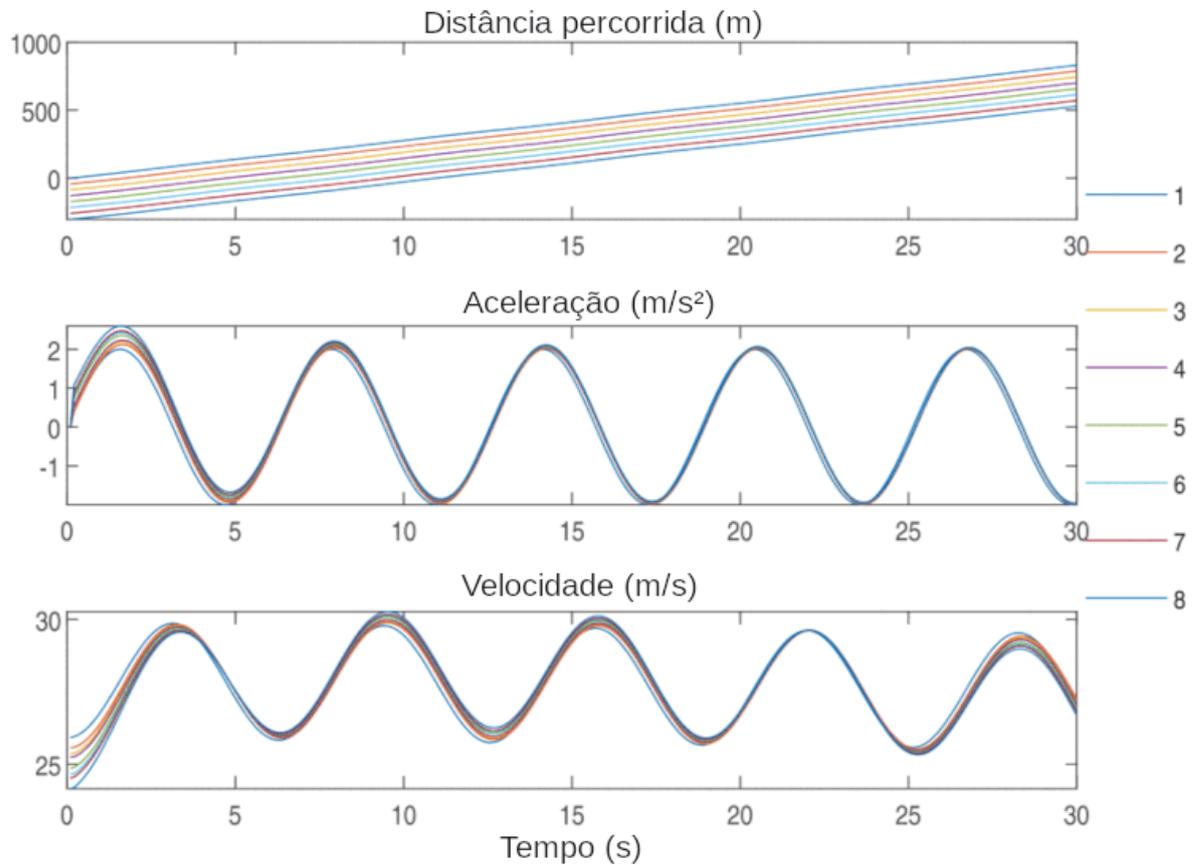


Fonte: (GAO; SHI; CHEN, 2019)

O protocolo proposto, chamado de "*L-Platooning*", utiliza um controlador descentralizado para formar *platoons* "longos". Como cada veículo controla seu status de veículo com base em informações de outros veículos, o CACC-granulado necessita de uma inteligência artificial para utilizar a IFT proposta. Por este motivo, as necessidades de cada granulação de *platoon* superam o planejamento global do *platoon*. A resposta da aceleração e velocidade do método proposto é observada na Figura 27.

A IFT proposta por GAO; SHI; CHEN (2019) utiliza o fluxo de informação unidirecional. As informações são enviadas dos veículos de maior hierarquia para os veículos de menor hierarquia, impossibilitando o líder (global ou local) saber de um incidente que ocorreu no meio do *platoon*, ou que um dos veículos está deixando o *platoon*. Outro ponto a ser destacado é sobre a escolha da estratégia de controle para o *platoon*, o CACC traz diversas vantagens em relação ao ACC, e os autores afirmam que o CACC-granulado é mais eficaz que o CACC. Entretanto, não é afirmado se o método proposto funcionaria sob diferentes estratégias de controle para o *platoon*, como um controle por consenso.

Figura 27 – Resultados do método CACC-granulado proposto



Fonte: (GAO; SHI; CHEN, 2019)

3.6 COMPARAÇÃO DOS TRABALHOS RELACIONADOS

O estudo de IFT para *platoon* está intrinsecamente ligado à estratégia de controle utilizada. Por esta razão, todos os artigos relacionados estudam *platoon*, ou do ponto de vista de controle, onde é necessário variar o ganho do controlador e estratégias de controle, ou do ponto de vista da comunicação, se houve falhas, atrasos e perdas na comunicação. Outro parâmetro importante na análise é a escolha da política de espaçamento, visto que dois *platoon* com as mesmas estratégias de controle e sob a mesma IFT de comunicação podem desempenhos diferentes. Na Tabela 2 é apresentada uma comparação dos trabalhos analisados nas seções anteriores.

Tabela 2 – Comparação do cenários de teste dos trabalhos relacionados

Trabalhos Relacionados	IFT	Estratégia de Controle	Cenário	Política de Espaçamento	Perda de Pacotes
WU et al., 2020	BD, BDL e BDPF	DSMC	X	X	X
GE et al., 2022	BD, LBD, LPBD e LTBD	DESM	Highway	CTH	X
ZHAO et al., 2021	4PF	Controle H_{∞}	X	CTH	V
ZHAO; CAI; CHENG, 2021	TPF	X	X	CTH	V
GAO; SHI; CHEN, 2019	PF e PLF	Consensus ACC-CACC	Highway	X	X
KHALIFA et al., 2021	PLF Híbrida	Consensus	X	X	X
YAN et al., 2022	TPSF, PLF, BDL e Aleatório	HASMC	Highway, Urbano	CTH	X

Fonte: O Autor (2022)

A escolha do cenário também influencia na avaliação de um *platoon*, uma vez que o controlador utiliza informações do meio proveniente dos sensores e da comunicação nas suas decisões. Dentre os sete trabalhos analisados, apenas um não utilizou um cenário simulado. Todos os outros simularam ou em cenário de rodovia, como esta dissertação, ou em cenário urbano.

Na Tabela 3 são descritas as métricas gerais utilizadas por cada um trabalhos para avaliação de um *platoon*. Manter uma distância segura de condução é um dos objetivos principais do *platooning*. Desta forma, o erro de espaçamento é a principal métrica para avaliar a segurança de um *platoon*. Erro na aceleração é utilizado para avaliar a colaboração entre o controlador e a comunicação. Um *platoon* é considerado estável quando os veículos trafegam mantendo velocidades relativas próximas de zero. Entretanto, um controlador desajustado ou falhas na comunicação fazem com que trocas constantes de velocidade ocorram. Finalmente, nenhum dos trabalhos levantados analisaram cenários em que ocorriam colisões.

Tabela 3 – Comparação das métricas de desempenho dos trabalhos relacionados

Trabalhos Relacionados	Erro de Espaçamento	Erro de Velocidade	Erro de Aceleração	Colisões
WU et al., 2020	V	V	V	X
GE et al., 2022	V	V	V	X
ZHAO et al., 2021	V	X	X	X
ZHAO; CAI; CHENG, 2021	V	V	V	X
GAO; SHI; CHEN, 2019	V	V	V	X
KHALIFA et al., 2021	V	V	V	X
YAN et al., 2022	V	V	X	X

Fonte: O Autor (2022)

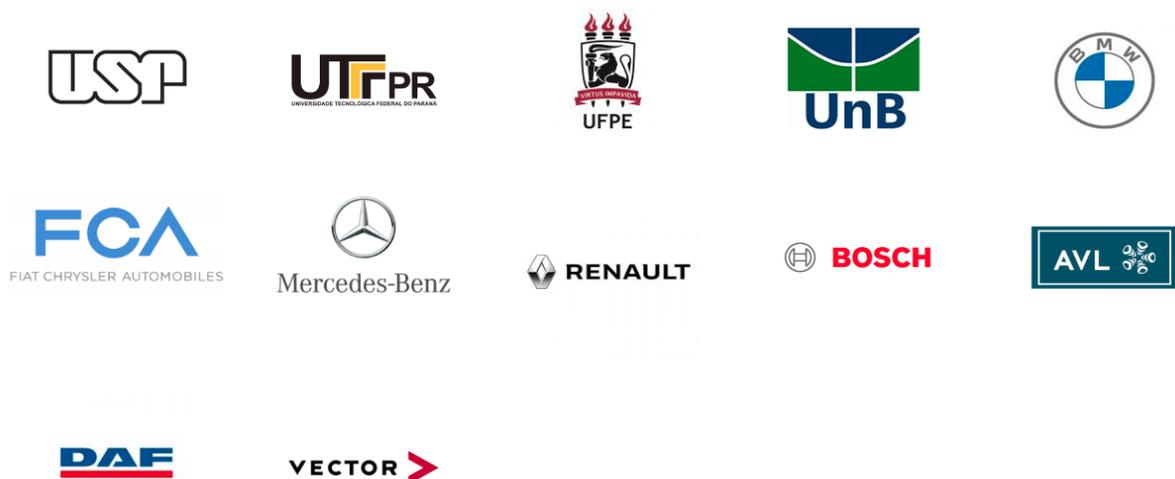
4 METODOLOGIA PROPOSTA PARA ANÁLISE DE IFT

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de análise para *platoons* sob diferentes configurações de IFT em cenários com falhas na comunicação. Neste capítulo, serão apresentadas uma visão geral do problema e as informações sobre o projeto, a qual essa pesquisa faz parte. Serão discutidas as configurações dos cenários de simulação, os parâmetros de simulação e as métricas utilizadas para realização dos testes.

4.1 SEGURAUTO

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com o projeto de pesquisa SegurAuto. O SegurAuto consiste em um consórcio formado por Institutos de Ciência e Tecnologia (ICT) e empresas do setor automobilístico para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) de Sistemas de Segurança Veicular, vide Figura 28. O SegurAuto está sendo desenvolvido no âmbito da chamada CONSEV (Condução Segura e Eficiente de Veículos) da Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP) e tem por objetivo desenvolver sistemas integrados de funções de segurança assistida ao condutor e ao ambiente para veículos autônomos.

Figura 28 – ICT e empresas do setor automobilístico participantes do SegurAuto



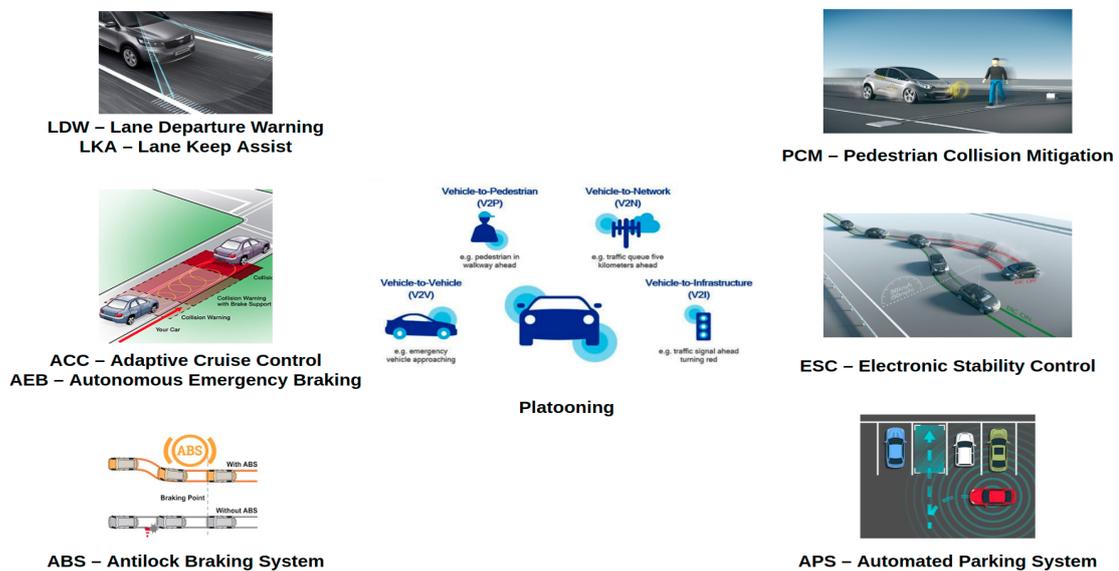
Fonte: Fundep

O SegurAuto pretende, com os seus resultados, contribuir para o desenvolvimento de inovação industrial por meio de pesquisas científicas e tecnológicas. E também para a formação de recursos humanos na área de engenharia automotiva. Além disso, o projeto intenciona

estabelecer uma rede nacional colaborativa formada pela academia, empresas e governo. Num esforço conjunto e contínuo a fim de aumentar a segurança e autonomia veicular.

Este trabalho colabora com o SegurAuto desenvolvendo uma metodologia de análise de IFT de um sistema de comunicação veículo para veículo V2V em CAV para aplicações *platoon*, representado na Figura 29. As atividades práticas deste trabalho foram executadas no Laboratório de Inovação para Cidades Inteligentes (LIVE) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Figura 29 – Funções de Segurança Assistida ao Condutor e Ambiente para Veículos Autônomos



Fonte: Fundep

4.2 FLUXO DE ANÁLISE DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia adotada busca estabelecer uma relação entre IFT em CAV para aplicações *Platoon*. O método exploratório, aplicado, pretende trazer luz à área do estudo em ITS por meio dos resultados desta pesquisa. A metodologia proposta de análise de desempenho para *platoon*, representada pelo fluxograma da Figura 30, é caracterizada por sete importantes etapas.

Figura 30 – Fluxo de análise da metodologia proposta



Fonte: O Autor (2022)

A Configuração do ambiente de simulação é realizada antes das simulações, modificando o ambiente de simulação com a configuração dos parâmetros específicos de cada simulação. Em seguida, é realizada a Simulação dos cenários de teste para condução cooperativa de veículos em *platoon*. Posteriormente, é efetuada a Coleta dos dados do simulador, assim como a transformação dos arquivos de extensão *.vec* para *.csv*. Após, é conduzida a Análise dos dados, nesta etapa as simulações são agrupadas pela IFT. Na etapa de Métricas de avaliação de desempenho, as equações de erro de distância e velocidade são aplicadas. Na etapa de Análise de desempenho de mobilidade, as simulações de cada IFT são separadas por faixas de velocidade e avaliadas de acordo com as métricas de desempenho. Por fim, é realizada uma Análise de desempenho da comunicação dos resultados obtidos na etapa anterior, a fim de quantificar os efeitos das falhas de comunicação em um *platoon*.

4.3 CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O ambiente de simulação foi construído tomando por base a integração do simulador de mobilidade SUMO com o simulador de rede OMNeT++ e dos *frameworks* VEINS, INET e Plexe. Sendo o último desenvolvido com foco para aplicações *platooning*.

No SUMO, a Matriz de Adjacência, do módulo "CC_VehicleVariables", foi modificada para permitir a implementação de seis novas Matrizes de Adjacência para emular diferentes IFT. Uma limitação do simulador é não permitir a troca da IFT durante a execução da simulação. Dessa forma, a troca a IFT utilizada requerer a recompilação do simulador, ação que demora vários minutos. No Plexe, os modelos de simulação são parametrizados e configurados usando arquivos de configuração com a extensão *.ini*, chamados de arquivos INI. No início de cada simulação, o arquivo INI configura as variáveis e parâmetros da simulação e determina, a partir

destes, o modelo de simulação a ser executado.

A modificação dos parâmetros do arquivo INI leva apenas alguns milissegundos, enquanto a execução de uma simulação com uma configuração de parâmetros específica, demora cerca de dez segundos. Desta forma, foi decidido executar todas as combinações de configurações para uma IFT antes de trocar a Matriz de Adjacência e recompilar o SUMO. A Tabela 4 dispõe das informações sobre os simuladores e suas versões utilizadas na execução dos experimentos.

Tabela 4 – Versões dos simuladores utilizados

Simulador	Versão
OMNeT++	5.6.2
INET	3.6.5
VEINS	5.1
SUMO	1.12.0
Plexe	3.0

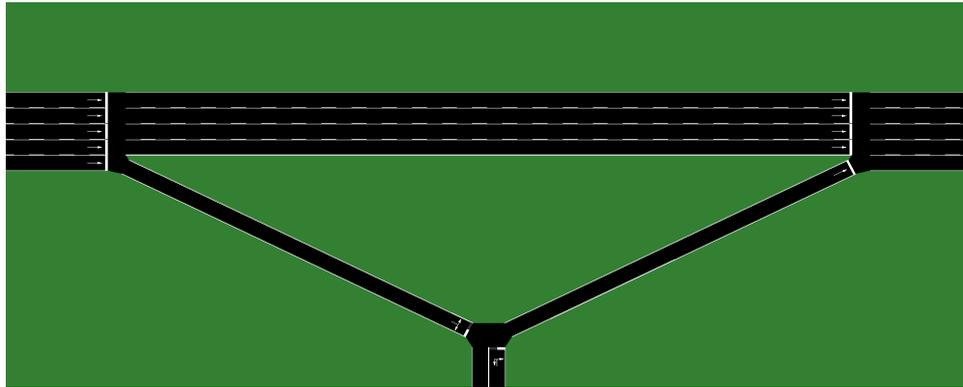
Fonte: O Autor (2022)

4.4 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

As simulações foram baseadas num *platoon* homogêneo composto por seis veículos, sendo um veículo líder e os demais seguidores. Esta configuração foi utilizada por SEGATA et al. 2014 em "Plexe: A platooning extension for Veins". Nas simulações os veículos do *platoon* percorrem uma rodovia vazia e sem curvas, conforme visto na Figura 31. No início de cada simulação, os veículos mantêm velocidade instantânea constante e igual a velocidade do veículo líder. O espaçamento entre os veículos é mantido constante durante os três segundos iniciais da simulação. O período de três segundos no início de cada simulação é necessário para a análise do comportamento dos veículos em regime constante. Após três segundos, o simulador inicia o processo de aceleração e desaceleração do veículo líder, para análise do comportamento dinâmico dos veículos. Em todas as simulações, curvas e aceleração e desaceleração são repetidas, emulando situações de perturbação, comuns no trânsito real. Todos os cenários foram simulados durante quarenta segundos.

O cenário de teste proposto contém falhas na comunicação V2V, *beacons* aleatórios são perdidos, a fim de verificar se o espaçamento desejado entre veículos é mantido independentemente das condições do canal de comunicação. O cenário de teste proposto foi projetado

Figura 31 – Highway simulada pelo Plexe



Fonte: O Autor (2022)

para reproduzir um sistema comunicação V2V operando em um mundo real, onde existem diferentes probabilidades de sucesso no envio e na recepção de mensagens entre todos os pares de veículos.

O cenário de teste proposto foi analisado utilizando diferentes IFT. Durante a simulação, todos os membros do *platoon* fazem um *broadcast* de informações pertinentes sobre o seu veículo (como velocidade, posição e aceleração) para os outros membros do *platoon*. Entretanto, apesar de todos os veículos receberem todas as mensagens, apenas as conexões de comunicação inter-veicular descritas pela IFT são utilizadas. Assim, a IFT define de qual veículo as informações são utilizadas no controlador local de cada veículo. Devido a possibilidade de mensagens de emergência não chegarem ao veículo de destino, uma IFT pode influenciar significativamente no comportamento da condução coletiva e cooperativa do *platoon*.

Dessa forma, a IFT influencia significativamente no comportamento da condução coletiva e cooperativa do *platoon*.

4.5 COLETA DE DADOS

Ao fim de uma simulação, o OMNeT++ salva os resultados em arquivos *.vec*. O *framework* Plexe foi desenvolvido para trabalhar com uma comunicação probabilística, por esta razão, para cada nova simulação executada, um arquivo *.vec* diferente é gerado, apesar de a simulação usar as mesmas configurações. O Plexe utiliza um tempo discreto em suas simulações. Todas as simulações começam no segundo 1.01 e tem um incremento de 0.1 segundo a cada nova atualização da simulação. Resultando em frequência de dez informações por segundo. A Figura 32 demonstra uma simulação de comunicação veicular utilizando o *framework* Plexe.

por IFT e posteriormente inserindo os arquivos num *Dataframe* específico para cada IFT, facilitando assim o tratamento das informações pertinentes para este trabalho.

Cada *Dataframe* tem em média 11 milhões de linhas, em que cada linha descreve uma etapa de uma simulação. A taxa de amostragem dos dados utilizada pelo Plexe é de 10Hz. As colunas do *Dataframe* contém informações específicas de cada simulação, como o tipo do controlador utilizado, a velocidade de condução do Líder (m/s), a frequência de oscilação da velocidade do líder (Hz) e a taxa de perda de pacotes (%) estabelecida para a simulação, abrangendo, também, as informações sobre o canal de comunicação e sobre a mobilidade de cada veículo, já descritos na etapa anterior. A estrutura dos dados de um *Dataframe* está representada na Figura 33

Figura 33 – Estrutura dos dados de um *Dataframe*

Simulation Time	Topology	Leader Velocity	Oscillation Amplitude	Oscillation Frequency	Packet Loss	node[0].acceleration	node[0].busyTime	node[0].collisions	node[0].controllerAcceleration	node[0].distance	node[0].nodeId	node[0].posx	node[0].posy	node[0].r
1.01	LPF	120	90	25	0	0.00053287	0.0	0.0	0.00227777	-1.0	0.0	232.32999999999993	242.45	
1.11	LPF	120	90	25	0	0.00102256	0.0	0.0	0.00320128	-1.0	0.0	235.65999999999995	242.45	
1.21	LPF	120	90	25	0	0.00140423	0.0	0.0	0.00308111	-1.0	0.0	239.0	242.45	
1.31	LPF	120	90	25	0	0.00168868	0.0	0.0	0.00292728	-1.0	0.0	242.32999999999993	242.45	
1.41	LPF	120	90	25	0	0.00189332	0.0	0.0	0.00274857	-1.0	0.0	245.65999999999995	242.45	
1.51	LPF	120	90	25	0	0.00202724	0.0	0.0	0.00255267	-1.0	0.0	248.98999999999997	242.45	
1.61	LPF	120	90	25	0	0.00210073	0.0	0.0	0.00234618	-1.0	0.0	252.32999999999993	242.45	
1.71	LPF	120	90	25	0	0.00212335	0.0	0.0	0.00213471	-1.0	0.0	255.65999999999995	242.45	
1.81	LPF	120	90	25	0	0.00210382	0.0	0.0	0.00192294	-1.0	0.0	258.98999999999998	242.45	
1.91	LPF	120	90	25	0	0.00205006	0.0	0.0	0.00171473	-1.0	0.0	262.32999999999999	242.45	
2.01	LPF	120	90	25	0	0.00196919	0.0	0.0	0.00151316	-1.0	0.0	265.65999999999995	242.45	
2.11	LPF	120	90	25	0	0.00186754	0.0	0.0	0.00132067	-1.0	0.0	268.98999999999998	242.45	
2.21	LPF	120	90	25	0	0.00175064	0.0	0.0	0.00113907	-1.0	0.0	272.32999999999999	242.45	
2.31	LPF	120	90	25	0	0.00162335	0.0	0.0	0.00096668	-1.0	0.0	275.65999999999995	242.45	
2.41	LPF	120	90	25	0	0.00148981	0.0	0.0	0.000813306	-1.0	0.0	278.98999999999998	242.45	
2.51	LPF	120	90	25	0	0.00135354	0.0	0.0	0.000670447	-1.0	0.0	282.32999999999999	242.45	
2.61	LPF	120	90	25	0	0.00121748	0.0	0.0	0.000541228	-1.0	0.0	285.65999999999995	242.45	
2.71	LPF	120	90	25	0	0.00108402	0.0	0.0	0.000425516	-1.0	0.0	288.98999999999998	242.45	
2.81	LPF	120	90	25	0	0.00095504	0.0	0.0	0.00032296	-1.0	0.0	292.32999999999999	242.45	
2.91	LPF	120	90	25	0	0.0008322	0.0	0.0	0.000233036	-1.0	0.0	295.65999999999995	242.45	
3.01	LPF	120	90	25	0	0.0001252	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	298.98999999999998	242.45	
3.11	LPF	120	90	25	0	0.294191	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	302.32999999999999	242.45	
3.21	LPF	120	90	25	0	0.510816	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	305.65999999999995	242.45	
3.31	LPF	120	90	25	0	0.688525	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	309.01000000000002	242.45	
3.41	LPF	120	90	25	0	0.834308	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	312.35999999999997	242.45	
3.51	LPF	120	90	25	0	0.953901	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	315.70999999999991	242.45	
3.61	LPF	120	90	25	0	1.05201	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	319.07999999999999	242.45	
3.71	LPF	120	90	25	0	1.13249	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	322.45999999999991	242.45	
3.81	LPF	120	90	25	0	1.19851	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	325.84999999999954	242.45	
3.91	LPF	120	90	25	0	1.25268	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	329.25	242.45	
4.01	LPF	120	90	25	0	1.29711	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	332.65999999999995	242.45	
4.11	LPF	120	90	25	0	1.33356	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	336.090000000000015	242.45	
4.21	LPF	120	90	25	0	1.36346	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	339.529999999999984	242.45	
4.31	LPF	120	90	25	0	1.38799	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	342.979999999999956	242.45	
4.41	LPF	120	90	25	0	1.40811	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	346.449999999999969	242.45	
4.51	LPF	120	90	25	0	1.42462	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	349.93000000000003	242.45	
4.61	LPF	120	90	25	0	1.43816	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	353.43000000000003	242.45	
4.71	LPF	120	90	25	0	1.44927	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	356.93999999999987	242.45	
4.81	LPF	120	90	25	0	1.45839	0.0	0.0	1.5	-1.0	0.0	360.45999999999991	242.45	
4.91	LPF	120	90	25	0	1.46704	0.0	0.0	-1.5	-1.0	0.0	364.0	242.45	
5.01	LPF	120	90	25	0	0.884783	0.0	0.0	-1.5	-1.0	0.0	367.54999999999993	242.45	
5.11	LPF	120	90	25	0	0.456353	0.0	0.0	-1.5	-1.0	0.0	371.109999999999976	242.45	
5.21	LPF	120	90	25	0	0.104891	0.0	0.0	-1.5	-1.0	0.0	374.680000000000003	242.45	
5.31	LPF	120	90	25	0	-0.18343	0.0	0.0	-1.5	-1.0	0.0	378.25	242.45	
5.41	LPF	120	90	25	0	-0.419954	0.0	0.0	-1.5	-1.0	0.0	381.80999999999995	242.45	
5.51	LPF	120	90	25	0	-0.613986	0.0	0.0	-1.5	-1.0	0.0	385.36999999999999	242.45	
6.61	LPF	120	90	25	0	-0.77316	0.0	0.0	-1.5	-1.0	0.0	388.930000000000003	242.45	

Fonte: O Autor (2022)

Um filtro foi utilizado para identificar quais simulações resultaram em colisões. Estas simulações foram extraídas dos *Dataframes* de IFT e adicionadas em um *Dataframe* específico para colisões.

4.7 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Os parâmetros de simulação utilizados nos experimentos foram: tempo de simulação, quantidade de veículos, velocidade do veículo líder, IFT, taxa de perda de pacotes, *start of oscil-*

lacion, oscillation frequency e *oscillation amplitude*. Estes parâmetros estão entre os mais utilizados pelos trabalhos que analisam IFT e são descritos nos parágrafos abaixo.

Tempo de Simulação (s) refere-se ao tempo total em que ocorrem os eventos discretos do sistema.

Quantidade de veículos é o número total de veículos que trafegam em cada cenário. Foram utilizados 6 veículos, 1 veículo líder e 5 seguidores, em todos os cenários de testes.

Velocidade (*km/h*) refere-se à velocidade com que os veículos trafegam nos cenários. Neste trabalho, os veículos se movimentam com velocidades variadas e descritas de acordo com a tabela 5. O objetivo da variação deste parâmetro é avaliar os impactos na política de espaçamento quando os veículos estiverem trafegando com essas velocidades.

Topologia (IFT) descreve as conexões de comunicação inter-veicular que cada veículo utiliza para adquirir informações dos veículos ao seu redor. Neste trabalho, foram utilizadas as sete IFT mais comumente utilizadas por outros trabalhos, TF, TPF, LTF, LTPF, LF, LPF e PF. O objetivo da variação deste parâmetro é avaliar os impactos na política de espaçamento quando os veículos estiverem trafegando com diferentes velocidades e taxas de perda de pacotes.

A Taxa de Perda de Pacotes (%) descreve, em porcentagem, o sucesso da recepção de um frame de dados do protocolo IEEE 802.11p. Ao alterar o parâmetro da taxa de perda de pacotes (*Frame Error Rate, FER*) da camada MAC, o simulador força perdas artificiais de pacotes na camada MAC do protocolo (WAVE, 2010). Neste trabalho, a FER foi variada de 0% a 100%, com intervalos de 10% entre 0% a 60% e com intervalos de 5% entre 65% a 100%. Para o simulador Plexe, uma FER de 0% significa nenhuma perda de pacotes e uma FER de 100% significa perda de todos os pacotes.

Start of Oscillation (SO) (s) refere-se ao tempo em segundos em que o veículo líder inicia o processo de acelerar e desacelerar, a fim de introduzir perturbação ao sistema. No início de todos os cenários de testes, os veículos do *platoon* iniciam a simulação a uma velocidade constante igual ao do Líder, depois de passados o SO, a forma de condução do veículo líder. O tempo de SO é necessário para inicialização das variáveis da simulação e análise do comportamento dos veículos em regime constante. Nesta dissertação, o tempo de SO foi de 3 segundos em todos os cenários de testes.

Oscillation Frequency (OF) (*Hz*) refere-se a frequência da função senoidal que descreve a dinâmica longitudinal do veículo. Neste trabalho, os veículos se movimentam com frequências variadas e descritas de acordo com a tabela 5. Uma maior frequência significa que os veículos

completam o processo de acelerar e desacelerar em período de tempo mais rápido. Foram utilizadas as frequências de 0.00 Hz, 0.10 Hz, 0.15 Hz, 0.20 Hz, 0.25 Hz e 0.30 Hz.

Oscillation Amplitude (OA) (km/h) é a metade da amplitude da função senoidal que descreve a dinâmica longitudinal do veículo. Um veículo com velocidade constante de 100 km/h antes do SO, após SO, a velocidade do veículo oscila de 100 km/h - OA a 100 km/h + OA, com uma amplitude total de oscilação de $2n \cdot OA$. Nesta dissertação, foi utilizada a seguinte fórmula para a escolha da amplitude de oscilação, $n \cdot (1/4 \text{ da velocidade do líder})$, com n variando de 0 a 8, de forma que para todas as velocidades escolhidas para os cenários de testes, nove diferentes OA fossem utilizadas para variar a dinâmica longitudinal do veículo. A variação uniforme destes parâmetros permite que a simulação emule o comportamento de situações reais que ocorrem no tráfego rodoviário.

A Tabela 5 exibe os parâmetros de simulação adotados nos cenários analisados neste trabalho, enquanto que a Tabela 6 exibe os parâmetros de simulação da rede.

Tabela 5 – Parâmetros da Simulação

Parâmetros	Valores
Tempo de Simulação (s)	40
Quantidade de veículos	6
Velocidade (km/h)	Cenário de Baixa Velocidade [1, 2, 3, 4, 5, 10] Cenário de Média Velocidade [20, 40, 60, 80] Cenário de Elevada Velocidade [100,120, 140] Cenário de Ultra Elevada Velocidade [160, 180,200]
IFT	TF, TPF, LTF, LTPF, LF, LPF e PF
Frame Error Rate (%)	[0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100]
Start of Oscillation (s)	3
Oscillation Frequency (mHz)	[0, 5, 10, 15, 20, 25, 30]
Oscillation Amplitude (km/h)	$n \cdot (1/4 \text{ da velocidade do líder})$, com $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \text{ e } 8$
Aceleração máxima (m/s^2)	2.3
Tempo de headway (s)	0.8
Tamanho do veículo (m)	4
Massa do veículo (Kg)	1460

Fonte: O Autor (2022)

Tabela 6 – Parâmetros de Simulação da Rede

Parâmetros	Valores
MAC Layer	IEEE 802.11p/ 1609.4
Frequência	5.89 GHz
Raio de transmissão	2600 m
Força do sinal	100 mW
Bit rate	6 Mbps
Tamanho do <i>beacon</i>	200 bytes
Periodicidade de <i>beacons</i>	0.1 s

Fonte: O Autor (2022)

4.8 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

As seguintes métricas foram utilizadas para avaliar a eficácia e a eficiência de cada IFT:

- Distância inter-veicular para o Predecessor (*DP*);
- Espaçamento desejado inter-veicular para o Predecessor (*EP*);
- Distância inter-veicular para o Líder (*DL*);
- Espaçamento desejado inter-veicular para o Líder (*EL*);
- Erro percentual da distância inter-veicular para o Predecessor (*PEP*);
- Erro percentual da distância inter-veicular para o Líder (*PEL*);
- Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Predecessor (*MPEP*);
- Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Líder (*MPEL*);
- Velocidade relativa para o Predecessor (*RSP*);
- Velocidade relativa para o Líder (*RSL*);
- Erro percentual de velocidade para o Predecessor (*PSEP*);
- Erro percentual de velocidade para o Líder (*PSEL*);
- Erro percentual médio de velocidade para o Predecessor (*MPSEP*);
- Erro percentual médio de velocidade para o Líder (*MPSEL*);

- Número de Colisões (NC).

Estas métricas estão descritas nos parágrafos abaixo.

Distância inter-veicular para o Predecessor (DP) (m) é a distância em metros entre dois veículos adjacentes i e $i-1$ (ZHAO; CAI; CHENG, 2021). Na simulação, essa distância é calculada a partir da diferença entre as posições dos veículos.

$$DP = r_{i-1} - r_i, i \in \mathbb{N}, \quad (4.1)$$

Espaçamento desejado inter-veicular para o Predecessor (EP) (m) é a interdistância definida pelo controlador Consensus baseada na política de espaçamento CTH como segura (SHEN et al., 2022). O EP entre os veículos é definido pela relação entre o tempo de headway (th), a velocidade do veículo (v_i) e um parâmetro constante de distância (d_0) definido pelo controlador. Assim, o EP entre os veículos é obtida pela equação:

$$EP = th * v_i + d_0, i \in \mathbb{N}, \quad (4.2)$$

Distância inter-veicular para o Líder (DL) (m) é a interdistância em metros entre qualquer veículo (r_i) e o líder (r_0) (ZHAO; CAI; CHENG, 2021). Na simulação, essa distância é calculada a partir da diferença entre as posições dos veículos.

$$DL = r_0 - r_i, i \in \mathbb{N}, \quad (4.3)$$

Espaçamento desejado inter-veicular para o Líder (EL) (m) é a interdistância definida pelo controlador Consensus baseada na política de espaçamento CTH como segura (SHEN et al., 2022). O EL é definido pela relação entre o tempo de headway (th), a velocidade do veículo (v_i), a posição do veículo no *platoon* (i), um parâmetro constante de distância (d_0) definido pelo controlador e o comprimento do veículo (c). O EL entre os veículos é obtida pela equação:

$$EL = (i - 1) * c + i * (th * v_i + d_0), i \in \mathbb{N}, \quad (4.4)$$

EL do veículo segundo veículo do *platoon* ($i = 1$) é igual ao seu EP, pois este é primeiro veículo atrás do líder, assim sua distância em relação ao líder e em relação ao predecessor é a mesma.

Erro percentual da distância inter-veicular para o Predecessor (*PEP*) (%) é a porcentagem da diferença entre DP e EP (GE et al., 2020). O PEP é a principal métrica para garantir a condução segura de cada veículo. Um PEP negativo significa que a distância entre dois veículos adjacentes é menor que definida pelo controlador, ou seja, não segura. O PEP entre os veículos é obtida pela equação:

$$PEP = 100 * \left(\frac{EP - DP}{DP} \right) \quad (4.5)$$

Erro percentual da distância inter-veicular para o Líder (*PEL*) (%) é a porcentagem da diferença entre DL e EL (KHALIFA et al., 2021). Um PEL_i alto significa que os veículos à frente estão conduzindo com distância maior do que a recomendada pelo controlador. O PEL entre os veículos é obtida pela equação:

$$PEL = 100 * \left(\frac{EL - DL}{DL} \right) \quad (4.6)$$

Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Predecessor (*MPEP*) (%) é a média dos PEP de todos os veículos do *platoon* (GE et al., 2020). O MPEP é a principal métrica para garantir a segurança de condução de todo o *platoon*. Um MPEP negativo significa que a distância média entre os veículos do *platoon* é menor que definida pelo controlador. Em um cenário onde há colisões, DP igual a zero, o PEP tende a infinito e o MPEP tende a menos infinito.

$$MPEP = \frac{1}{n} \sum_{i \in \mathbb{N}} PEP_i, \quad (4.7)$$

Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Líder (*MPEL*) (%) é a média dos PEL de todos os veículos do *platoon*. O MPEL é a métrica para avaliar o desempenho do *platoon*. O principal objetivo das aplicações de *platooning* é aumentar a capacidade da rodovia, para isso se faz necessário um MPEL baixo. Um MPEL alto significa que os veículos estão trafegando com distâncias maiores do que a recomendada pelo controlador, ocupando assim um maior trecho da rodovia.

$$MPEL = \frac{1}{n} \sum_{i \in \mathbb{N}} PEL_i, \quad (4.8)$$

Velocidade relativa para o Predecessor (RSP) (*m/s*) é a diferença de velocidade instantânea em metros por segundo entre dois veículos adjacentes i e $i - 1$ (WU et al., 2020). Na simulação,

essa diferença é calculada a partir das informações do estado do atual veículo enviadas nos *beacons*.

$$RSP = v_{i-1} - v_i, i \in \mathbb{N}, \quad (4.9)$$

Erro percentual de velocidade para o Predecessor (PSEP) (%) é a porcentagem da diferença entre a velocidade instantânea dos veículos adjacentes i e $i - 1$. Um PSEP negativo significa que a velocidade instantânea do veículo seguidor é maior que velocidade instantânea do veículo Predecessor. O PSEP entre os veículos é obtida pela equação:

$$PSEP = 100 * \left(\frac{RSP}{v_i} \right), \quad (4.10)$$

Velocidade relativa para o Predecessor (RSL) (m/s) é a diferença de velocidade instantânea em metros por segundo entre qualquer veículo (v_i) e o líder (v_0) GE et al.. Na simulação, essa diferença é calculada a partir das informações do estado do atual veículo enviadas nos *beacons*.

$$RSL = v_0 - v_i, i \in \mathbb{N}, \quad (4.11)$$

Erro percentual de velocidade para o Líder (PSEL) (%) é a porcentagem da diferença entre a velocidade instantânea entre qualquer veículos (v_i) e o líder (v_0). Um $PSEL_i$ alto significa que a velocidade do veículo Líder é muito superior a do seguidor. Isso ocorre normalmente quando os veículos não estão executando a mesma ação, aceleração ou frenagem. O PEP entre os veículos é obtida pela equação:

$$PSEL = 100 * \left(\frac{RSL}{v_i} \right) \quad (4.12)$$

Erro percentual médio de velocidade para o Predecessor (MPSEP) (%) é a média dos PSEP de todos os veículos do *platoon*. O MSEP é a principal métrica para garantir que os veículos consigam acompanhar a forma de condução de veículo predecessor à frente. Um MPSEP negativo significa que os veículos seguidores estão trafegando na rodovia com velocidades superiores que os veículos predecessores. Resultando uma condução perigosa que pode causar colisões.

$$MPSEP = \frac{1}{n} PSEP_i, i \in \mathbb{N}, \quad (4.13)$$

Erro percentual médio de velocidade para o Líder (MPSEL) (%) é a média dos PSEL de todos os veículos do *platoon*. O MPSEL é uma das principais métricas para avaliar o

desempenho do *platoon*. O principal objetivo das aplicações de *platooning* é aumentar a capacidade da rodovia, para isso se faz necessário um MPSEL baixo. Um MPSEL alto significa que os veículos não estão conduzindo a mesma velocidade que o veículo líder, ocupando assim um maior trecho da rodovia.

$$MPSEL = \frac{1}{n} PSEL_i, i \in \mathbb{N}, \quad (4.14)$$

Número de Colisões (NC) é o número de colisões que ocorreram em uma determinada IFT para todos os cenários testados. Nesta dissertação, uma colisão ocorre quando a *DP* é igual a zero.

4.9 ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MOBILIDADE

A velocidade de condução do veículo líder depende do ambiente em que o veículo trafega. Os diferentes fluxos de veículos, acarretaram em desempenhos distintos do *platoon*. Nesta etapa, um filtro foi utilizado para separar as simulações por velocidades iniciais específicas. As simulações em que a velocidade inicial do veículo líder for menor que 10 (*km/h*), foram alocadas em um novo *Dataframe* (*Dataframe* Baixa Velocidade). As simulações em que a velocidade inicial do veículo líder for de 20 (*km/h*) até 80 (*km/h*), foram alocadas em um novo *Dataframe* (*Dataframe* Média Velocidade). As simulações em que a velocidade inicial do veículo líder for de 100 (*km/h*) até 140 (*km/h*), foram alocadas em um novo *Dataframe* (*Dataframe* Elevada Velocidade). As simulações em que a velocidade inicial do veículo líder for de 160 (*km/h*) até 200 (*km/h*), foram alocadas em um novo *Dataframe* (*Dataframe* Ultra Elevada Velocidade).

Tabela 7 – Faixas de velocidade adotadas

Faixas de Velocidade	Velocidades (<i>km/h</i>)	Número Simulações
Baixa Velocidade	1, 2, 3, 4, 5 e 10	30729
Média Velocidade	20, 40, 60 e 80	30756
Elevada Velocidade	100,120 e 140	22828
Ultra Elevada Velocidade	160, 180 e 200	22906

Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 7 contém as Faixas de velocidade dos *Dataframe* e o número de simulações em cada *Dataframe*. O resultado desta análise é discutido extensamente na seção 5.3.

4.10 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA COMUNICAÇÃO

A qualidade da comunicação tem um efeito direto no desempenho de um *platoon*. O controlador local de cada veículo do *framework* Plexe apenas utiliza informações providas do canal de comunicação para a tomada de decisão (SEGATA et al., 2014). Por esta razão, se fez necessário aprofundar ainda mais a análise da seção 4.9. Nesta etapa, foram utilizados filtros nos *Dataframe* de cada uma das faixas de velocidade, descritas na seção 4.9, para separar as simulações por valor de FER. O número de simulações de cada faixa de velocidade é representado na Tabela 8. Em seguida, as métricas, descritas na seção 4.8, foram aplicadas. Por fim, é analisado o desempenho do *platoon* em relação às métricas MPEP e MPEL. A variação da qualidade do canal de comunicação do protocolo 802.11p é feita através do parâmetro FER (WAVE, 2010). Para cada métrica é gerado um gráfico e uma tabela comparando o desempenho de cada IFT para percentuais diferentes de FER. O resultado desta análise é discutido na seção 5.3 deste trabalho.

Tabela 8 – Número de Simulações da Faixa de Velocidade por FER

FER (%)	Baixa Velocidade	Média Velocidade	Elevada Velocidade	Ultra Elevada Velocidade
0	2056	2056	1542	1510
10	2086	2086	1535	1562
20	2051	2051	1532	1554
30	2064	2064	1520	1559
40	2100	2100	1577	1547
50	2060	2060	1547	1519
60	2067	2067	1534	1562
65	2048	2048	1543	1530
70	2085	2085	1538	1520
75	1828	1828	1520	1381
80	1859	1859	1367	1391
85	1841	1841	1395	1407
90	1835	1835	1400	1404
95	1535	1535	1322	1394
100	2084	2084	1568	1546

Fonte: O Autor (2022)

5 RESULTADOS

Os resultados a seguir foram obtidos a partir da análise de mais de cem mil simulações. A dinâmica longitudinal do veículo líder descreve a forma de condução de todo o *platoon*. As ações de acelerar e desacelerar muitas em curtos espaços de tempo podem ser vistas como acréscimo de perturbação ao sistema (ORKI; AROGETI, 2019). Em um *platoon* estável, o acréscimo de perturbação não deve ser propagada para os outros veículos. O estudo das simulações verifica se os veículos seguidores são capazes de manter velocidades relativas e distâncias para o veículo predecessor imediato constantes enquanto o veículo líder conduz o *platoon* sinusoidalmente com diferentes IFT de comunicação e taxas de perda de pacotes.

A análise de resultados deste capítulo foi estruturada da seguinte forma. Primeiramente, uma configuração específica dos parâmetros de uma simulação é analisada. Posteriormente, é demonstrado como a variação dos parâmetros afeta o desempenho de um *platoon* sob uma mesma IFT. Em seguida, uma análise global do desempenho das sete IFT analisadas por esta dissertação é feita. Finalmente, um estudo quantitativo dos cenários de colisões demonstrando qual IFT teve o pior desempenho em prevenir acidentes é realizado.

5.1 SIMULAÇÃO DE LPF SOB CONFIGURAÇÃO ESPECÍFICA

O estudo de uma IFT necessita reproduzir as diversas condições de condução que podem ocorrer em um sistema de tráfego rodoviário (ZHENG et al., 2016). Em uma rodovia sem outros veículos na pista, motoristas tendem a acelerar até chegar em uma velocidade onde se sentem confortáveis e, em seguida, manter velocidade constante o resto do trajeto ou até que as condições de tráfego mudem. Entretanto, este cenário não é o mais provável de acontecer. Na grande maioria dos cenários, os motoristas têm que levar em consideração apenas sua forma de condução, mas também a dos veículos ao seu redor.

Os parâmetros da simulação foram modelados para emular o efeito de um *platoon* de 6 CAV, 1 veículo líder e 5 seguidores, trafegando em um cenário real de rodovia. A configuração específica dos parâmetros de uma simulação usados nesta análise é encontrada na Tabela 9. Nesta análise são avaliados o deslocamento de um *platoon* em um rodovia, a distância inter-veicular para o veículo predecessor, o erro percentual entre distância real e o espaçamento seguro desejado, a velocidade em que os veículos trafegam na rodovia, a velocidade relativa

entre os veículos e a aceleração instantânea de cada veículo. O tempo total de simulação para esta configuração foi de 40 segundos.

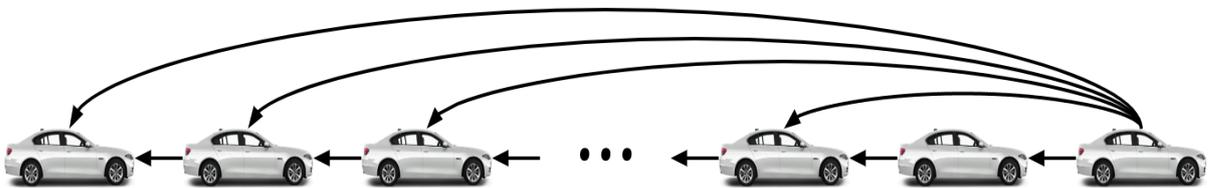
Tabela 9 – Parâmetros da Simulação

Parâmetros	Valores
IFT	LPF
Quantidade de veículos	6
Velocidade (m/s)	33.33
Frame Error Rate (%)	0
Start of Oscillation (s)	3
Oscillation Frequency (mHz)	25
Oscillation Amplitude (km/h)	90
Aceleração máxima (m/s ²)	2.3
Tempo de headway (s)	0.8
Tamanho do veículo (m)	4

Fonte: O Autor (2022)

Dentre as IFT expostas na 2.3.4.3, a LPF foi escolhida para demonstrar as métricas de avaliação de um *platoon*, visto que a mesma também é utilizada em uma vasta gama de artigos de sistemas de direção colaborativa. Na LPF, os *beacons* enviados pelo líder são considerados no controlador local de todos os veículos predecessores, como representado na Figura 34. Além disso, cada veículo também considera informações provenientes de seu veículo antecessor imediato para a ação do controlador.

Figura 34 – LPF



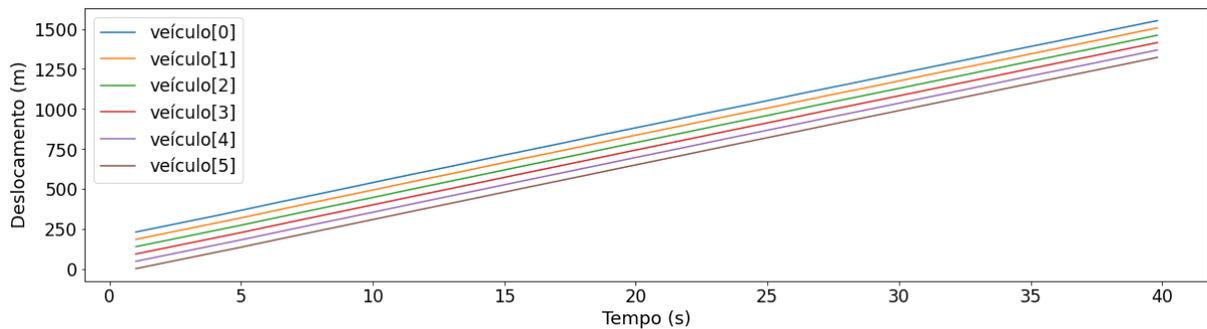
Fonte: O Autor (2022)

A posição cada veículo ao início da simulação é definida pela relação entre o tempo de *headway* (th), a velocidade do veículo (v_i), a posição do veículo no *platoon* (i), um parâmetro constante de distância (d_0) definido pelo controlador e o comprimento do veículo (c). Assim, o posição inicial de cada veículo ($Posx_i$) é obtida pela equação:

$$Posx_i = (6 - i) * c + (i - 5) * (th * v_i + d_0), i \in \mathcal{N}, \quad (5.1)$$

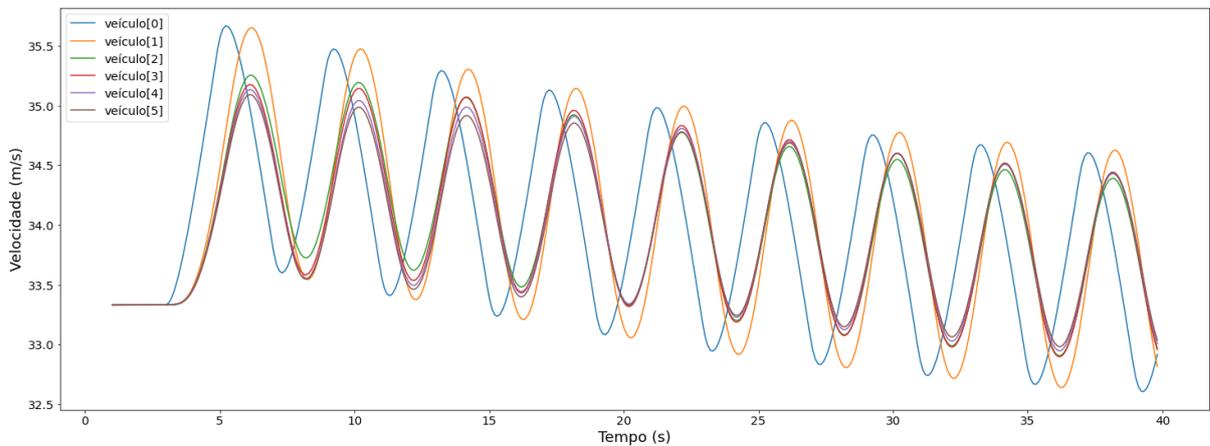
O deslocamento total de cada veículo na simulação é visto na Figura 35. Apesar das ações do Líder de frenagem seguidas de uma nova aceleração não é possível notar graficamente oscilações ou inclinações no gráfico. Isso se deve ao fato que apesar dos veículos não trafegarem na rodovia com velocidades constantes, os parâmetros de frequência e de amplitude da dinâmica longitudinal do líder são. Conseqüentemente resultando em uma velocidade média constante para o trajeto.

Figura 35 – Deslocamento do *platoon* ao longo de uma rodovia



Fonte: O Autor (2022)

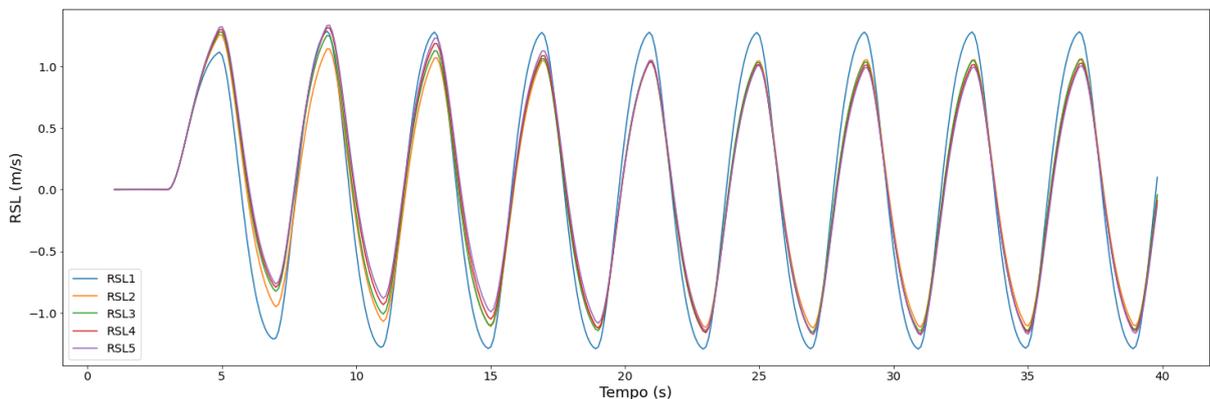
A velocidade instantânea de cada veículo é representada na Figura 36, em que os picos representam a velocidade máxima de cada veículo e o momento de troca de velocidade. O gráfico da Figura 36 deixa claro que existe uma defasagem temporal entre o momento em que o veículo líder troca de velocidade e o momento em os seguidores realizam a mesma ação. A explicação por trás deste atraso é que o veículo líder informa, através de *beacons*, os outros veículos do *platoon* de seu estado atual e não de suas ações futuras. Por esta razão, apesar de uma comunicação sem perda de pacotes e sem interferência, sempre existirá um atraso inercial entre as ações do líder e de seus seguidores.

Figura 36 – Velocidade instantânea dos veículos de *platoon*

Fonte: O Autor (2022)

Em contrapartida, não há defasagem de tempo entre as ações dos seguidores, como pode ser observado na Figura 37. Isso se dá por conta do tipo de IFT utilizada. Em uma LPF, todos veículos seguidores recebem os *beacons* do líder com uma diferença de microssegundos. A homogeneidade dos veículos e posição das antenas no topo de cada veículo faz com que cada mensagem seja propagada a uma frequência de 5.9 GHz em um espaço livre sem interferência. Dessa forma, os controladores locais de cada carro tem o mesmo tempo para reagir às ações do líder.

Figura 37 – Velocidade relativa para o Líder (RSL)

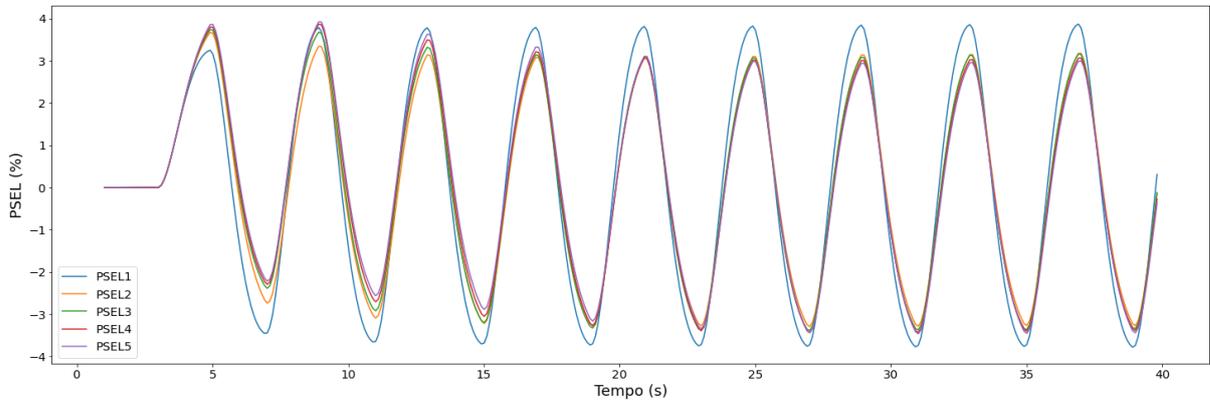


Fonte: O Autor (2022)

A Figura 38 é uma representação gráfica qualitativa do erro percentual da velocidade relativa entre o Líder e os outros veículos do *platoon*. Como esperado, o gráfico se assemelha ao comportamento do gráfico de velocidade relativa em relação ao Líder da Figura 37. O momento de máximo e mínimo de cada PSEL acontece na troca de ação do líder. O erro

positivo significa que a velocidade do veículo líder é superior ao do veículo seguidor, enquanto um erro negativo indica que a velocidade do veículo Seguidor é superior ao do veículo líder.

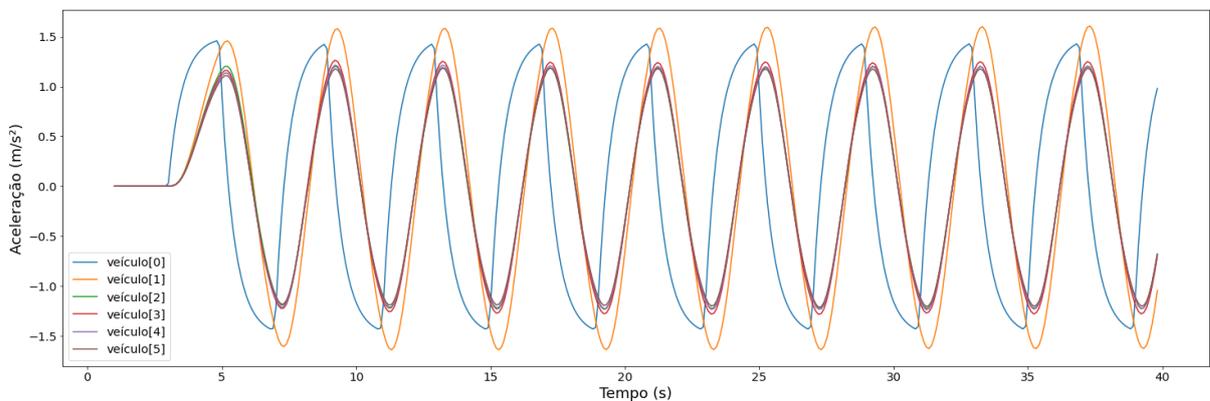
Figura 38 – Erro percentual de velocidade para o Líder (PSEL)(%)



Fonte: O Autor (2022)

Durante o processo de aceleração do veículo líder, o PSEL será sempre positivo, pois os veículos seguidores utilizam a última informação enviada pelo líder como objetivo para o seu controlador local. A PSEL é máxima no momento seguinte à troca de ação do veículo líder, pois enquanto o líder já está em um processo de frenagem, os veículos seguidores ainda não terminaram de acelerar. Esta diferença é claramente evidenciada na Figura 39 a seguir, o pico de aceleração dos veículos seguidores ocorre por volta da metade do processo de frenagem do veículo líder.

Figura 39 – Aceleração instantânea de veículos em um *platoon*

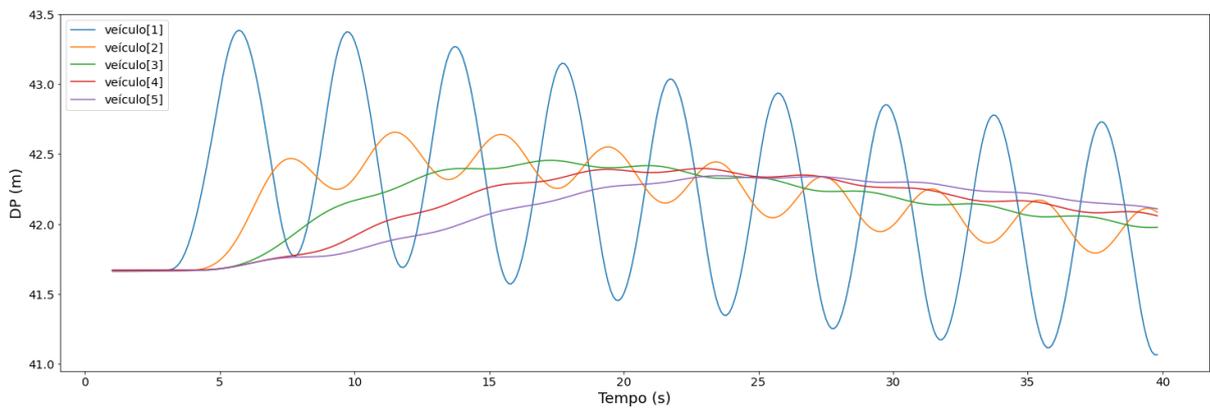


Fonte: O Autor (2022)

A principal finalidade da aplicação de *platoon* é aumentar a segurança nas rodovias. Por esta razão, o controlador baseado em consenso utiliza uma política de espaçamento CTH para garantir um espaçamento seguro entre os veículos (ZHAO; CAI; CHENG, 2021). Utilizando

a equação da seção 2.3.3, $d_{(i, i-1)} = th * v_i + d_0$, chegamos à conclusão de que é necessário uma distância de 41.66 metros entre dois veículos para que o controlador local de cada veículo do *platoon* consiga manter uma condução segura. A Figura 40 representa a distância entre um veículo e o seu predecessor. Como há uma oscilação na velocidade de cada veículo, representada na Figura 41, o espaçamento seguro desejado também oscila em resposta à mudança de velocidade.

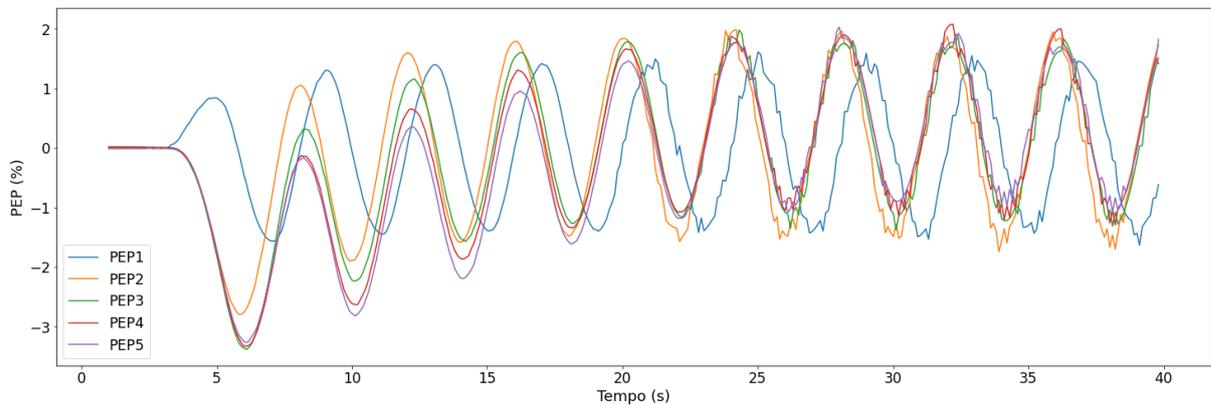
Figura 40 – Distância para o predecessor



Fonte: O Autor (2022)

A partir do gráfico 40 é possível observar que a maior distância entre o veículo líder e o primeiro veículo Seguidor ocorre no pico da velocidade do seguidor. Neste momento, o veículo Seguidor começa a diminuir sua velocidade, entretanto, não consegue acompanhar a curva de aceleração do líder, e, por consequência, ocorre a maior distância entre os veículos. Um PEP positivo ocorre quando a distância entre dois veículos adjacentes for maior que a calculada pela equação da política de espaçamento. Aumentando assim a resposta necessária do controlador para corrigir o erro.

Figura 41 – Erro percentual da distância inter-veicular para o Predecessor - (PEP)



Fonte: O Autor (2022)

5.2 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UMA SIMULAÇÃO

A variação dos parâmetros de uma simulação serve para emular as diferentes condições de tráfego. Desta forma se faz necessário avaliar o comportamento de uma IFT sob diferentes configurações a fim de investigar se os espaçamentos seguros desejados serão mantidos.

5.2.1 Variação do *Oscillation Frequency* (OF)

A variação do parâmetro OF de uma simulação altera o período da função de velocidade da dinâmica longitudinal do veículo líder. Conseqüentemente, alterando o período em que os demais veículos alternam entre as ações de acelerar e desacelerar. A análise dos resultados da variação deste parâmetro indicam se o controlador consegue se adequar, por exemplo, a diferentes tempos de reações necessários para evitar acidentes. A variação do parâmetro de cada uma das simulações comparadas nesta análise é encontrada na Tabela 10. Os demais parâmetros da simulação são os mesmos utilizados na análise da seção anterior.

Tabela 10 – Parâmetros da Simulação

Parâmetros	cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5	cenário 6
<i>Oscillation Frequency (mHz)</i>	5	10	15	20	25	30

Fonte: O Autor (2022)

O deslocamento de cada veículo líder é visto na Tabela 11. Diferentemente da análise

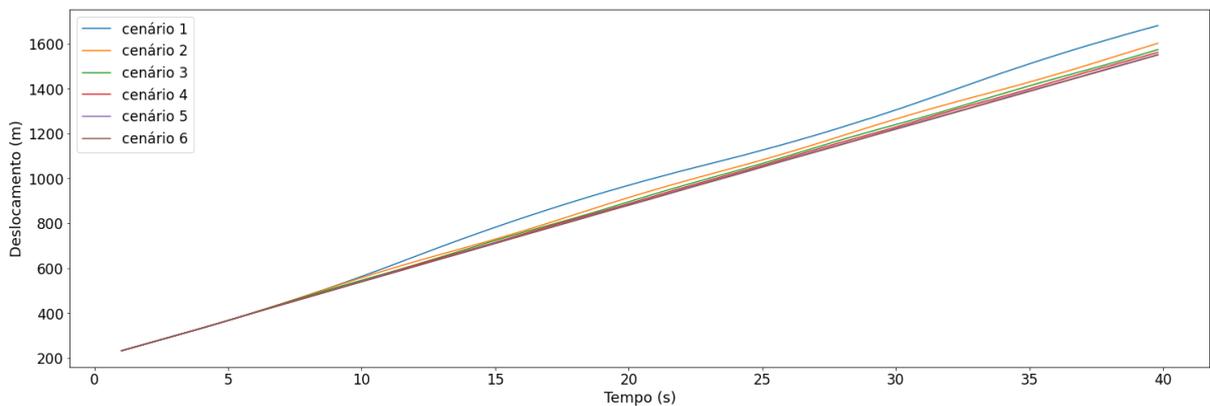
de uma única simulação, é possível notar graficamente na Figura 42 pequenas oscilações e diferentes inclinações no gráfico. Isso se deve ao fato que diferentes parâmetros OF, causam diferentes velocidades médias para o trajeto.

Tabela 11 – Deslocamento do *platoon* ao longo de uma rodovia

Métrica	cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5	cenário 6
Deslocamento (<i>m</i>)	1680.59	1601.98	1573.68	1561.28	1551.48	1549.78
Velocidade média do Líder (<i>m/s</i>)	37.31 ± 3.59	35.30 ± 1.86	34.57 ± 1.20	34.25 ± 0.86	33.99 ± 0.65	33.95 ± 0.50

Fonte: O Autor (2022)

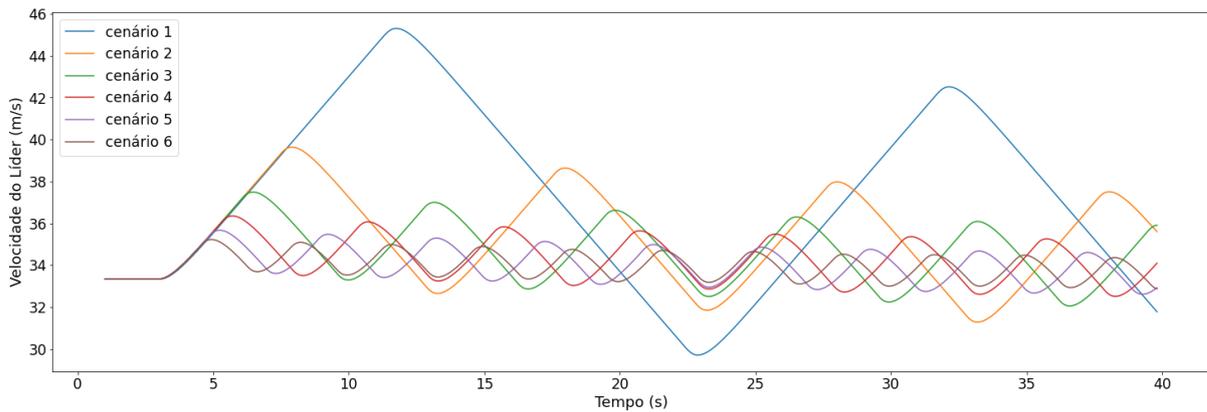
Figura 42 – Deslocamento do *platoon* ao longo de uma rodovia



Fonte: O Autor (2022)

Veículos com menores valores de OF demoram mais tempo para trocar de uma ação de aceleração para uma de desaceleração. A Figura 43 demonstra graficamente que durante o mesmo intervalo de tempo de uma simulação, simulações com menores valores de OF resultaram em menor número de picos de velocidade máxima. Resultando, assim, em uma permanência maior em velocidades altas e em uma velocidade média do trajeto maior. Também é possível observar graficamente que a aceleração utilizada pelos controladores locais de cada veículo líder é a mesma. Durante o período de uma ação de aceleração, cada veículo líder tenta atingir a velocidade máxima estabelecida pelo parâmetro de amplitude da senoidal (OA) estabelecido para a simulação.

Figura 43 – Velocidade instantânea dos Líderes

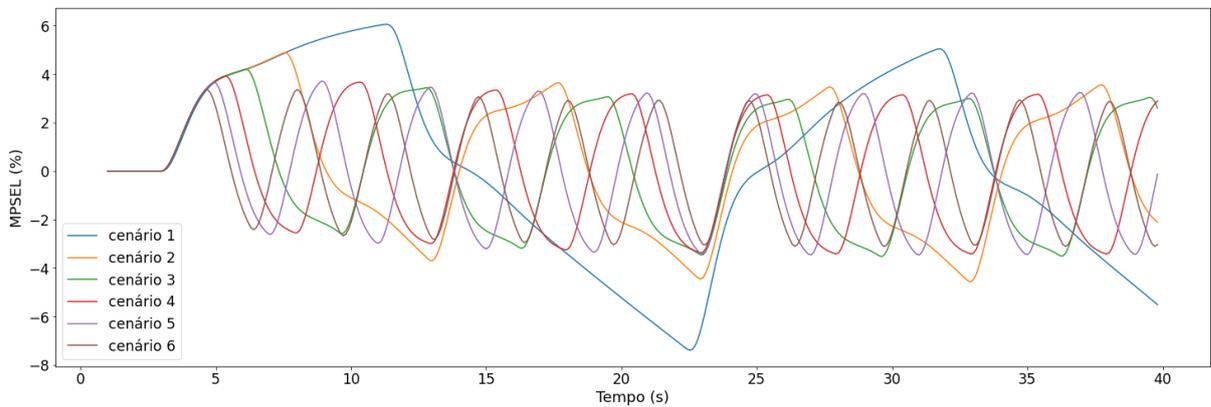


Fonte: O Autor (2022)

O objetivo do controlador é atingir uma amplitude de 25 m/s (90 km/h). Resultando em uma velocidade máxima de 58.33 m/s (210 km/h) e uma velocidade mínima de 8.33 m/s (30 km/h). Entretanto, o controlador local de cada veículo não consegue atingir essas velocidades durante o tempo estabelecido para uma ação de aceleração e desaceleração devido às limitações físicas do veículo. A velocidade máxima atingida no segundo pico de aceleração do veículo líder do cenário 1 é menor que a do primeiro. Isso se deve ao fato de que o segundo processo de aceleração foi iniciado com uma velocidade inicial menor durante o mesmo período de tempo. Assim, as limitações físicas do veículo impedem que as velocidades estabelecidas pelo controlador sejam atingidas em um curto espaço de tempo.

A velocidade relativa para o Líder é analisada pela métrica de velocidade MPSEL. Um MPSEL médio positivo indica que o veículo líder tem uma velocidade média superior do que a média dos outros veículos do *platoon*, resultando em um aumento da distância média para cada um dos veículos. O distanciamento de um líder para os outros veículos do *platoon* é a consequência da ineficácia de um controlador em manter todos os veículos trafegando a uma distância segura constante. O gráfico da Figura 44 representa o comportamento da métrica MPSEL durante o trajeto dos veículos. No gráfico, os momentos em que o MPSEL é positivo condizem com o processo de aceleração do veículo líder, enquanto o MPSEL é negativo ocorre durante o processo de desaceleração.

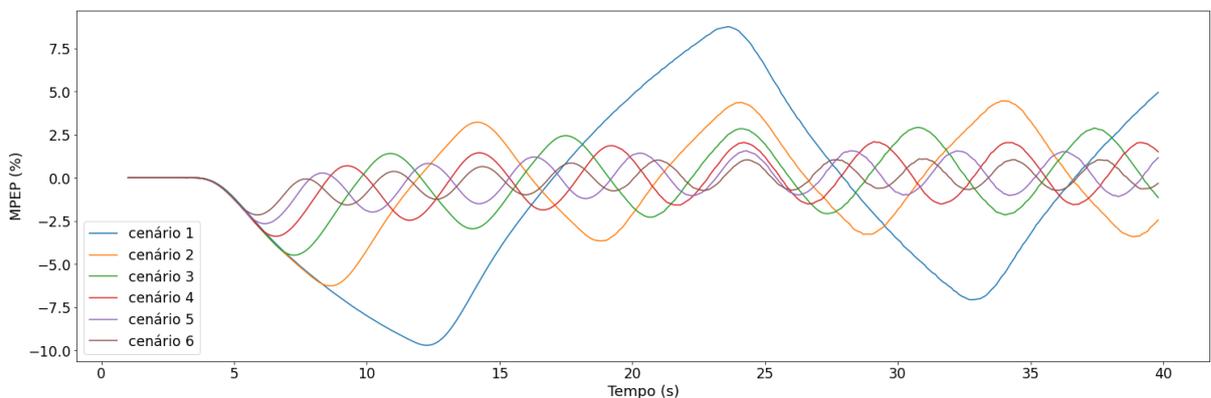
Figura 44 – Erro percentual médio de velocidade para o Líder



Fonte: O Autor (2022)

Como afirmado anteriormente, todos os veículos de um *platoon* recebem os *beacons* com a atualização do estado do líder com diferença de apenas alguns microssegundos. Entretanto, um veículo Seguidor não pode ter uma velocidade média superior a do veículo predecessor imediato, uma vez que o principal objetivo do controlador é manter o espaçamento seguro desejado entre os veículos. A métrica MPEP avalia a relação entre a distância entre dois veículos e o espaçamento seguro para todos os veículos do *platoon*. Um MPEP positivo indica que a distância entre dois veículos é superior à esperada pela política de espaçamento. Desta forma, apesar de não ser ideal, pois diminui a capacidade da rodovia, o *platoon* trafega de uma forma segura. A Figura 45 representa o comportamento da métrica MPEP durante o tempo de simulação.

Figura 45 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Predecessor (MPEP)

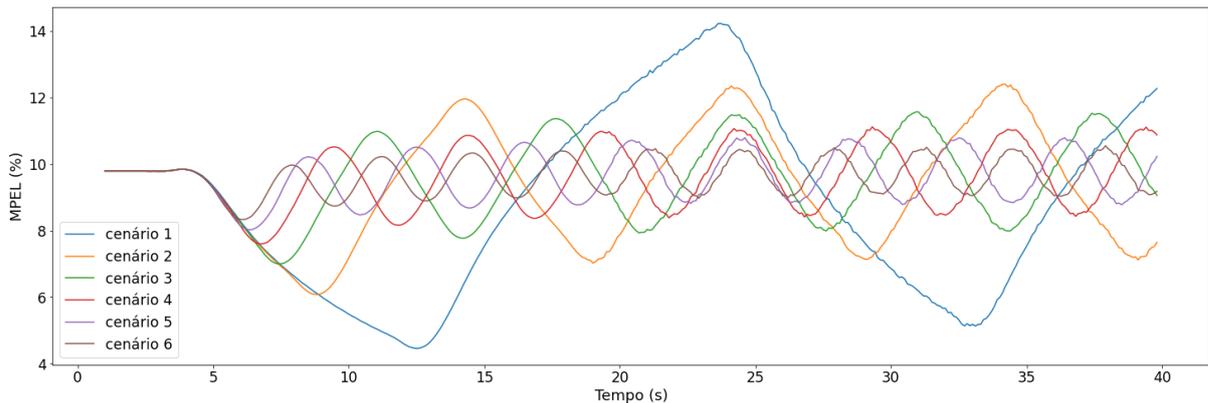


Fonte: O Autor (2022)

Outra métrica importante para o desempenho de um *platoon* é a MPEL. Esta indica o erro médio da posição de cada veículo do *platoon* para a do líder. Assim como a MPSEL, MPEL

médio positivo indica que o veículo líder está aumentando a distância média para cada um dos veículos. Desta forma, um MPEL positivo indica uma diminuição da capacidade de veículos de uma rodovia. Em contrapartida, aumenta indiretamente a segurança, pois aumenta o espaço entre o veículo líder e os demais membros do *platoon*. A variação da métrica MPEL durante o tempo de simulação é representada na Figura 46 a seguir.

Figura 46 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Líder (MPEL)



Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 12 a seguir traz um comparativo dos cenários utilizados na análise desta seção. O cenário 1 tem a maior velocidade média e, por consequência, o maior deslocamento em período de 40 segundos. O líder deslocou-se 80 metros a mais que o segundo melhor cenário e mais de 130 metros do que o pior. Velocidade, por si só, não é um parâmetro de qualidade. O cenário 1 teve o pior desempenho em relação ao MPEP, significando que em média todos os veículos do *platoon* trafegam a rodovia com uma distância entre dois veículos adjacentes menor que a esperada pela política de espaçamento. Desta forma, podemos afirmar que o cenário 1 é o mais rápido, entretanto, o mais perigoso.

Ao olharmos o cenário 5, observamos que, dentre todos os cenários testados nesta análise de variação do parâmetro de frequência, este obteve erros absolutos mais próximos de zero (MPEP, MPSEP e MPSEL). Isso indica que, dentre os seis cenários, o cenário 5 alcançou, atingiu o melhor desempenho em relação a capacidade de veículos na pista. O controlador local de cada veículo conseguiu responder e manter uma baixíssima velocidade relativa para o líder durante todo o trajeto.

Tabela 12 – Comparativo dos cenários utilizados na análise desta seção

Métrica	cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5	cenário 6
Deslocamento (m)	1680.59	1601.98	1573.68	1561.28	1551.48	1549.78
Velocidade média do Líder (m/s)	37.31 ± 3.59	35.30 ± 1.86	34.57 ± 1.20	34.25 ± 0.86	33.99 ± 0.65	33.95 ± 0.50
MPEP	-1.10 ± 4.19	-0.44 ± 2.29	-0.18 ± 1.53	-0.15 ± 1.14	-0.12 ± 0.83	-0.12 ± 0.60
MPEL	8.86 ± 2.29	9.34 ± 1.44	9.55 ± 1.01	9.59 ± 0.79	9.62 ± 0.60	9.63 ± 0.45
MPSEP	0.12 ± 0.70	0.09 ± 0.46	0.06 ± 0.42	0.04 ± 0.40	0.02 ± 0.38	0.03 ± 0.33
MPSEL	0.29 ± 3.13	0.31 ± 2.31	0.22 ± 2.15	0.11 ± 2.06	0.03 ± 1.95	0.07 ± 1.71

Fonte: O Autor (2022)

5.2.2 Variação da Velocidade

O fluxo de veículos em uma rodovia nunca é constante. Em horários de pico, por exemplo, há um acréscimo no número de veículos e, por consequência, uma diminuição da velocidade em que os veículos se movimentam. Desta forma, a variação do parâmetro de velocidade inicial do líder permite avaliar o desempenho do *platoon* em diferentes fluxos de veículos em uma rodovia. Além de permitir avaliar se o controlador consegue manter o distanciamento seguro esperado entre os veículos independente da velocidade de condução. Cinco novos cenários são propostos para avaliar as métricas de desempenho de um *platoon*. A variação do parâmetro de cada uma das simulações comparadas nesta análise é encontrada na Tabela 13. Os demais parâmetros da simulação são os mesmos utilizados na análise da seção 5.1.

Tabela 13 – Variação do parâmetro de cada uma das simulações

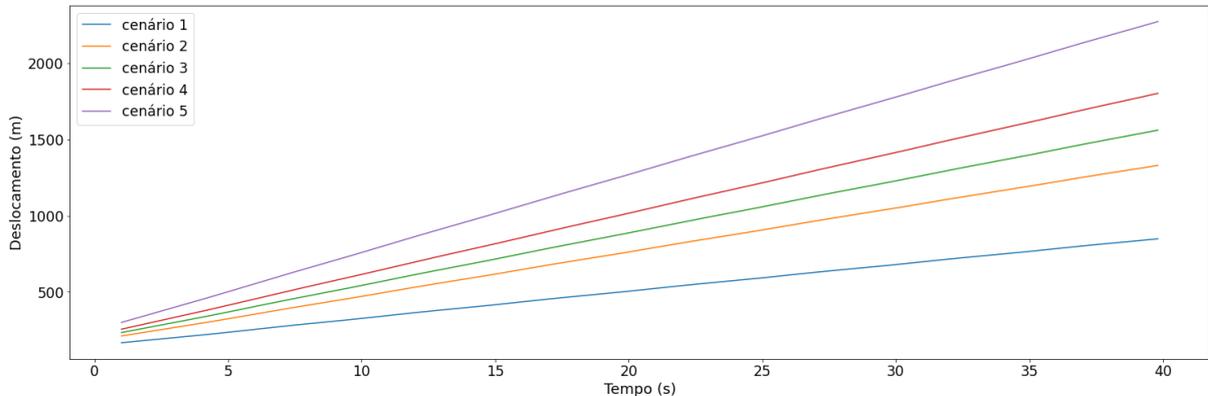
Parâmetros	cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5
Velocidade (m/s)	16.66	27.78	33.33	38.89	50.00

Fonte: O Autor (2022)

O deslocamento total de cada veículo líder na simulação é visto na Figura 47. Visto que deslocamento é uma relação entre velocidade e tempo. É intuitivamente esperado, velocidades diferentes resultam em um deslocamento total diferente. Desta forma, só é possível comparar

o desempenho de dois *platoon* com velocidades diferentes quando utilizadas métricas adimensionais.

Figura 47 – Deslocamento do *platoon* ao longo de uma rodovia



Fonte: O Autor (2022)

Apesar das diferentes inclinações cada função de primeiro grau no gráfico, não é possível observar graficamente oscilações. Indicando que as ações do Líder de frenagem seguidas de uma nova aceleração não impactam diretamente a velocidade média do veículo durante o trajeto.

O objetivo de cada líder é oscilar sua velocidade média com uma amplitude de 25 m/s (90 km/h) estabelecida pelo parâmetro de amplitude da senoidal (OA) para a simulação. As velocidades médias, máximas e mínimas de cada cenário são encontradas na Tabela 14 abaixo.

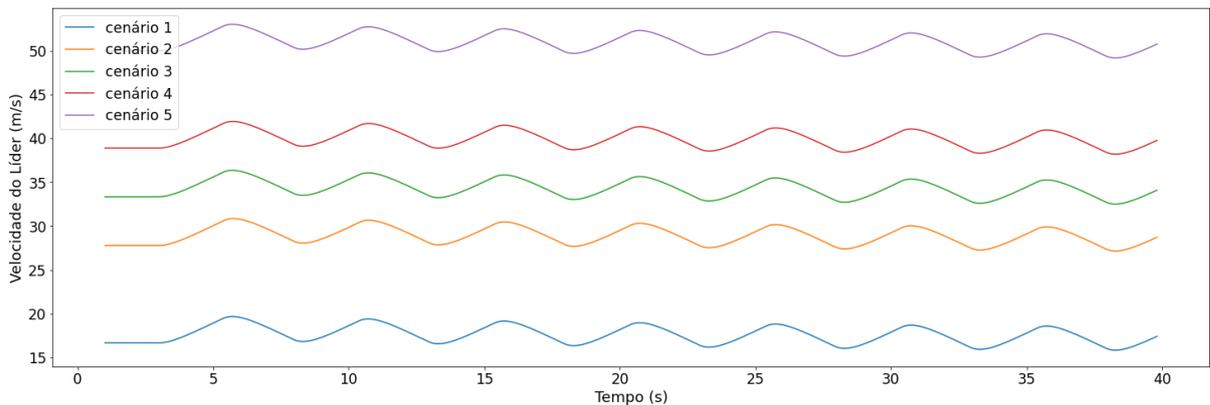
Tabela 14 – Velocidades médias, máximas e mínimas de cada cenário

Parâmetros	cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5
Velocidade média (m/s)	16.66	27.78	33.33	38.89	50.00
Velocidade máxima (m/s)	41.66	52.78	58.33	63.89	75.00
Velocidade mínima (m/s)	0.00	2.78	8.33	13.89	25.00

Fonte: O Autor (2022)

Entretanto, como já foi discutido anteriormente, o controlador local de cada veículo não consegue atingir essas velocidades durante o tempo estabelecido para uma ação de aceleração e desaceleração devido às limitações físicas do veículo. A Figura 48 abaixo representa a variação da velocidade média de cada veículo líder utilizado nesta análise.

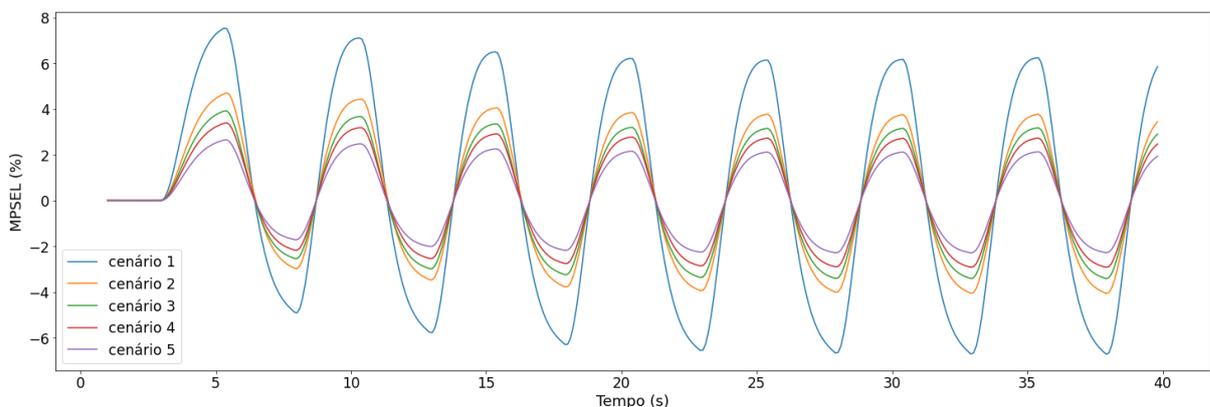
Figura 48 – Velocidade instantânea dos Líderes durante o trajeto



Fonte: O Autor (2022)

A Figura 49 representa o comportamento da métrica MPSEL durante o trajeto dos veículos. A partir da análise do gráfico é constatado que os *platoons* de velocidades mais baixas sofrem mais com a variação de velocidade do veículo líder. Uma explicação para este fato é que a aceleração utilizada pelos controladores locais do veículo líder em cada cenário não é a mesma. Em cenários de velocidades mais baixas, os veículos líderes necessitam de taxas de aceleração mais altas no mesmo período de tempo. Outro ponto a ser destacado é que a velocidade mínima esperada para o cenário 1 é de 0 (zero) metros por segundo, resultando que os veículos parassem de se mover. Entretanto, mais uma vez o controlador local é ineficaz para atingir esse objetivo durante o período de tempo de uma ação de desaceleração.

Figura 49 – Erro percentual médio de velocidade para o Líder

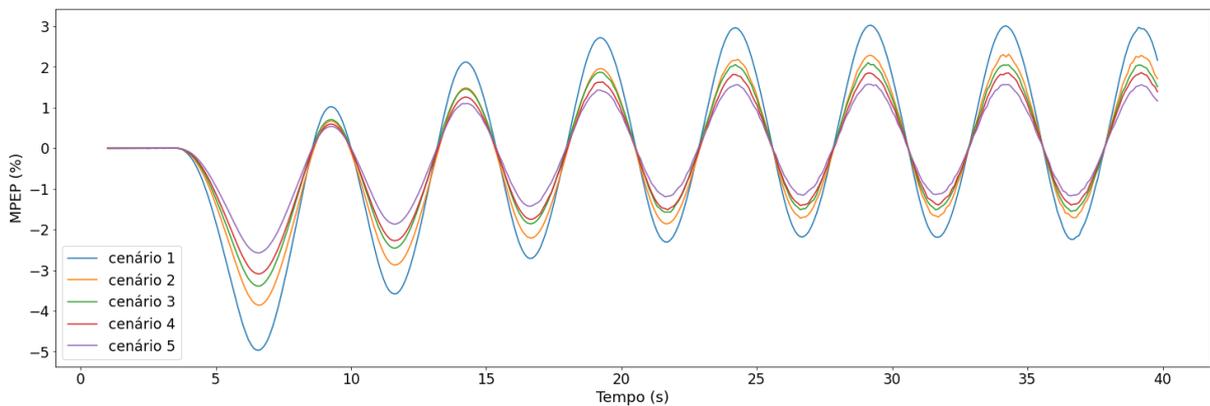


Fonte: O autor (2022)

A Figura 50 representa o comportamento da métrica MPEP durante o tempo de simulação. Durante o tempo inicial da simulação para todos os cenários, o MPEP médio foi negativo, indicando que a distância entre dois veículos adjacentes é inferior à esperada pela política de

espaçamento. O *platoon* durante este trecho da simulação trafega de uma forma não segura e, apesar de não ser ideal, aumenta a capacidade da rodovia. Os menores MPEP ocorrem em cenários de simulações de velocidades mais baixas no momento seguinte à troca de ação do líder. O veículo líder está desacelerando pela primeira vez, de forma rápida, enquanto os outros membros do *platoon* ainda não começaram seus processos de desaceleração. Consequentemente, este é o momento mais crítico da simulação.

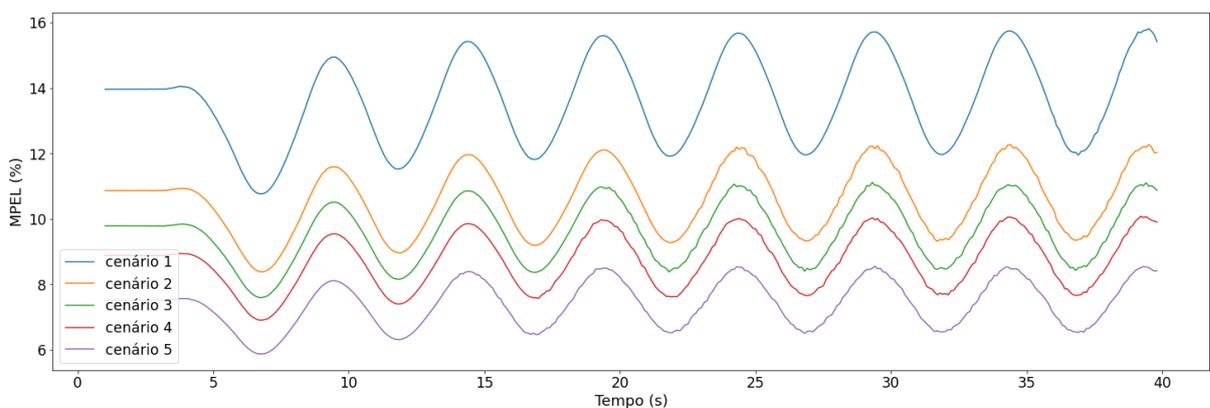
Figura 50 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Predecessor (MPEP)



Fonte: O autor (2022)

A métrica de desempenho que apresentou a maior diferença significativa entre os cenários foi a MPEL, Figura 51. Em todos os cenários simulados a MPEL média foi positiva. Entretanto, em comparação com cenários de alta velocidade, o cenário obteve o pior desempenho do grupo. Indicando que um *platoon* de velocidades baixas ocupa, percentualmente, um maior trecho de pista. Resultando em uma diminuição da capacidade de veículos de uma rodovia.

Figura 51 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Líder (MPEL)



Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 15 a seguir traz um comparativo dos cenários utilizados na análise de variação de velocidade média de condução de um *platoon*. Ambos os cenários 1 e 2 obtiveram um desempenho similar em relação ao MPEP, significando que em média todos os veículos das duas simulações trafegavam na rodovia com uma distância menor que a esperada pela política de espaçamento. Entretanto, o cenário 1 obteve um desempenho de 23% pior do que cenário 2 em relação à MPEL. Podendo assim ser considerado o pior dos cinco cenários testados. O melhor cenário para todas as métricas de avaliação de simulação foi o cenário 5, apesar de um MPEL positivo e um MPEP negativo.

A decisão sobre o *tradeoff* entre a distância segura e o aumento na capacidade de veículos em uma rodovia necessita ser regulamentada por agências reguladoras de trânsito antes de ser implementadas em cenários reais. Visto que cada *platoon* procura apenas obter a melhor resposta possível às condições de tráfego. De acordo com a Tabela 15, quanto mais rápido os veículos trafegarem, melhor é o desempenho do *platoon*.

Tabela 15 – Velocidades vs. desempenho do *platoon*

Métrica	cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5
Deslocamento (<i>m</i>)	847.93	1330.20	1561.29	1803.18	2247.66
Velocidade média do Líder (<i>m/s</i>)	17.58 ± 0.86	28.87 ± 0.86	34.25 ± 0.86	39.91 ± 0.86	50.92 ± 0.86
MPEP	-0.23 ± 1.66	-0.24 ± 1.28	-0.15 ± 1.14	-0.17 ± 1.03	-0.12 ± 0.86
MPEL	13.61 ± 1.14	10.58 ± 0.88	9.59 ± 0.79	8.70 ± 0.71	7.40 ± 0.60
MPSEP	0.09 ± 0.77	0.06 ± 0.47	0.04 ± 0.40	0.04 ± 0.34	0.03 ± 0.27
MPSEL	0.25 ± 4.01	0.18 ± 2.44	0.22 ± 2.15	0.11 ± 1.77	0.07 ± 1.38

Fonte: O Autor (2022)

5.2.3 Variação da taxa de perda de pacotes

A variação do parâmetro de perda de pacotes (FER) de uma simulação, implica que cada veículo tem uma probabilidade de receber o *beacon*. Até este momento, todos os cenários propostos nas análises anteriores apenas consideraram cenários de comunicação ideal. A análise dos resultados da variação deste parâmetro indica se o controlador consegue manter o espaçamento constante entre dois veículos apesar do número de *beacons* limitados.

A variação do parâmetro de cada uma das simulações comparadas nesta análise é encontrada na Tabela 16. Na análise da seção 5.3 será explicado o porquê da escolha desta faixa FER. Os demais parâmetros da simulação são os mesmos utilizados na análise da seção 5.1.

Tabela 16 – Variação da taxa de perda de pacotes

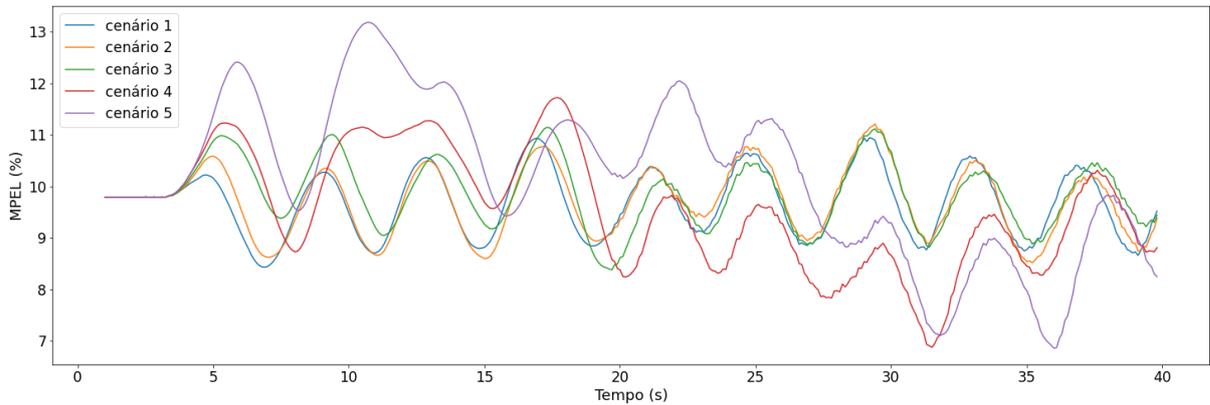
Parâmetros	cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5
Taxa de Perda de Pacotes (FER) (%)	75%	80%	85%	90%	95%

Fonte: O Autor (2022)

A alteração dos parâmetros de comunicação (FER) varia a qualidade da comunicação entre os veículos dentro de um *platoon*. Entretanto, não interfere na dinâmica veicular do líder, sendo assim, o deslocamento e a velocidade média do líder em todos os cenários foram iguais aos da análise da seção 5.1. Entretanto, a qualidade de comunicação tem um efeito direto nas outras métricas. Apesar de possuir outros sensores, o controlador local de cada veículo apenas utiliza informações provindas da comunicação em sua malha. Conseqüentemente, enquanto uma nova mensagem não chega, o controlador não muda seu padrão de direção. Em cenários com uma perda total de pacotes, não há mudança da velocidade dos membros do *platoon* independentemente da forma de condução do líder. Por esta razão, não vale a pena um estudo de comunicação veicular levar em consideração um cenário com esta configuração.

A Figura 52 representa o comportamento da métrica MPEL durante o trajeto dos veículos em um trajeto onde há falha na comunicação. A diferença de comportamento sob diferentes FER é visualmente clara. Logo na primeira ação de desaceleração, o cenário 5 tem um MPEL superior ao demais. Entretanto, esta diferença fica ainda mais evidente na segunda troca de ação. Os veículos são incapazes de receber a informação de troca de aceleração do veículo líder e não realizam a desaceleração, pulando completamente uma etapa da simulação, em menor evidência, porém o mesmo ocorre com cenário 4. Apenas perto do fim da simulação é possível notar uma diminuição inconstante na MPEL.

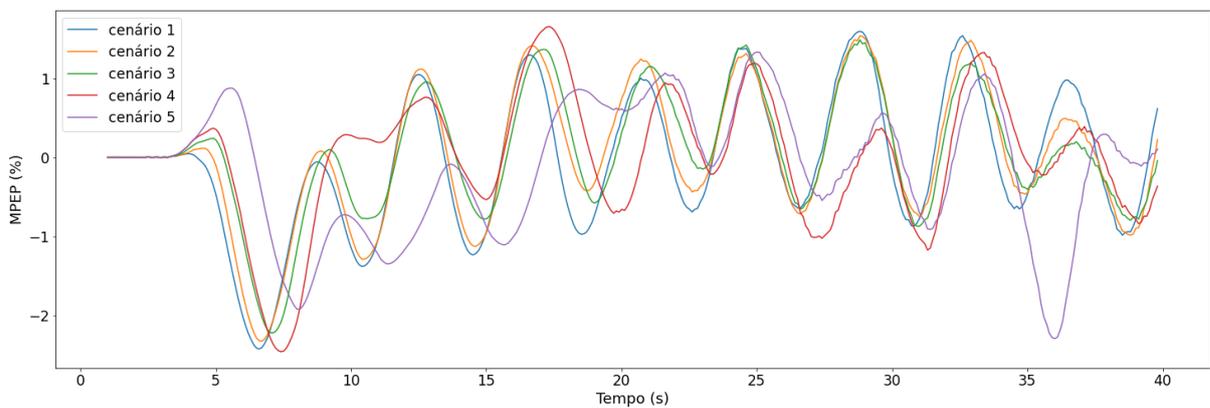
Figura 52 – Erro percentual médio de velocidade para o Líder



Fonte: O autor (2022)

O gráfico da MPEP, Figura 53, apresenta um comportamento similar à métrica MPEL. A distância segura entre dois veículos depende diretamente da qualidade de comunicação entre eles. Sem as informações de mudança de estado, é impossível para um controlador ser eficaz e manter uma distância segura entre os veículos. Isso fica evidente ao observar a Figura 53 a seguir. Durante grande parte do trajeto, a MPEP é negativa, consequentemente, os veículos trafegam a uma distância menor que a estabelecida pela política de espaçamento.

Figura 53 – Erro percentual médio da distância inter-veicular para o Predecessor (MPEP)



Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 17a seguir traz um comparativo dos cenários utilizados na análise de falhas na comunicação de um *platoon*.

Tabela 17 – Comparativo dos cenários utilizados na análise de falhas na comunicação de um *platoon*

Métrica	cenário 1	cenário 2	cenário 3	cenário 4	cenário 5
Deslocamento (<i>m</i>)	1551.49	1551.49	1551.49	1551.49	1551.49
Velocidade média do Líder (<i>m/s</i>)	34.00 ± 0.66				
MPEP	-0.04 ± 0.7	0.03 ± 0.65	0.07 ± 0.59	0.01 ± 0.59	-0.13 ± 0.66
MPEL	9.67 ± 0.54	9.72 ± 0.54	9.86 ± 0.52	9.57 ± 0.91	10.18 ± 1.22
MPSEP	0.02 ± 0.41	0.02 ± 0.44	0.03 ± 0.46	0.04 ± 0.54	0.10 ± 0.53
MPSEL	0.02 ± 2.26	0.01 ± 2.32	0.03 ± 2.34	0.01 ± 2.35	-0.02 ± 2.28

Fonte: O Autor (2022)

5.3 ANÁLISE DE IFT

Nas seções 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 é demonstrado como a variação de alguns parâmetros afeta o desempenho de um *platoon* sob uma mesma IFT. Nesta próxima análise, sete IFT foram analisadas para avaliar o comportamento sob diferentes configurações. Os resultados a seguir foram obtidos a partir da análise de mais de cem mil simulações com diferentes IFT de comunicação, taxas de perda de pacotes e dinâmicas longitudinais do veículo líder. As mesmas métricas utilizadas serão as mesmas utilizadas anteriormente para avaliar o desempenho do *platoon* sob uma IFT específica.

Ficou evidente a partir do estudo promovido pela seção 5.2.2 que o desempenho do *platoon* está intrinsecamente ligado à velocidade em que os veículos trafegam na rodovia. Desta forma, a fim de abranger um estudo mais aprofundado foram propostas 4 cenários, cada um com uma faixa de velocidade diferente.

A Tabela 18 exibe as faixas de velocidade adotadas para cada um dos cenários, assim como o número de simulações analisadas. Todas as análises consideraram um estudo da relação da distância segura, para o líder e para o Predecessor, pela qualidade da comunicação. Não foram considerados os cenários com FER de 100%, pois nestes cenários não existe comunicação veicular necessária para aplicações *platoon*.

Tabela 18 – Faixas de velocidade adotadas para cada um dos cenários

Cenário	Velocidades (km/h)
Baixa Velocidade	1, 2, 3, 4, 5 e 10
Média Velocidade	20, 40, 60 e 80
Elevada Velocidade	100,120 e 140
Ultra Elevada Velocidade	160, 180 e 200

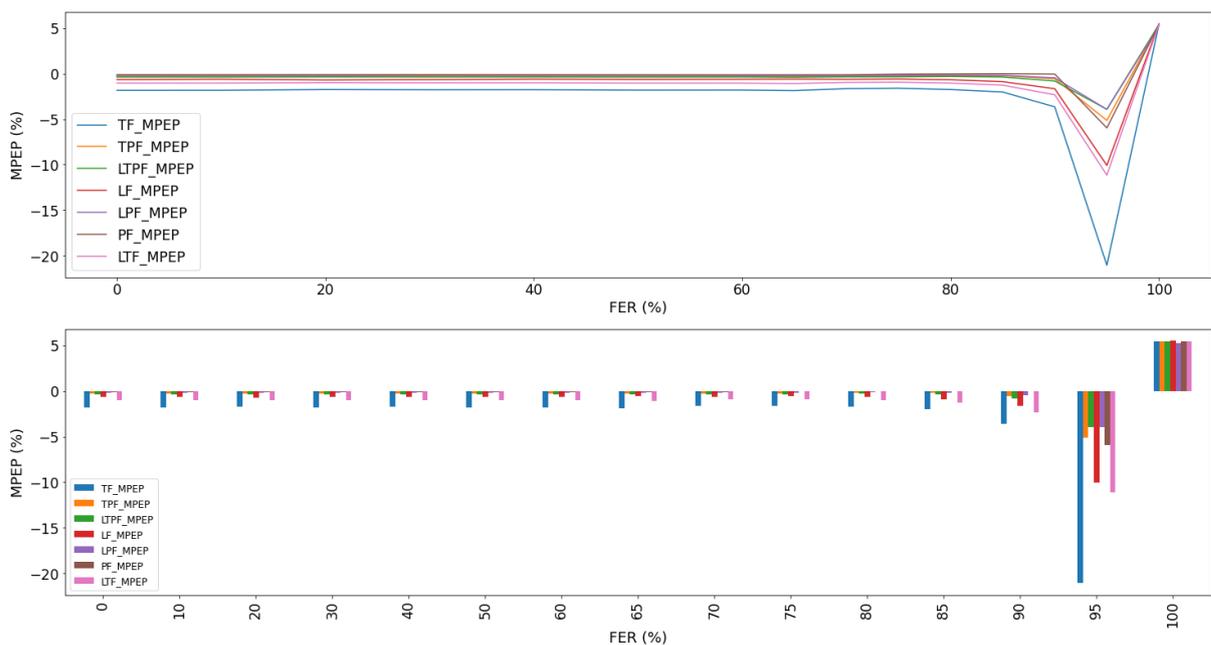
Fonte: O Autor (2022)

5.3.1 Baixa Velocidade

O primeiro cenário proposto considera velocidades que não são comumente encontradas em rodovias, apenas em cenários específicos de trânsito intenso como engarrafamentos. Entretanto, aplicações *platoon* não se limitam apenas a cenários de rodovia, apesar deste ser o foco deste trabalho. Um *platoon* de velocidades baixas pode ser muito útil para o deslocamento de veículos na garagem de uma indústria, por exemplo.

O gráfico da 54 representa o comportamento da métrica MPEP para taxas diferentes de FER para cada IFT analisada. A diferença de comportamento sob diferentes IFT não é visualmente clara para FER menor que 90%. Com a diminuição da qualidade da comunicação, é possível observar que a IFT TF tem o pior desempenho dentre todas as IFT.

Figura 54 – MPEP de Baixa Velocidade



Fonte: O Autor (2022)

Na TF, o veículo não recebe *beacons* do seu predecessor imediato, mas do veículo à frente deste. Consequentemente, com o aumento do número de mensagens não recebidas, o controlador é incapaz de manter uma distância segura para o Predecessor. Para uma FER de 95%, a TF apresenta um erro médio de 21% entre o espaçamento seguro definido pela política de espaçamento e distância real que os veículos trafegam na rodovia.

A Tabela 19 traz um comparativo da MPEP de cada IFT utilizada na análise de falhas na comunicação de um *platoon* para baixas velocidades. Todos os valores da tabela são negativos, consequentemente, todas as IFT apresentam um comportamento parecido em que a distância média entre os veículos do *platoon* é menor que definida pelo controlador independente da FER utilizada quando analisadas em baixas velocidades. Entretanto, para uma FER de 95%, duas IFT obtiveram um desempenho semelhante e melhor que as demais IFT, a LPF e a LTF. Ambas IFT apresentam comunicação direta com o líder, entretanto, não tem a mesma estrutura interna do *platoon*. Em uma IFT LTF, assim como em a TF, o veículo não recebe *beacons* do seu predecessor imediato, mas do veículo à frente deste. Consequentemente, a comunicação com o líder é capaz também de manter a estabilidade interna do *platoon* em velocidades baixas.

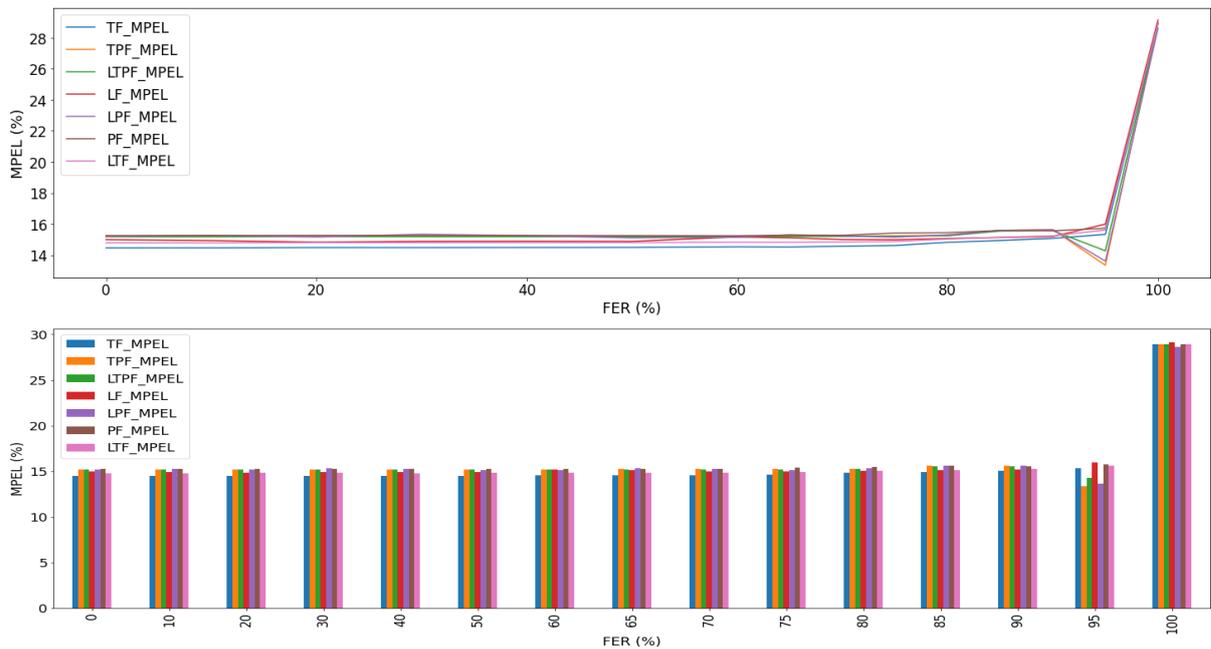
Tabela 19 – Comparativo da MPEP de cada IFT utilizada na análise de falhas na comunicação para baixas velocidades

FER (%)	TF (%)	TPF (%)	LTPF (%)	LF (%)	LPF (%)	PF (%)	LTF (%)
0	-1.83 ± 3.59	-0.29 ± 2.49	-0.37 ± 2.56	-0.65 ± 2.84	-0.20 ± 2.19	-0.11 ± 1.85	-1.04 ± 3.06
10	-1.82 ± 3.59	-0.29 ± 2.49	-0.37 ± 2.55	-0.61 ± 2.80	-0.20 ± 2.29	-0.11 ± 1.85	-1.03 ± 3.06
20	-1.74 ± 3.56	-0.28 ± 2.48	-0.36 ± 2.54	-0.69 ± 3.00	-0.21 ± 2.28	-0.11 ± 1.85	-0.99 ± 3.04
30	-1.77 ± 3.57	-0.28 ± 2.48	-0.37 ± 2.54	-0.66 ± 2.89	-0.17 ± 2.17	-0.11 ± 1.84	-1.00 ± 3.05
40	-1.76 ± 3.59	-0.28 ± 2.49	-0.37 ± 2.55	-0.60 ± 2.75	-0.19 ± 2.21	-0.11 ± 1.86	-1.01 ± 3.07
50	-1.81 ± 3.68	-0.29 ± 2.51	-0.37 ± 2.58	-0.63 ± 2.78	-0.20 ± 2.13	-0.12 ± 1.88	-1.04 ± 3.14
60	-1.80 ± 3.92	-0.29 ± 2.51	-0.37 ± 2.59	-0.61 ± 2.89	-0.21 ± 2.28	-0.12 ± 1.87	-1.04 ± 3.29
65	-1.86 ± 4.08	-0.31 ± 2.58	-0.39 ± 2.67	-0.60 ± 2.85	-0.23 ± 2.30	-0.12 ± 1.93	-1.08 ± 3.42
70	-1.65 ± 4.26	-0.27 ± 2.57	-0.35 ± 2.66	-0.62 ± 3.21	-0.21 ± 2.32	-0.12 ± 1.92	-0.96 ± 3.53
75	-1.60 ± 4.44	-0.26 ± 2.66	-0.34 ± 2.77	-0.59 ± 3.40	-0.19 ± 2.28	-0.05 ± 0.90	-0.93 ± 3.75
80	-1.74 ± 4.98	-0.23 ± 2.80	-0.31 ± 2.93	-0.67 ± 3.69	-0.15 ± 2.42	-0.03 ± 0.97	-1.04 ± 4.23
85	-2.01 ± 7.19	-0.23 ± 3.52	-0.37 ± 3.73	-0.88 ± 5.28	-0.18 ± 3.10	0.10 ± 1.38	-1.26 ± 5.94
90	-3.64 ± 11.30	-0.56 ± 5.02	-0.81 ± 5.42	-1.65 ± 7.93	-0.46 ± 4.52	-0.05 ± 1.85	-2.32 ± 9.15
95	-21.04 ± 42.15	-5.13 ± 14.27	-3.92 ± 12.02	-10.07 ± 23.43	-3.92 ± 11.76	-5.96 ± 14.31	-11.15 ± 25.25
100	5.39 ± 4.21	5.39 ± 4.21	5.39 ± 4.21	5.47 ± 4.14	5.26 ± 4.08	5.39 ± 4.21	5.39 ± 4.21

Fonte: O Autor (2022)

A Figura 55 representa o comportamento da métrica MPEL com taxas diferentes de FER para cada IFT analisada. Novamente, a diferença de comportamento sob diferentes IFT não é visualmente clara para FER menor que 90%. Para uma FER de 95%, a TPF apresenta o melhor desempenho dentre todas as IFT, enquanto a LTPF apresenta o pior desempenho da métrica com um erro de 15.99%.

Figura 55 – MPEL de Baixa Velocidade



Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 20 a seguir traz um comparativo da MPEL de cada IFT utilizada na análise de falhas na comunicação de um *platoon* para baixas velocidades. Todos os valores da tabela são positivos, conseqüentemente, todas as IFT apresentam um comportamento parecido em que distância média entre os veículos do *platoon* e líder é maior do que a definida pelo controlador independente da FER utilizada quando analisadas em baixas velocidades. Apesar de todas as IFT apresentarem um desempenho ruim, duas IFT obtiveram um desempenho semelhante e melhor que as demais IFT, a LPF e a LTF. Desta forma, ambas IFT apresentam os melhores desempenhos nas métricas MPEL e MPEP para velocidades baixas.

Tabela 20 – MPEL de Baixa Velocidade por IFT

FER (%)	TF (%)	TPF (%)	LTPF (%)	LF (%)	LPF (%)	PF (%)	LTF (%)
0	14.45 ± 3.61	15.20 ± 3.07	15.17 ± 3.12	14.98 ± 3.39	15.19 ± 2.93	15.25 ± 2.75	14.78 ± 3.46
10	14.46 ± 3.6	15.2 ± 3.07	15.17 ± 3.12	14.93 ± 3.36	15.26 ± 3.05	15.25 ± 2.75	14.78 ± 3.46
20	14.48 ± 3.60	15.20 ± 3.06	15.18 ± 3.11	14.82 ± 3.38	15.16 ± 2.95	15.26 ± 2.75	14.8 ± 3.46
30	14.47 ± 3.59	15.20 ± 3.06	15.18 ± 3.11	14.88 ± 3.33	15.33 ± 3.02	15.25 ± 2.75	14.79 ± 3.45
40	14.48 ± 3.59	15.20 ± 3.06	15.17 ± 3.11	14.89 ± 3.28	15.24 ± 2.97	15.25 ± 2.76	14.79 ± 3.45
50	14.48 ± 3.60	15.20 ± 3.06	15.17 ± 3.12	14.88 ± 3.35	15.1 ± 2.93	15.24 ± 2.77	14.80 ± 3.46
60	14.53 ± 3.56	15.19 ± 3.05	15.17 ± 3.10	15.16 ± 3.35	15.14 ± 2.94	15.24 ± 2.79	14.82 ± 3.43
65	14.51 ± 3.57	15.22 ± 3.07	15.19 ± 3.12	15.10 ± 3.30	15.30 ± 3.04	15.27 ± 2.82	14.81 ± 3.45
70	14.56 ± 3.57	15.22 ± 3.07	15.20 ± 3.12	14.99 ± 3.35	15.22 ± 2.98	15.27 ± 2.83	14.84 ± 3.45
75	14.61 ± 3.58	15.23 ± 3.09	15.2 ± 3.14	14.98 ± 3.40	15.14 ± 2.97	15.4 ± 2.64	14.87 ± 3.46
80	14.81 ± 3.64	15.26 ± 3.14	15.24 ± 3.19	15.06 ± 3.28	15.29 ± 3.01	15.43 ± 2.68	15.02 ± 3.52
85	14.93 ± 3.81	15.57 ± 3.33	15.54 ± 3.37	15.12 ± 3.55	15.58 ± 3.21	15.57 ± 2.87	15.14 ± 3.69
90	15.06 ± 4.45	15.63 ± 3.92	15.56 ± 3.95	15.18 ± 4.15	15.62 ± 3.79	15.55 ± 3.15	15.23 ± 4.32
95	15.33 ± 4.87	13.33 ± 8.67	14.27 ± 6.73	15.99 ± 4.74	13.6 ± 7.91	15.72 ± 4.16	15.61 ± 4.68
100	28.93 ± 11.19	28.93 ± 11.19	28.93 ± 11.19	29.14 ± 10.94	28.6 ± 11.02	28.93 ± 11.19	28.93 ± 11.19

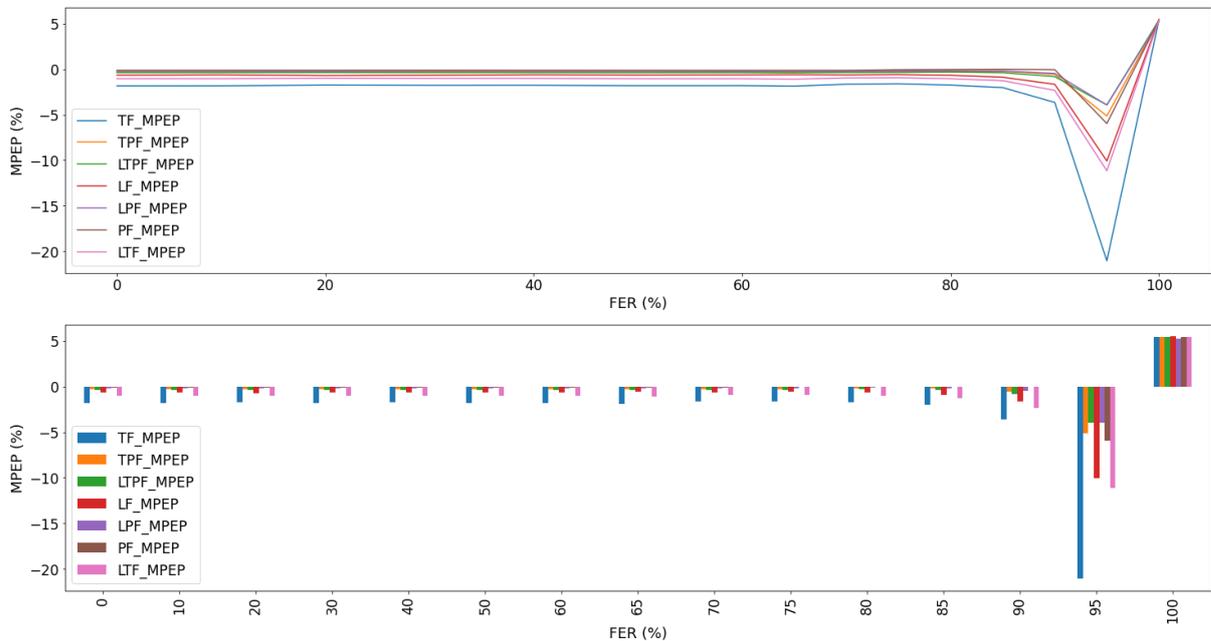
Fonte: O Autor (2022)

5.3.2 Média Velocidade

O segundo cenário proposto considera velocidades comumente utilizadas em rodovias de fluxo intenso ou em vias urbanas. Em um cenário urbano, aplicações *platoon* por si só não resolvem problemas de congestionamento, entretanto, a integralização com outras redes de comunicação, como a de infraestrutura, permite uma sincronização de ações de aceleração e

desaceleração como as investigadas neste trabalho. A Figura 56 representa o comportamento da métrica MPEP para taxas diferentes de FER para cada IFT analisada.

Figura 56 – MPEP de Média Velocidade



Fonte: O Autor (2022)

Enquanto, a Tabela 21 apresenta um comparativo da MPEP de cada IFT utilizada na análise de falhas na comunicação de um *platoon*. Novamente, todos os valores da tabela são negativos. Resultando em uma distância média entre os veículos menor que definida pelo controlador independente da FER utilizada. A TF apresenta o pior desempenho, com um erro médio de 19.22% para uma FER de 95%, enquanto três IFT obtiveram um desempenho semelhante e melhor que as demais IFT, a LPF, a LTF e a TPF. Diferentemente das outras duas IFT, na TPF os veículos não têm comunicação direta com o veículo líder. Nesta IFT, os veículos recebem mensagens dos dois veículos predecessores à frente.

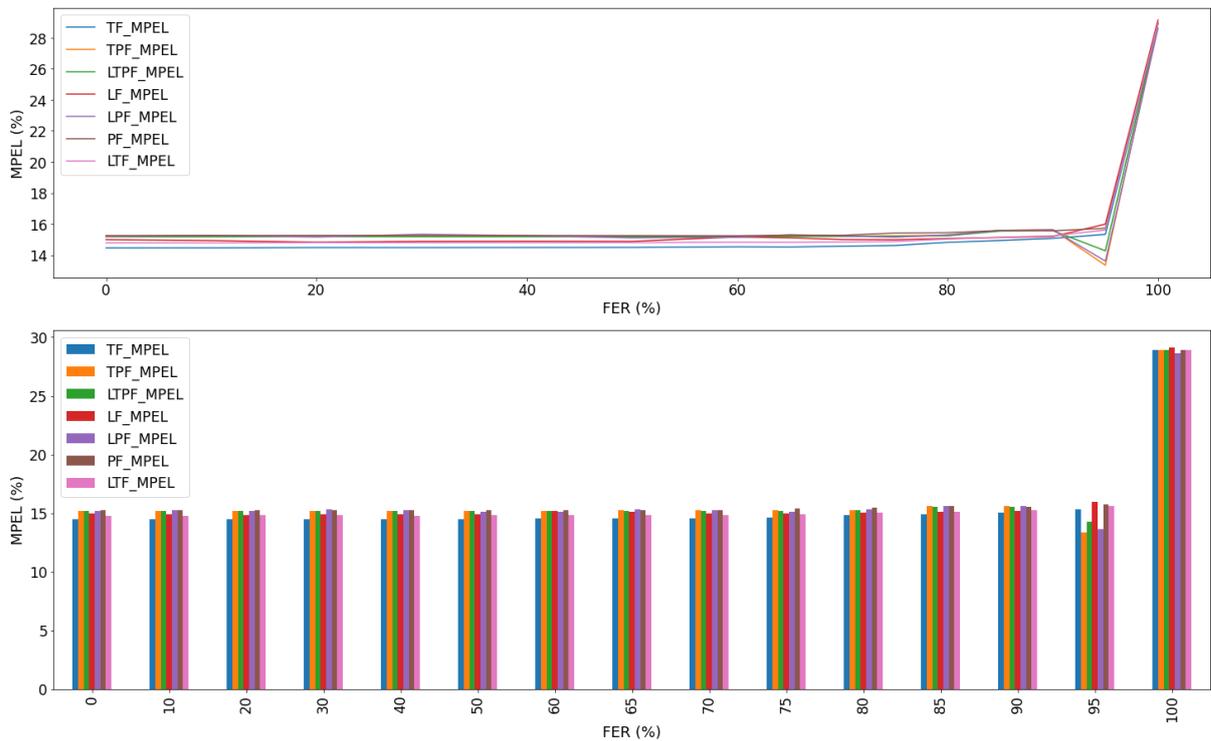
Tabela 21 – MPEP de Média Velocidade por IFT

FER (%)	TF (%)	TPF (%)	LTPF (%)	LF (%)	LPF (%)	PF (%)	LTF (%)
0	-1.95 ± 3.18	-0.34 ± 2.09	-0.43 ± 2.16	-0.70 ± 2.36	-0.22 ± 1.79	-0.12 ± 1.53	-1.14 ± 2.64
10	-1.94 ± 3.18	-0.34 ± 2.09	-0.43 ± 2.16	-0.72 ± 2.39	-0.23 ± 1.86	-0.12 ± 1.53	-1.14 ± 2.64
20	-1.87 ± 3.16	-0.33 ± 2.09	-0.42 ± 2.15	-0.68 ± 2.37	-0.25 ± 1.91	-0.12 ± 1.53	-1.10 ± 2.62
30	-1.89 ± 3.16	-0.33 ± 2.08	-0.43 ± 2.15	-0.69 ± 2.35	-0.22 ± 1.83	-0.12 ± 1.52	-1.11 ± 2.63
40	-1.88 ± 3.18	-0.33 ± 2.09	-0.43 ± 2.15	-0.69 ± 2.32	-0.24 ± 1.87	-0.12 ± 1.54	-1.11 ± 2.65
50	-1.92 ± 3.26	-0.33 ± 2.11	-0.43 ± 2.18	-0.70 ± 2.30	-0.24 ± 1.82	-0.13 ± 1.55	-1.13 ± 2.70
60	-1.89 ± 3.43	-0.32 ± 2.10	-0.42 ± 2.18	-0.66 ± 2.39	-0.23 ± 1.84	-0.13 ± 1.55	-1.12 ± 2.82
65	-1.92 ± 3.55	-0.33 ± 2.16	-0.43 ± 2.25	-0.67 ± 2.43	-0.26 ± 1.96	-0.12 ± 1.59	-1.15 ± 2.93
70	-1.72 ± 3.67	-0.30 ± 2.15	-0.39 ± 2.24	-0.65 ± 2.65	-0.23 ± 1.93	-0.12 ± 1.59	-1.03 ± 3.00
75	-1.64 ± 3.80	-0.28 ± 2.23	-0.37 ± 2.33	-0.67 ± 2.90	-0.23 ± 1.99	-0.08 ± 1.09	-0.99 ± 3.17
80	-1.75 ± 4.26	-0.25 ± 2.34	-0.34 ± 2.46	-0.70 ± 3.15	-0.18 ± 2.06	-0.02 ± 0.79	-1.07 ± 3.58
85	-1.81 ± 5.98	-0.20 ± 2.96	-0.34 ± 3.14	-0.83 ± 4.49	-0.16 ± 2.61	-0.01 ± 1.12	-1.15 ± 4.95
90	-2.85 ± 9.04	-0.41 ± 4.20	-0.67 ± 4.59	-1.32 ± 6.57	-0.34 ± 3.74	-0.01 ± 1.49	-1.85 ± 7.46
95	-19.22 ± 35.59	-3.64 ± 11.94	-3.30 ± 11.04	-9.30 ± 22.02	-3.17 ± 10.53	-4.82 ± 12.27	-10.89 ± 24.79
100	5.41 ± 4.17	5.41 ± 4.17	5.41 ± 4.17	5.55 ± 4.13	5.23 ± 4.05	5.41 ± 4.17	5.41 ± 4.17

Fonte: O Autor (2022)

A Figura 57 representa o comportamento da métrica MPEL com taxas diferentes de FER para cada IFT analisada. Novamente, a diferença de comportamento sob diferentes IFT não é visualmente clara com a MPEL se mantendo dentro de uma faixa de 14.5% a 15.5% para todas as faixas de FER menores que 95%. Para uma FER de 95%, a LTPF apresenta o pior desempenho da métrica com um erro de 15.99%, enquanto a TPF apresenta o melhor desempenho dentre todas as IFT.

Figura 57 – MPEL de Média Velocidade



Fonte: O Autor (2022)

Enquanto, a Tabela 22 traz um comparativo da MPEL de cada IFT utilizada na análise de falhas na comunicação de um *platoon*. Apesar de todas as IFT apresentarem um desempenho ruim, todos os valores da tabela são positivos, duas IFT obtiveram um desempenho semelhante e melhor que as demais IFT, a LPF e a TPF. Desta forma, ambas IFT apresentam os melhores desempenhos nas métricas MPEL e MPEP para velocidades médias.

Tabela 22 – MPEL de Média Velocidade por IFT

FER (%)	TF (%)	TPF (%)	LTPF (%)	LF (%)	LPF (%)	PF (%)	LTF (%)
0	11.52 ± 2.77	12.36 ± 2.19	12.33 ± 2.24	12.09 ± 2.47	12.40 ± 2.05	12.43 ± 1.86	11.88 ± 2.58
10	11.53 ± 2.76	12.36 ± 2.19	12.33 ± 2.24	12.07 ± 2.48	12.44 ± 2.12	12.44 ± 1.86	11.88 ± 2.57
20	11.55 ± 2.76	12.37 ± 2.19	12.34 ± 2.23	12.03 ± 2.43	12.35 ± 2.09	12.44 ± 1.86	11.9 ± 2.57
30	11.55 ± 2.75	12.37 ± 2.18	12.34 ± 2.23	12.05 ± 2.42	12.48 ± 2.12	12.44 ± 1.86	11.89 ± 2.56
40	11.56 ± 2.74	12.36 ± 2.18	12.33 ± 2.23	12.04 ± 2.40	12.41 ± 2.09	12.44 ± 1.87	11.9 ± 2.56
50	11.56 ± 2.75	12.37 ± 2.18	12.33 ± 2.23	12.02 ± 2.43	12.33 ± 2.07	12.43 ± 1.88	11.91 ± 2.57
60	11.62 ± 2.7	12.36 ± 2.16	12.34 ± 2.21	12.22 ± 2.41	12.34 ± 2.04	12.43 ± 1.89	11.94 ± 2.54
65	11.61 ± 2.71	12.39 ± 2.18	12.36 ± 2.23	12.22 ± 2.42	12.46 ± 2.13	12.46 ± 1.92	11.93 ± 2.55
70	11.67 ± 2.69	12.39 ± 2.17	12.37 ± 2.22	12.12 ± 2.45	12.42 ± 2.09	12.46 ± 1.92	11.96 ± 2.55
75	11.72 ± 2.70	12.41 ± 2.19	12.37 ± 2.24	12.12 ± 2.52	12.36 ± 2.09	12.69 ± 1.8	12.00 ± 2.56
80	11.90 ± 2.74	12.44 ± 2.23	12.41 ± 2.28	12.2 ± 2.45	12.47 ± 2.11	12.61 ± 1.78	12.14 ± 2.60
85	12.08 ± 2.89	12.75 ± 2.42	12.71 ± 2.45	12.33 ± 2.69	12.76 ± 2.31	12.74 ± 1.97	12.30 ± 2.76
90	12.25 ± 3.47	12.90 ± 2.96	12.81 ± 2.99	12.48 ± 3.19	12.84 ± 2.81	12.76 ± 2.22	12.44 ± 3.32
95	12.26 ± 5.36	11.40 ± 7.28	11.86 ± 6.18	12.74 ± 5.08	11.42 ± 6.71	12.99 ± 3.33	12.52 ± 5.12
100	26.57 ± 11.43	26.57 ± 11.43	26.57 ± 11.43	26.94 ± 11.34	26.06 ± 11.11	26.57 ± 11.43	26.57 ± 11.43

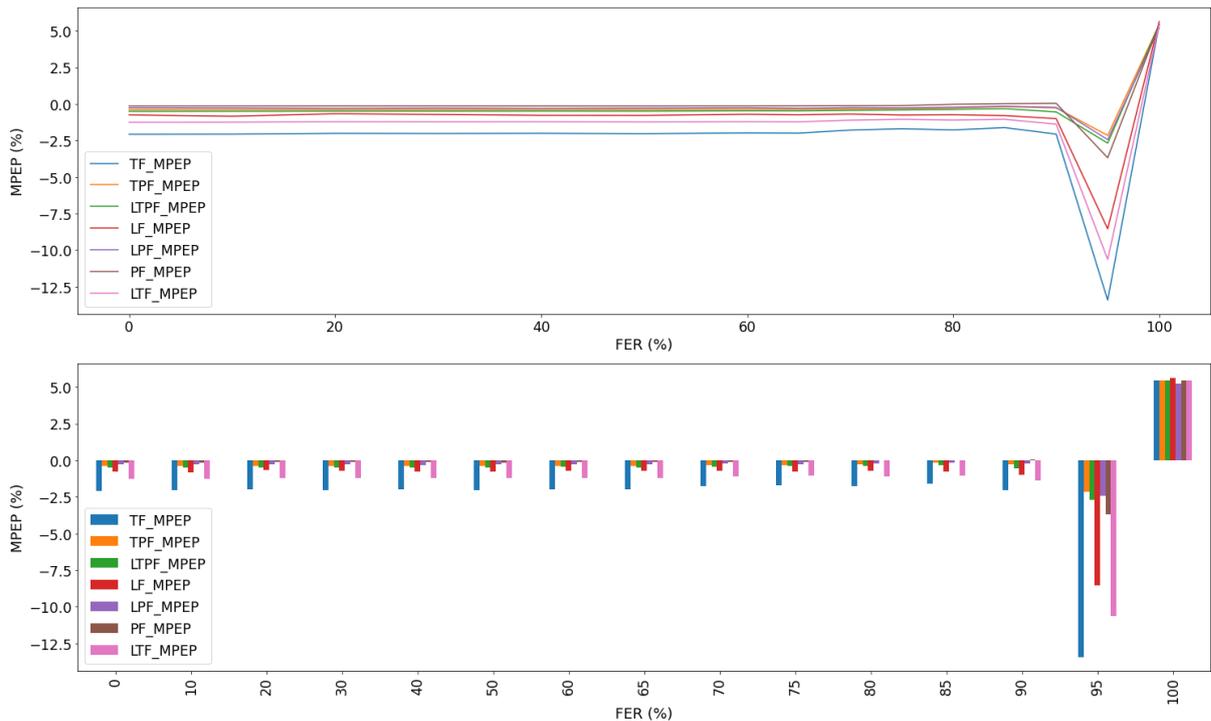
Fonte: O Autor (2022)

5.3.3 Elevada Velocidade

O terceiro cenário proposto considera velocidades comumente encontradas em rodovias. Apesar de considerar velocidades acima do limite de velocidade estabelecido pelo Código de Trânsito Brasileiro (CTB, 2009) para rodovias, estas velocidades são, muitas vezes, necessárias durante as ultrapassagens.

O gráfico da figura 58 representa o comportamento da métrica MPEP para taxas diferentes de FER para cada IFT analisada. Diferente do que aconteceu com os cenários de Baixa e Média Velocidades, é visível a diferença entre as IFT. Por exemplo, a TF teve o pior desempenho para todos os valores de FER, enquanto a LTF obteve o segundo pior desempenho.

Figura 58 – MPEP de Elevada Velocidade



Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 23 apresenta um comparativo da MPEP de cada IFT utilizada na análise de falhas na comunicação de um *platoon*. Todas as IFT apresentam um comportamento parecido em que a distância média entre os veículos do *platoon* é menor que definida pelo controlador. Entretanto, para a PF apresenta um um comportamento diferente para as FER de 80% e 90%, obtendo valores positivos para MPEP. Este resultado significa que a distância entre os veículos é superior à definida pela política de espaçamento. Por esta razão é possível afirmar que esta IFT apresentou o melhor desempenho de segurança que as outras IFT. Para uma FER de 95%, a TF apresenta o pior desempenho com um erro médio de 13.41%, enquanto a TPF apresenta o melhor desempenho, com um erro médio de 2.15%.

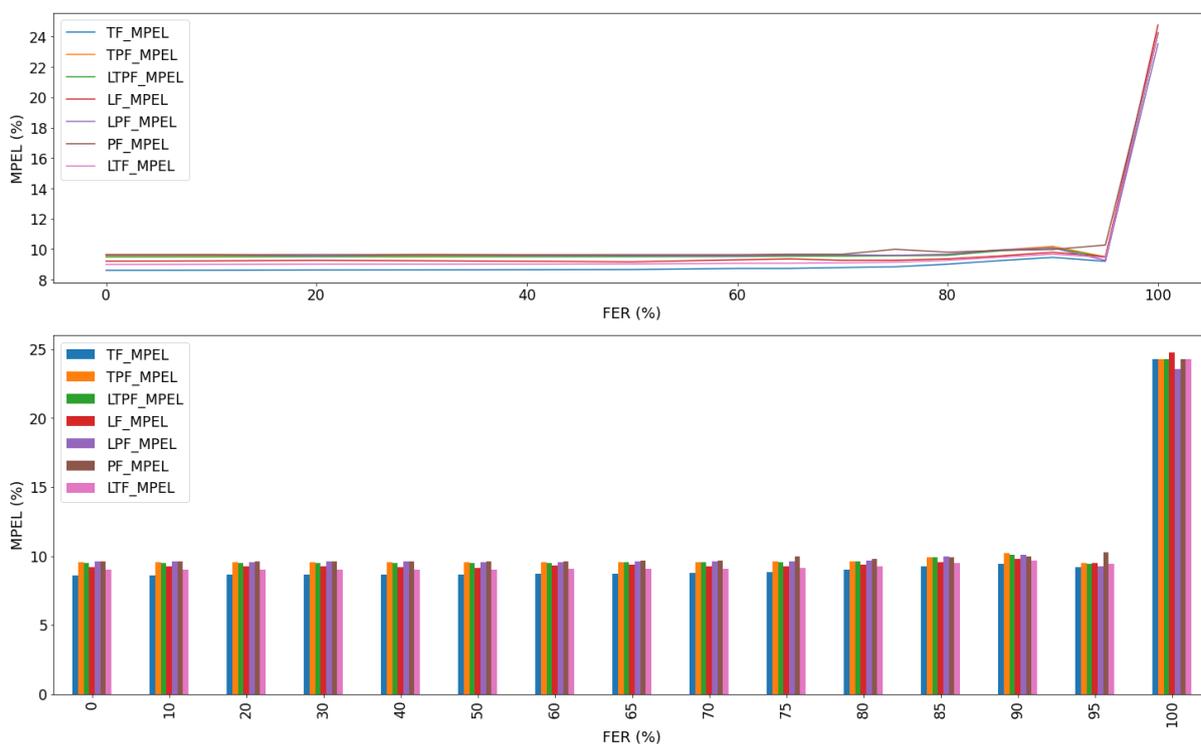
Tabela 23 – MPEP de Elevada Velocidade por IFT

FER (%)	TF (%)	TPF (%)	LTPF (%)	LF (%)	LPF (%)	PF (%)	LTF (%)
0	-2.07 ± 2.78	-0.39 ± 1.7	-0.50 ± 1.77	-0.75 ± 1.89	-0.25 ± 1.4	-0.14 ± 1.22	-1.25 ± 2.23
10	-2.06 ± 2.78	-0.39 ± 1.7	-0.50 ± 1.77	-0.84 ± 1.98	-0.27 ± 1.44	-0.14 ± 1.22	-1.25 ± 2.23
20	-2.01 ± 2.77	-0.38 ± 1.7	-0.49 ± 1.76	-0.67 ± 1.75	-0.30 ± 1.54	-0.14 ± 1.21	-1.21 ± 2.21
30	-2.01 ± 2.76	-0.38 ± 1.69	-0.49 ± 1.76	-0.72 ± 1.81	-0.28 ± 1.5	-0.14 ± 1.21	-1.22 ± 2.21
40	-2.00 ± 2.77	-0.38 ± 1.70	-0.49 ± 1.76	-0.78 ± 1.90	-0.30 ± 1.54	-0.14 ± 1.22	-1.21 ± 2.23
50	-2.03 ± 2.84	-0.38 ± 1.71	-0.49 ± 1.79	-0.78 ± 1.92	-0.28 ± 1.52	-0.14 ± 1.23	-1.23 ± 2.27
60	-1.98 ± 2.95	-0.36 ± 1.70	-0.47 ± 1.78	-0.71 ± 1.90	-0.26 ± 1.40	-0.14 ± 1.23	-1.21 ± 2.36
65	-1.99 ± 3.03	-0.36 ± 1.75	-0.47 ± 1.83	-0.74 ± 2.02	-0.29 ± 1.63	-0.13 ± 1.26	-1.22 ± 2.44
70	-1.79 ± 3.08	-0.33 ± 1.74	-0.43 ± 1.82	-0.69 ± 2.1	-0.25 ± 1.54	-0.12 ± 1.26	-1.11 ± 2.48
75	-1.69 ± 3.17	-0.31 ± 1.80	-0.41 ± 1.89	-0.76 ± 2.40	-0.27 ± 1.70	-0.11 ± 1.28	-1.05 ± 2.60
80	-1.77 ± 3.55	-0.27 ± 1.88	-0.37 ± 1.99	-0.74 ± 2.62	-0.22 ± 1.70	-0.02 ± 0.61	-1.10 ± 2.93
85	-1.62 ± 4.78	-0.18 ± 2.41	-0.32 ± 2.56	-0.79 ± 3.71	-0.15 ± 2.13	0.02 ± 0.87	-1.05 ± 3.96
90	-2.06 ± 6.78	-0.27 ± 3.38	-0.54 ± 3.76	-1.00 ± 5.21	-0.23 ± 2.96	0.04 ± 1.14	-1.38 ± 5.78
95	-13.41 ± 29.03	-2.15 ± 9.62	-2.68 ± 10.07	-8.54 ± 20.62	-2.43 ± 9.31	-3.68 ± 10.24	-10.63 ± 24.33
100	5.43 ± 4.14	5.43 ± 4.14	5.43 ± 4.14	5.63 ± 4.12	5.2 ± 4.03	5.43 ± 4.14	5.43 ± 4.14

Fonte: O Autor (2022)

A Figura 59 representa o comportamento da métrica MPEL com taxas diferentes de FER para cada IFT analisada. Gráficamente, todas as IFT apresentam um desempenho similar ruim, com apenas 1.05% de diferença entre o melhor e pior desempenho.

Figura 59 – MPEL de Elevada Velocidade



Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 24 traz um comparativo da MPEL de cada IFT utilizada na análise de falhas na comunicação de um *platoon*. Novamente, todos os valores da tabela são positivos, entretanto, houve uma diminuição na média dos valores quando comparados com os cenários de Baixas e Médias. Desta forma, é possível inferir que com o aumento da velocidade os veículos conseguem aproveitar melhor a rodovia e, conseqüentemente, aumentar a capacidade da pista. A TF obteve o melhor desempenho dentre todas as IFT para todos os valores de FER.

Tabela 24 – MPEL de Elevada Velocidade por IFT

FER (%)	TF (%)	TPF (%)	LTPF (%)	LF (%)	LPF (%)	PF (%)	LTF (%)
0	8.60 ± 1.93	9.53 ± 1.32	9.49 ± 1.37	9.20 ± 1.55	9.62 ± 1.17	9.62 ± 0.98	8.98 ± 1.70
10	8.61 ± 1.92	9.53 ± 1.32	9.49 ± 1.36	9.22 ± 1.60	9.62 ± 1.19	9.63 ± 0.98	8.99 ± 1.69
20	8.62 ± 1.92	9.54 ± 1.32	9.50 ± 1.36	9.25 ± 1.48	9.55 ± 1.23	9.63 ± 0.98	9.00 ± 1.69
30	8.63 ± 1.91	9.54 ± 1.31	9.50 ± 1.36	9.23 ± 1.52	9.63 ± 1.22	9.63 ± 0.98	9.00 ± 1.68
40	8.64 ± 1.90	9.53 ± 1.31	9.49 ± 1.35	9.19 ± 1.53	9.59 ± 1.22	9.63 ± 0.98	9.01 ± 1.68
50	8.65 ± 1.90	9.54 ± 1.30	9.50 ± 1.35	9.16 ± 1.51	9.57 ± 1.21	9.63 ± 0.99	9.02 ± 1.68
60	8.72 ± 1.84	9.54 ± 1.28	9.51 ± 1.33	9.29 ± 1.48	9.55 ± 1.15	9.63 ± 0.99	9.06 ± 1.65
65	8.72 ± 1.85	9.57 ± 1.29	9.53 ± 1.34	9.35 ± 1.54	9.62 ± 1.22	9.66 ± 1.02	9.06 ± 1.66
70	8.78 ± 1.82	9.57 ± 1.28	9.54 ± 1.33	9.26 ± 1.55	9.63 ± 1.20	9.65 ± 1.02	9.09 ± 1.65
75	8.83 ± 1.82	9.59 ± 1.29	9.55 ± 1.34	9.26 ± 1.65	9.58 ± 1.22	9.98 ± 0.97	9.13 ± 1.66
80	9.00 ± 1.84	9.62 ± 1.32	9.59 ± 1.37	9.35 ± 1.63	9.66 ± 1.22	9.79 ± 0.88	9.26 ± 1.69
85	9.24 ± 1.98	9.93 ± 1.51	9.88 ± 1.54	9.54 ± 1.84	9.94 ± 1.42	9.91 ± 1.07	9.46 ± 1.84
90	9.45 ± 2.49	10.18 ± 2.01	10.07 ± 2.04	9.78 ± 2.24	10.07 ± 1.84	9.97 ± 1.29	9.66 ± 2.32
95	9.19 ± 5.86	9.48 ± 5.9	9.45 ± 5.63	9.5 ± 5.42	9.25 ± 5.52	10.26 ± 2.51	9.44 ± 5.56
100	24.22 ± 11.67	24.22 ± 11.67	24.22 ± 11.67	24.75 ± 11.75	23.52 ± 11.2	24.22 ± 11.67	24.22 ± 11.67

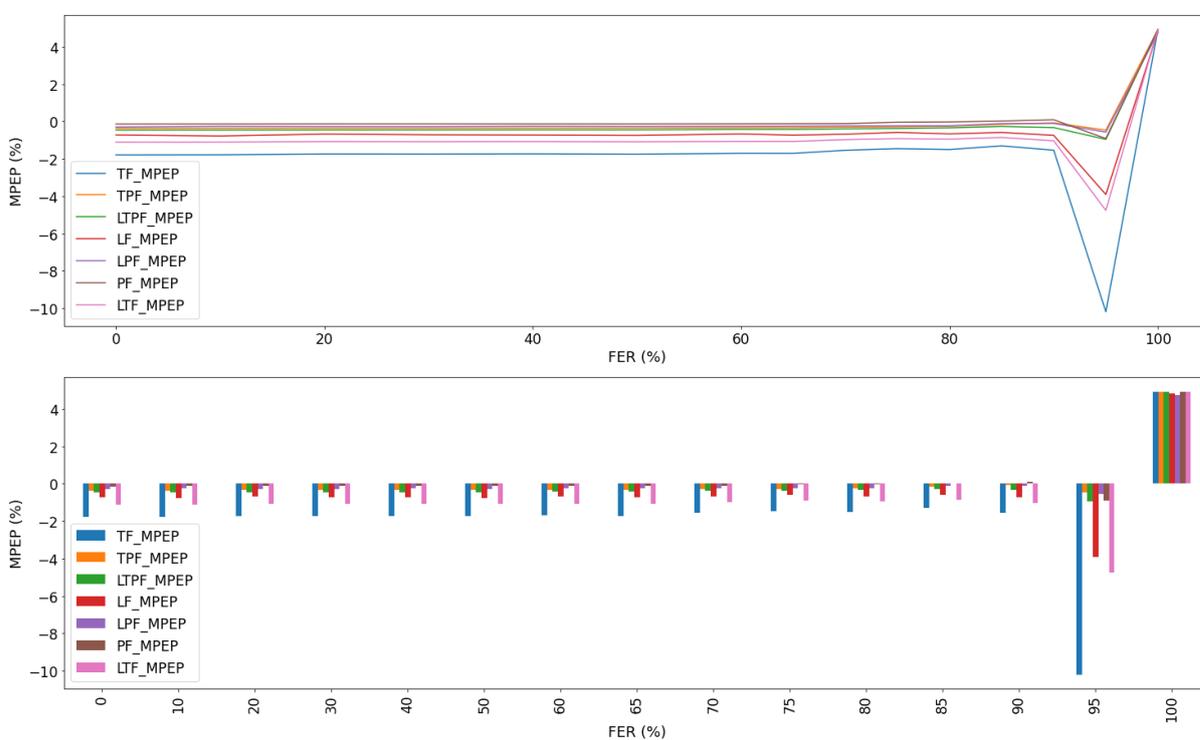
Fonte: O Autor (2022)

5.3.4 Ultra Elevada Velocidade

A condução em velocidades muito elevadas é completamente desencorajada e punida de acordo com as leis do CTB. Os seres humanos têm um limite no tempo de reação apesar de estarem completamente focados em uma tarefa. Assim, trafegar em uma rodovia com velocidade muito acima da permitida é extremamente perigoso. Entretanto, um *platoon* de

CAV permite que a velocidade média nas estradas seja elevada sem aumentar o risco de colisão. O quarto cenário proposto considera apenas velocidades “ultra” elevadas. A figura 60 representa o comportamento da métrica MPEP para taxas diferentes de FER para cada IFT analisada. Novamente, a diferença no gráfico do comportamento das IFT é notória. Por exemplo, mais uma vez a TF obteve o pior desempenho para todos os valores de FER, enquanto a LTF obteve o segundo pior desempenho. Essas duas IFT não conseguem ter o mesmo desempenho em relação a segurança que as demais IFT para velocidades elevadas.

Figura 60 – MPEP de Ultra Elevada Velocidade



Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 25 apresenta um comparativo da MPEP de cada IFT utilizada na análise de falhas na comunicação de um *platoon*. Todas as IFT apresentam um comportamento parecido em que a distância média entre os veículos do *platoon* é menor que definida pelo controlador. Igualmente como ocorreu para o cenário de Elevadas Velocidades, a PF apresenta um comportamento diferente para as FER de 80% e 90%, obtendo valores positivos para MPEP. Para uma FER de 95%, a TF apresenta o pior desempenho com um erro médio de 10.19%, enquanto a TPF apresenta o melhor desempenho, com um erro médio de 0.45%.

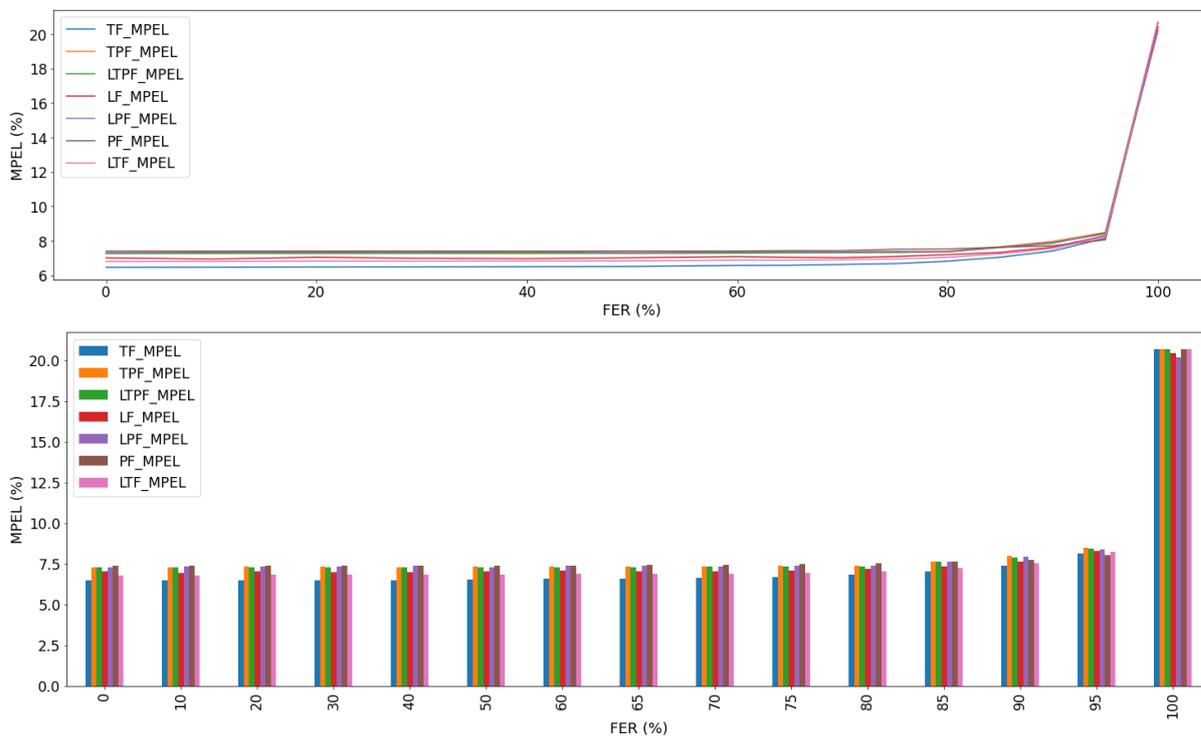
Tabela 25 – MPEP de Ultra Elevada Velocidade por IFT

FER (%)	TF (%)	TPF (%)	LTPF (%)	LF (%)	LPF (%)	PF (%)	LTF (%)
0	-1.78 ± 0.00	-0.35 ± 0.00	-0.45 ± 0.00	-0.72 ± 0.00	-0.29 ± 0.00	-0.13 ± 0.00	-1.10 ± 0.00
10	-1.78 ± 0.00	-0.35 ± 0.00	-0.45 ± 0.00	-0.77 ± 0.00	-0.26 ± 0.00	-0.13 ± 0.00	-1.10 ± 0.00
20	-1.74 ± 0.00	-0.35 ± 0.00	-0.44 ± 0.00	-0.67 ± 0.00	-0.27 ± 0.00	-0.12 ± 0.00	-1.07 ± 0.00
30	-1.74 ± 0.00	-0.35 ± 0.00	-0.44 ± 0.00	-0.71 ± 0.00	-0.27 ± 0.00	-0.12 ± 0.00	-1.07 ± 0.00
40	-1.73 ± 0.00	-0.34 ± 0.00	-0.44 ± 0.00	-0.72 ± 0.00	-0.25 ± 0.00	-0.12 ± 0.00	-1.07 ± 0.00
50	-1.75 ± 0.00	-0.34 ± 0.00	-0.44 ± 0.00	-0.74 ± 0.00	-0.26 ± 0.00	-0.12 ± 0.00	-1.08 ± 0.00
60	-1.70 ± 0.00	-0.32 ± 0.00	-0.42 ± 0.00	-0.66 ± 0.00	-0.25 ± 0.00	-0.12 ± 0.00	-1.06 ± 0.00
65	-1.70 ± 0.00	-0.32 ± 0.00	-0.42 ± 0.00	-0.73 ± 0.00	-0.25 ± 0.00	-0.11 ± 0.00	-1.06 ± 0.00
70	-1.54 ± 0.00	-0.3 ± 0.00	-0.39 ± 0.00	-0.67 ± 0.00	-0.23 ± 0.00	-0.11 ± 0.00	-0.97 ± 0.00
75	-1.45 ± 0.00	-0.28 ± 0.00	-0.37 ± 0.00	-0.58 ± 0.00	-0.23 ± 0.00	-0.04 ± 0.00	-0.91 ± 0.00
80	-1.5 ± 0.00	-0.25 ± 0.00	-0.33 ± 0.00	-0.66 ± 0.00	-0.22 ± 0.00	-0.02 ± 0.00	-0.94 ± 0.00
85	-1.3 ± 0.00	-0.15 ± 0.00	-0.26 ± 0.00	-0.58 ± 0.00	-0.11 ± 0.00	0.02 ± 0.00	-0.85 ± 0.00
90	-1.53 ± 0.00	-0.07 ± 0.00	-0.32 ± 0.00	-0.74 ± 0.00	-0.10 ± 0.00	0.09 ± 0.00	-1.03 ± 0.00
95	-10.19 ± 0.00	-0.45 ± 0.00	-0.95 ± 0.00	-3.90 ± 0.00	-0.56 ± 0.00	-0.91 ± 0.00	-4.76 ± 0.00
100	4.93 ± 0.00	4.93 ± 0.00	4.93 ± 0.00	4.84 ± 0.00	4.75 ± 0.00	4.93 ± 0.00	4.93 ± 0.00

Fonte: O Autor (2022)

A Figura 61 representa o comportamento da métrica MPEL com taxas diferentes de FER para cada IFT analisada. Assim como foi discutido para o cenário de Elevada Velocidade, novamente, houve uma redução na média dos valores quando comparados com os cenários de Baixa, Média e Elevada. Corroborando a hipótese que com o aumento da velocidade é possível aumentar a capacidade da pista. Duas IFT obtiveram um desempenho semelhante e melhor que as demais IFT.

Figura 61 – MPEL de Ultra Elevada Velocidade



Fonte: O Autor (2022)

A tabela 26 traz um comparativo da MPEL de cada IFT utilizada na análise de falhas na comunicação de um *platoon*. A TF obteve o melhor desempenho dentre todas as IFT para todos os valores de FER utilizando a métrica MPEL, e obteve o pior desempenho utilizando a métrica MPEP, o mesmo ocorreu para o cenário de Elevada Velocidade.

Tabela 26 – MPEL de Ultra Elevada Velocidade por IFT

FER (%)	TF (%)	TPF (%)	LTPF (%)	LF (%)	LPF (%)	PF (%)	LTF (%)
0	6.46 ± 0.00	7.30 ± 0.00	7.26 ± 0.00	7.01 ± 0.00	7.30 ± 0.00	7.39 ± 0.00	6.80 ± 0.00
10	6.47 ± 0.00	7.30 ± 0.00	7.26 ± 0.00	6.94 ± 0.00	7.34 ± 0.00	7.40 ± 0.00	6.80 ± 0.00
20	6.48 ± 0.00	7.31 ± 0.00	7.27 ± 0.00	7.05 ± 0.00	7.34 ± 0.00	7.40 ± 0.00	6.81 ± 0.00
30	6.49 ± 0.00	7.31 ± 0.00	7.27 ± 0.00	6.98 ± 0.00	7.33 ± 0.00	7.40 ± 0.00	6.82 ± 0.00
40	6.50 ± 0.00	7.30 ± 0.00	7.27 ± 0.00	6.96 ± 0.00	7.36 ± 0.00	7.40 ± 0.00	6.82 ± 0.00
50	6.51 ± 0.00	7.31 ± 0.00	7.27 ± 0.00	7.01 ± 0.00	7.30 ± 0.00	7.40 ± 0.00	6.83 ± 0.00
60	6.57 ± 0.00	7.32 ± 0.00	7.28 ± 0.00	7.08 ± 0.00	7.36 ± 0.00	7.40 ± 0.00	6.87 ± 0.00
65	6.57 ± 0.00	7.33 ± 0.00	7.30 ± 0.00	7.04 ± 0.00	7.37 ± 0.00	7.42 ± 0.00	6.87 ± 0.00
70	6.62 ± 0.00	7.34 ± 0.00	7.31 ± 0.00	7.02 ± 0.00	7.35 ± 0.00	7.42 ± 0.00	6.90 ± 0.00
75	6.67 ± 0.00	7.36 ± 0.00	7.32 ± 0.00	7.08 ± 0.00	7.38 ± 0.00	7.50 ± 0.00	6.94 ± 0.00
80	6.81 ± 0.00	7.38 ± 0.00	7.35 ± 0.00	7.19 ± 0.00	7.36 ± 0.00	7.52 ± 0.00	7.04 ± 0.00
85	7.04 ± 0.00	7.65 ± 0.00	7.61 ± 0.00	7.32 ± 0.00	7.62 ± 0.00	7.62 ± 0.00	7.24 ± 0.00
90	7.40 ± 0.00	7.96 ± 0.00	7.86 ± 0.00	7.63 ± 0.00	7.91 ± 0.00	7.71 ± 0.00	7.54 ± 0.00
95	8.15 ± 0.00	8.49 ± 0.00	8.45 ± 0.00	8.29 ± 0.00	8.39 ± 0.00	8.05 ± 0.00	8.24 ± 0.00
100	20.67 ± 0.00	20.67 ± 0.00	20.67 ± 0.00	20.40 ± 0.00	20.18 ± 0.00	20.67 ± 0.00	20.69 ± 0.00

Fonte: O Autor (2022)

5.3.5 MPEP

A Tabela 27 apresenta as IFT com o melhor desempenho utilizando a métrica de segurança MPEP. Apesar da alta taxa de FER, a PF apresentou o melhor desempenho geral. Uma explicação para isto é o fato que esta IFT apenas considera informações provenientes do veículo predecessor, desta forma, o principal objetivo do controlador é garantir a distância segura entre

veículos adjacentes. Nesta IFT, o veículo líder não envia mensagens para todos os veículos do *platoon*, apenas para o veículo seguidor imediato. Assim, a falta de mensagens de grupo para troca de velocidade enviadas pelo líder evita que o controlador tome qualquer decisão quando não recebe informações do Predecessor, permanecendo assim, com o velocidade constante em cenários de alto valor de FER.

Tabela 27 – MPEP - IFT melhor desempenho por FER

FER (%)	Baixa Velocidade	Média Velocidade	Elevada Velocidade	Ultra Elevada Velocidade
0	LF	PF	PF	PF
10	TPF	PF	PF	PF
20	LF	PF	PF	PF
30	LF	PF	PF	PF
40	LF	PF	PF	PF
50	TPF	PF	PF	PF
60	LF	PF	PF	PF
65	LF	PF	PF	PF
70	TPF	PF	PF	PF
75	PF	PF	PF	PF
80	TPF	PF	PF	PF
85	LF	LPF	PF	PF
90	LF	PF	PF	PF
95	LPF	PF	TPF	TPF
100	X	X	X	X

Fonte: O Autor (2022)

O pior desempenho dentre todos os cenários de velocidade foi da TF. Esta IFT não recebe informações do estado do veículo Predecessor, sendo apenas capaz de inferir sua posição através das informações enviadas por um veículo com 2 patentes de *platoon* acima. Em cenários de baixas velocidades, IFT com líder obtiveram um melhor desempenho.

5.3.6 MPEL

A Tabela 28 apresenta as IFT com o melhor desempenho utilizando a métrica de MPEL. A TF, que apresentou o pior desempenho utilizando a métrica MPEP, entretanto, obteve o melhor desempenho geral utilizando a métrica MPEL. A TF estima a posição do veículo Predecessor imediato utilizando apenas a política de espaçamento e a velocidade relativa para

o veículo com 2 patentes de *platoon* acima. Por esta razão o *platoon*, como um todo, trafega de forma mais compactada, pois todos os veículos utilizam informações virtuais e não reais para seus controladores. Diminuindo a necessidade de troca de velocidade até mesmo quando o veículo Predecessor está muito próximo.

Tabela 28 – MPEL - IFT melhor desempenho por FER

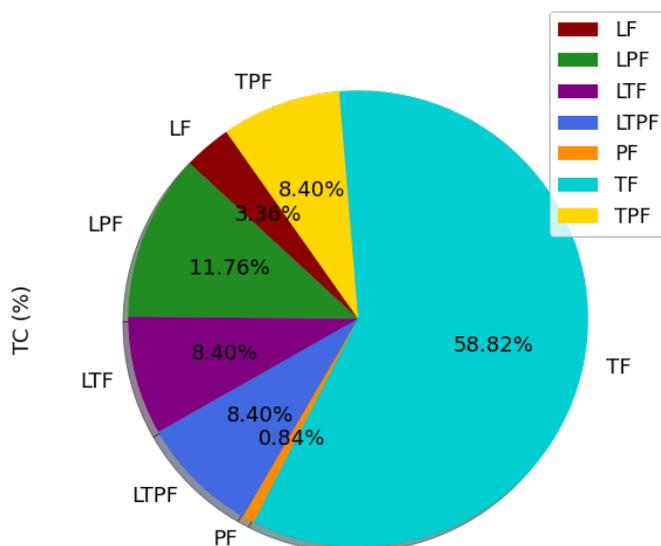
FER (%)	Baixa Velocidade	Média Velocidade	Elevada Velocidade	Ultra Elevada Velocidade
0	LF	TF	TF	TF
10	TPF	TF	TF	TF
20	LF	TF	TF	TF
30	LF	TF	TF	TF
40	LF	TF	TF	TF
50	TPF	TF	TF	TF
60	LF	TF	TF	TF
65	LF	TF	TF	TF
70	TPF	TF	TF	TF
75	PF	TF	TF	TF
80	LF	TF	TF	TF
85	LF	TF	LF	TF
90	LF	TF	TF	TF
95	LPF	TF	PF	PF
100	X	X	X	X

Fonte: O Autor (2022)

5.4 ESTUDO DAS COLISÕES POR IFT

A principal finalidade da aplicação de segurança veicular é evitar a ocorrência de acidentes. Por esta razão, foi realizada uma análise das simulações que resultaram em colisões. Dentre as mais de cem mil simulações, em apenas 119 houveram acidentes. Apesar de ser um número pequeno de simulações quando comparado com o número total de simulações, 119 é um número expressivo. Uma vez que é necessário uma falha durante vários segundos em controlador para dois veículos, com velocidades relativas baixas, colidam.

Figura 62 – Taxa de Colisões por IFT

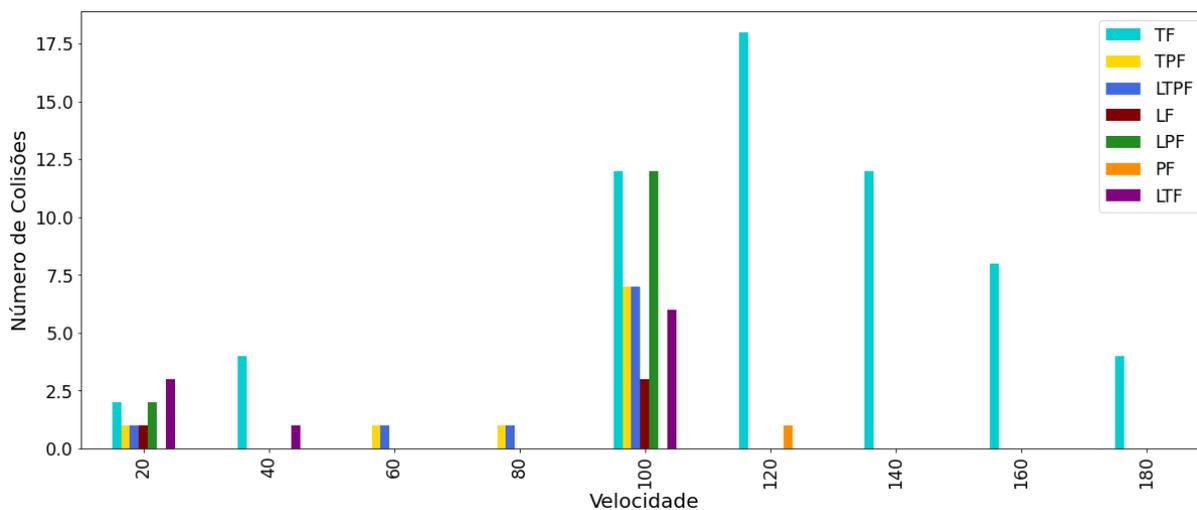


Fonte: O Autor (2022)

O gráfico de pizza, representado na Figura 62, informa a Taxa de Colisões (TC) por IFT. Todas as simulações que resultaram em colisão estavam configuradas com o parâmetro FER para 95%. No gráfico é possível observar que o maior percentual de acidentes ocorreu sob a TF. Este dado corrobora o resultado discutido na seção 5.3.5 que afirma que a TF não é segura quando avaliada pela métrica MPEP. A IFT PF apresentou apenas uma simulação em que ocorreu colisão. Mais uma vez corroborando o que foi afirmado na seção 5.3.5.

O gráfico de barras, representado na Figura 63, informa o NC por IFT por velocidade média do líder. Neste gráfico é possível observar que a TF não apenas foi a IFT com o maior número de colisões, porém a IFT com o maior número de colisões em velocidades diferentes. Nenhuma outra IFT apresentou colisões em velocidades superiores a 120km/h .

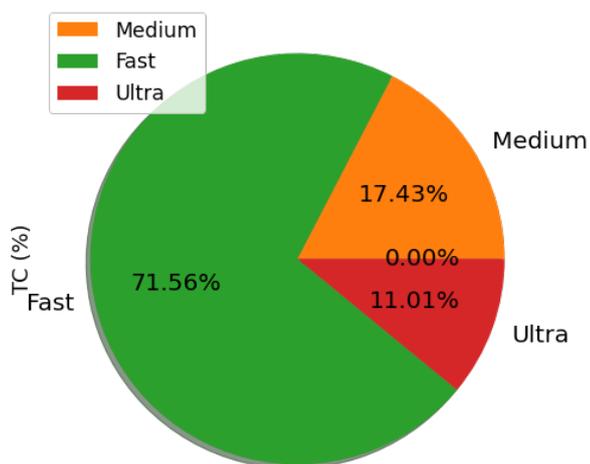
Figura 63 – NC por velocidade



Fonte: O Autor (2022)

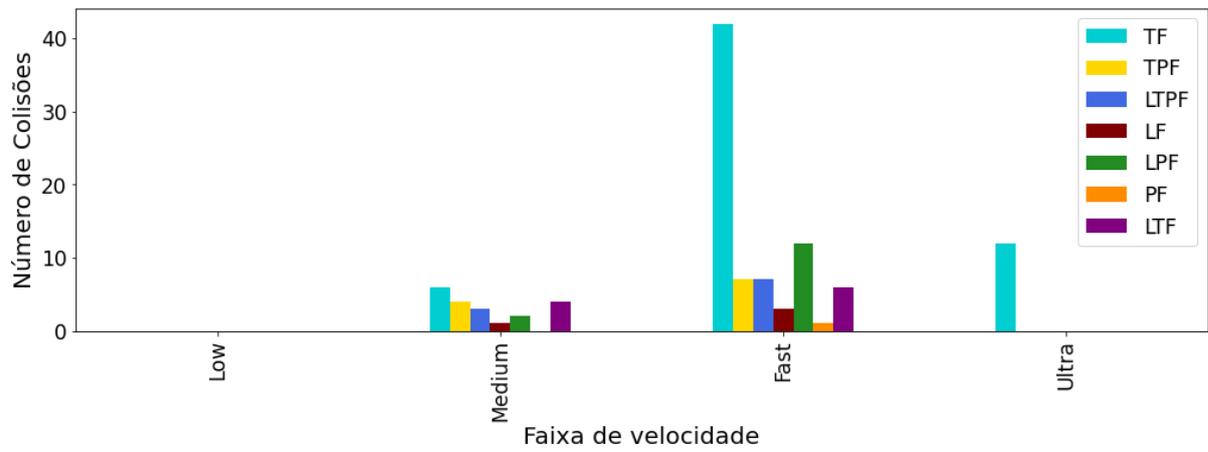
O gráfico de pizza, da Figura 64, informa a TC por faixa de velocidade independente da IFT utilizada. Neste gráfico é possível observar a predominância de colisões ocorrendo no cenário de Elevada Velocidade. Enquanto, gráfico de barras, da Figura 65, informa o NC por faixa de velocidade por IFT.

Figura 64 – Taxa de Colisões por faixa de velocidade



Fonte: O Autor (2022)

Figura 65 – NC por faixa de velocidade



Fonte: O Autor (2022)

6 CONCLUSÃO

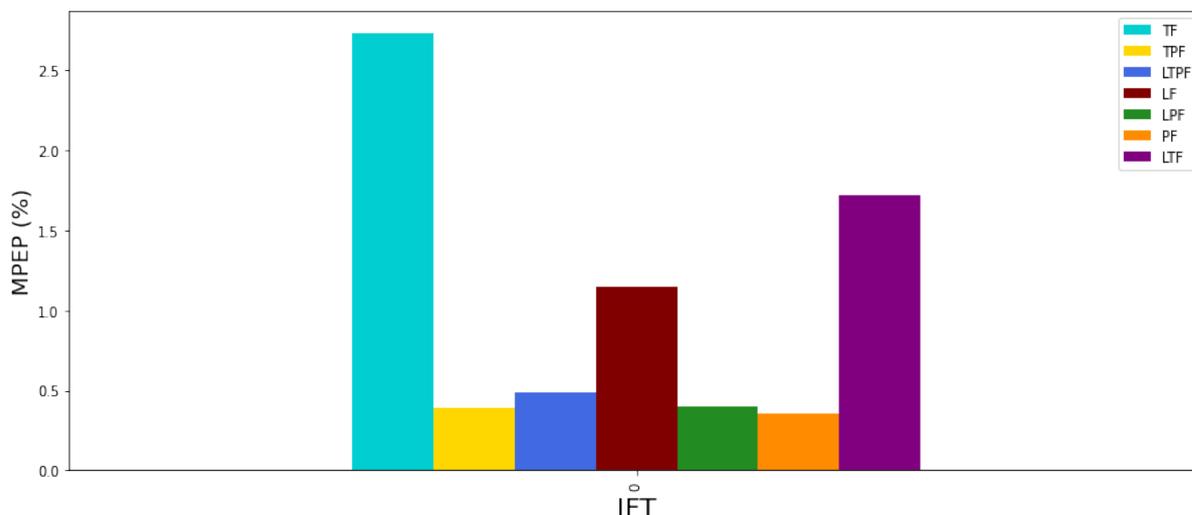
O agrupamento de CAV em um *platoon* tem como foco a otimização do uso de estradas e melhoria da segurança de todos os elementos envolvidos no tráfego. A sincronização dos movimentos dos veículos numa rodovia permite que uma menor distância seja mantida, reduzindo o arrasto aerodinâmico e aumentando a densidade de veículos na via. As falhas de comunicação V2V num *platoon* causam situações onde avisos não chegam a tempo ao destinatário levando instabilidade ao *platoon*. O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho global de um *platoon* sob diferentes estratégias de IFT quando expostas a cenários onde há substancial taxa de perda de pacotes.

Os resultados foram obtidos a partir da análise de mais de cem mil simulações, em que diferentes topologias de comunicação e taxas de perda de pacotes foram utilizadas. Além disso, a dinâmica de aceleração longitudinal do veículo líder foi modelada a partir de equação sinusoidal para a velocidade, forma que se aproxima do comportamento de um motorista humano. Nesse cenário, o veículo líder do *platoon*, acelera e desacelera, alterando sua velocidade de cruzeiro, diversas vezes em uma mesma simulação para verificar o espaçamento desejado e o erro de espaçamento entre veículos.

Com base na análise dos experimentos, observou-se que a velocidade do veículo líder influencia diretamente as métricas de ocupação da pista. Quanto mais rápido os veículos trafegarem, melhor é o desempenho do *platoon* em relação às métricas de ocupação da pista. Foi constatado também que apesar da qualidade da comunicação interferir na dinâmica interna do *platoon*, é possível manter o espaçamento seguro desejado para simulações configuradas com FER inferiores a 75%, independente da IFT analisada. Também foi constatado que apenas em simulações configuradas com uma FER de 95% resultaram em colisão.

Com base na análise de desempenho das IFT, a PF apresentou o melhor desempenho geral entre todas as IFT utilizando a métrica de distanciamento seguro entre os veículos, MPEP. A Figura 66 representa o MPEP médio dentre todas simulações. A PF obteve um erro médio de 0.36% para qualquer valor de FER e de 3.84% para cenários com 95% de falha na comunicação. Esta IFT apenas considera informações provenientes do veículo predecessor, desta forma, o objetivo do controlador local de cada veículo é garantir a distância segura para o veículo predecessor imediato.

Figura 66 – MPEP médio de todas simulações



Fonte: O Autor (2022)

A partir da análise de desempenho das IFT em relação a métrica de distanciamento para o líder, MPEL, foi constatado que a TF apresentou o melhor desempenho geral entre todas as IFT. A TF apresentou um erro médio de 11.25% para qualquer valor de FER e de 11.98% para cenários com 95% de falha na comunicação. Esta IFT estima a posição do veículo Predecessor imediato utilizando apenas a política de espaçamento e a velocidade relativa dos veículos. Por esta razão o *platoon*, como um todo, trafega de forma mais "compacta". Consequentemente, aumentando a capacidade de veículos em uma rodovia. Os veículos, sob esta IFT utilizam, informações virtuais e não reais em seus controladores. Assim, mesmo em situações em que o veículo Predecessor esteja a uma distância menor que a considerada segura, não há troca de velocidade.

Portanto, existe um *tradeoff* entre manter a distância segura entre os veículos de um *platoon* e o aumento na capacidade de veículos em uma rodovia. Visto que cada *platoon* procura apenas obter a melhor resposta possível às condições de tráfego.

7 TRABALHOS FUTUROS

Ainda há muitos desafios a serem enfrentados no desenvolvimento de tecnologias para direção cooperativa. Ainda que tenha sido realizada uma análise de mais de cem mil cenários diferentes, este número não é suficientemente grande para reproduzir todos os cenários possíveis do tráfego rodoviário. Neste trabalho, por exemplo, apenas platoons homogêneos foram utilizados. A análise de platoons heterogêneos traria uma maior robustez para esta dissertação, uma vez que seria necessário levar em consideração diversos outros aspectos que foram ignorados nesta dissertação, como o tempo de resposta individual do veículo, as diferenças na dinâmica de cada veículo, ou as diferenças na geometria física de cada veículo do *platoon*.

Com relação a comunicação V2V num *platoon*, o grande desafio está em como superar falhas de comunicação que causam instabilidade ao platoon. A fim de estender este trabalho, uma possibilidade seria trocar a estratégia de controle utilizada. Apesar da extensa gama de cenários simulados por este trabalho, apenas um controlador foi utilizado. A análise de outras estratégias de controle, como MPC e CACC, complementaria os resultados obtidos e traria uma maior robustez para análise. Uma possível extensão deste trabalho seria a alteração no código fonte do *framework* utilizado. Esta alteração permitiria que o controlador local de cada veículo utilizasse informações provenientes de sensores, a fim de diminuir a dependência da condução colaborativa com a comunicação. Outra possível extensão a este trabalho é um sistema adaptativo para IFT. Neste cenário, o controlador global teria um grau de liberdade para escolher a IFT de melhor desempenho para as configurações tráfego.

REFERÊNCIAS

- ABOLFAZLI, E.; BESSELINK, B.; CHARALAMBOUS, T. On time headway selection in platoons under the MPF topology in the presence of communication delays. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 23, n. 7, p. 8881–8894, jul. 2022.
- AL-JHAYYISH, A. M. H.; SCHMIDT, K. W. Feedforward strategies for cooperative adaptive cruise control in heterogeneous vehicle strings. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 19, n. 1, p. 113–122, jan. 2018.
- BOBAN, M.; KOUSARIDAS, A.; MANOLAKIS, K.; EICHINGER, J.; XU, W. Connected roads of the future: Use cases, requirements, and design considerations for vehicle-to-everything communications. *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 13, n. 3, p. 110–123, set. 2018.
- CHANG, K.; LI, W.; DEVLIN, P.; SHAIKHBAHAI, A.; VARAIYA, P.; HEDRICK, J.; MCMAHON, D.; NARENDHAN, V.; SWAROOP, D.; OLDS, J. Experimentation with a vehicle platoon control system. In: *Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1991*. [S.l.: s.n.], 1991. v. 2, p. 1117–1124.
- CHEHARDOLI, H.; GHASEMI, A. Adaptive centralized/decentralized control and identification of 1-D heterogeneous vehicular platoons based on constant time headway policy. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 19, n. 10, p. 3376–3386, out. 2018.
- CNT. *Painel Confederação Nacional do Transporte de Consultas Dinâmicas de Acidentes Rodoviários 2021*. 2021. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/painel-acidente>>. Acesso em: 12 abr. 2022.
- COELHO, F. J. S.; HUAMPO, E. G.; LACERDA, H. F.; FREITAS, A. D. M. D.; FILHO, A. G. da S. Multi-objective flower pollination algorithm applied to 5g vehicular networks communication. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 1, p. e33911125020–e33911125020, 2022.
- FANOODI, M.; YAZDIZADEH, A. Network control of a platoon of vehicles with communication limitations: a gain-schedule approach. In: *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. [S.l.]: IEEE, 2020.
- GALLARDO, J. R.; MAKRAKIS, D.; MOUFTAH, H. T. Performance analysis of the EDCA medium access mechanism over the control channel of an IEEE 802.11p WAVE vehicular network. In: *2009 IEEE International Conference on Communications*. [S.l.]: IEEE, 2009.
- GAO, W.; SHI, Y.; CHEN, S. Scalable platooning based on directed information flow topology with granulating method. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 7, p. 176634–176645, 2019.
- GE, X.; HAN, Q.-L.; DING, L.; WANG, Y.-L.; ZHANG, X.-M. Dynamic event-triggered distributed coordination control and its applications: A survey of trends and techniques. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 50, n. 9, p. 3112–3125, set. 2020.

GE, X.; XIAO, S.; HAN, Q.-L.; ZHANG, X.-M.; DING, D. Dynamic event-triggered scheduling and platooning control co-design for automated vehicles over vehicular ad-hoc networks. *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, n. 1, p. 31–46, jan. 2022.

GONZALEZ, D. L. *Performance Analysis of the Cellular-V2X Mode 4*. Dissertação de Mestrado — Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona, Barcelona, 2020.

IVANCHEV, J.; DEBOESER, C.; BRAUD, T.; KNOLL, A.; ECKHOFF, D.; SANGIOVANNI-VINCENTELLI, A. A hierarchical state-machine-based framework for platoon manoeuvre descriptions. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 128393–128406, 2021.

JOHANSSON, G.; RUMAR, K. Drivers' brake reaction times. *Hum. Factors*, SAGE Publications, v. 13, n. 1, p. 23–27, fev. 1971.

KHAKSARI, M.; FISCHIONE, C. Performance analysis and optimization of the joining protocol for a platoon of vehicles. In: *2012 5th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing*. [S.I.]: IEEE, 2012.

KHALIFA, A.; KERMORGANT, O.; DOMINGUEZ, S.; MARTINET, P. Platooning of car-like vehicles in urban environments: Longitudinal control considering actuator dynamics, time delays, and limited communication capabilities. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 29, n. 6, p. 2670–2677, nov. 2021.

LENARSKA, K.; WESOLOWSKI, K.; SYBIS, M. Application of virtual leaders in long vehicle platoons operating with cooperative adaptive cruise control using IEEE 802.11p transmission. In: *2020 IEEE 21st International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*. [S.I.]: IEEE, 2020.

LESCH, V.; BREITBACH, M.; SEGATA, M.; BECKER, C.; KOUNEV, S.; KRUPITZER, C. An overview on approaches for coordination of platoons. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 23, n. 8, p. 10049–10065, ago. 2022.

LESCH, V.; KRUPITZER, C.; STUBENRAUCH, K.; KEIL, N.; BECKER, C.; KOUNEV, S.; SEGATA, M. A comparison of mechanisms for compensating negative impacts of system integration. *Future Gener. Comput. Syst.*, Elsevier BV, v. 116, p. 117–131, mar. 2021.

LI, B.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; JIA, N.; GE, Y. Near-optimal online motion planning of connected and automated vehicles at a signal-free and lane-free intersection. In: *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. [S.I.]: IEEE, 2018.

LI, L.; CHEN, X. m. Vehicle headway modeling and its inferences in macroscopic/microscopic traffic flow theory: A survey. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Elsevier BV, v. 76, p. 170–188, mar. 2017.

LI, S. E.; ZHENG, Y.; LI, K.; WANG, J. An overview of vehicular platoon control under the four-component framework. In: *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. [S.I.]: IEEE, 2015.

LI, S. E.; ZHENG, Y.; LI, K.; WANG, J. An overview of vehicular platoon control under the four-component framework. In: *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. [S.I.]: IEEE, 2015.

LI, Y.; TANG, C.; LI, K.; HE, X.; PEETA, S.; WANG, Y. Consensus-based cooperative control for multi-platoon under the connected vehicles environment. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 20, n. 6, p. 2220–2229, jun. 2019.

LOPEZ, P. A.; WIESSNER, E.; BEHRISCH, M.; BIEKER-WALZ, L.; ERDMANN, J.; FLOTTEROD, Y.-P.; HILBRICH, R.; LUCKEN, L.; RUMMEL, J.; WAGNER, P. Microscopic traffic simulation using SUMO. In: *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. [S.l.]: IEEE, 2018.

MENA-OREJA, J.; GOZALVEZ, J. PERMIT - a SUMO simulator for platooning maneuvers in mixed traffic scenarios. In: *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. [S.l.]: IEEE, 2018.

MOLINA-MASEGOSA, R.; GOZALVEZ, J.; SEPULCRE, M. Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An evaluation with periodic and aperiodic messages of constant and variable size. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 121526–121548, 2020.

NAIK, G.; CHOUDHURY, B.; PARK, J.-M. IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 7, p. 70169–70184, 2019.

NARDINI, G.; SABELLA, D.; STEA, G.; THAKKAR, P.; VIRDIS, A. Simu5G—an OMNeT++ library for end-to-end performance evaluation of 5G networks. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 181176–181191, 2020.

National Highway Traffic Safety Administration. *Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey*. Washington, EUA: National Highway Traffic Safety Administration, 2015.

NUNEN, E. van; REINDERS, J.; SEMSAR-KAZEROONI, E.; WOUW, N. van de. String stable model predictive cooperative adaptive cruise control for heterogeneous platoons. *IEEE Trans. Intell. Veh.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 4, n. 2, p. 186–196, jun. 2019.

OLIVEIRA, R. da R. *Co-design de abordagem baseada em consenso e protocolo de comunicação confiável para o controle de platoons de veículos*. Tese de Doutorado — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2020.

ORKI, O.; AROGETI, S. Control of mixed platoons consist of automated and manual vehicles. In: *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. [S.l.]: IEEE, 2019.

PRAYITNO, A.; NILKHAMHANG, I. V2V network topologies for vehicle platoons with cooperative state variable feedback control. In: *2021 Second International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP)*. [S.l.]: IEEE, 2021.

RANGO, F. D.; RAIMONDO, P.; AMENDOLA, D. Extending SUMO and PLEXE simulator modules to consider energy consumption in platooning management in VANET. In: *2019 IEEE/ACM 23rd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*. [S.l.]: IEEE, 2019.

- RAZZAGHPOUR, M.; DATAR, A.; SCHNEIDER, D.; ZAMAN, M.; WERNER, H.; FREY, H.; VELNI, J. M.; FALLAH, Y. P. Finite state markov modeling of C-V2X erasure links for performance and stability analysis of platooning applications. In: *2022 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. [S.l.]: IEEE, 2022.
- ROBINSON, T.; CHAN, E.; COELINGH, E. Operating platoons on public motorways: An introduction to the sartre platooning programme. In: *17th world congress on intelligent transport systems*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 1, p. 12.
- RODONYI, G. An adaptive spacing policy guaranteeing string stability in multi-brand *ad hoc* platoons. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 19, n. 6, p. 1902–1912, jun. 2018.
- RUAN, T.; WANG, H.; ZHOU, L.; ZHANG, Y.; DONG, C.; ZUO, Z. Impacts of information flow topology on traffic dynamics of CAV-MV heterogeneous flow. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 23, n. 11, p. 20820–20835, nov. 2022.
- RUAN, T.; WANG, H.; ZHOU, L.; ZHANG, Y.; DONG, C.; ZUO, Z. Impacts of information flow topology on traffic dynamics of CAV-MV heterogeneous flow. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 23, n. 11, p. 20820–20835, nov. 2022.
- SCHAEUFELE, B.; SAWADE, O.; PFAHL, D.; MASSOW, K.; BUNK, S.; HENKE, B.; RADUSCH, I. Forward-looking automated cooperative longitudinal control: Extending cooperative adaptive cruise control (CACC) with column-wide reach and automated network quality assessment. In: *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. [S.l.]: IEEE, 2017.
- SEGATA, M.; JOERER, S.; BLOESSL, B.; SOMMER, C.; DRESSLER, F.; CIGNO, R. L. Plexe: A platooning extension for veins. In: *2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. [S.l.]: IEEE, 2014.
- SHARMA, A.; MURALI, P. *Platoon Modelling and Control*. Dissertação de Mestrado em Robótica — Ecolé Centrale De Nantes, Nantes, 2017.
- SHEN, Z.; LIU, Y.; LI, Z.; NABIN, M. H. Cooperative spacing sampled control of vehicle platoon considering undirected topology and analog fading networks. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 23, n. 10, p. 18478–18491, out. 2022.
- SHLADOVER, S. E. PATH at 20—history and major milestones. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, n. 4, p. 584–592, dez. 2007.
- SHLADOVER, S. E.; DESOER, C. A.; HEDRICK, J. K.; TOMIZUKA, M.; WALRAND, J.; ZHANG, W.-B.; MCMAHON, D. H.; PENG, H.; SHEIKHOESLAM, S.; MCKEOWN, N. Automated vehicle control developments in the PATH program. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 40, n. 1, p. 114–130, fev. 1991.
- SOMMER, C.; ECKHOFF, D.; BRUMMER, A.; BUSE, D. S.; HAGENAUER, F.; JOERER, S.; SEGATA, M. Veins: The open source vehicular network simulation framework. In: *Recent Advances in Network Simulation*. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 215–252.

- SOMMER, C.; GERMAN, R.; DRESSLER, F. Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved ivc analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 10, n. 1, p. 3–15, 2011.
- TSUGAWA, S.; KATO, S.; AOKI, K. An automated truck platoon for energy saving. In: *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.]: IEEE, 2011.
- WANG, Y.; LIU, C. Dynamic integral sliding mode for vehicle platoon control with constant time headway policy. In: *2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. [S.l.]: IEEE, 2021.
- WAVE. *Wireless Access in Vehicular Environments. IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009)*. [S.l.: s.n.], 2010. 1-51 p.
- WEGENER, A.; PIÓRKOWSKI, M.; RAYA, M.; HELLBRÜCK, H.; FISCHER, S.; HUBAUX, J.-P. TraCI. In: *Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium on - CNS '08*. New York, New York, USA: ACM Press, 2008.
- WHO. *Global Status Report on Road Safety - Time for Action*. 2021. Disponível em: <<https://www.afro.who.int/publications/global-status-report-road-safety-time-action>>. Acesso em: 10 abr. 2022.
- WU, Y.; LI, S. E.; CORTES, J.; POOLLA, K. Distributed sliding mode control for nonlinear heterogeneous platoon systems with positive definite topologies. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 28, n. 4, p. 1272–1283, jul. 2020.
- YADLAPALLI, S. K.; DARBHA, S.; RAJAGOPAL, K. R. Information flow and its relation to stability of the motion of vehicles in a rigid formation. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 51, n. 8, p. 1315–1319, ago. 2006.
- YAN, Y.; DU, H.; HE, D.; LI, W. A pareto optimal information flow topology for control of connected autonomous vehicles. *IEEE Trans. Intell. Veh.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1–1, 2022.
- ZAKERIMANESH, A.; QIU, T.; TAVAKOLI, M. Heterogeneous vehicular platooning with stable decentralized linear feedback control. In: *2021 IEEE International Conference on Autonomous Systems (ICAS)*. [S.l.]: IEEE, 2021.
- ZHAO, C.; CAI, L.; CHENG, P. Stability analysis of vehicle platooning with limited communication range and random packet losses. *IEEE Internet Things J.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, n. 1, p. 262–277, jan. 2021.
- ZHAO, C.; DUAN, X.; CAI, L.; CHENG, P. Vehicle platooning with non-ideal communication networks. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 70, n. 1, p. 18–32, jan. 2021.
- ZHAO, F.; LIU, Y.; WANG, J.; WANG, L. Distributed model predictive longitudinal control for a connected autonomous vehicle platoon with dynamic information flow topology. *Actuators*, MDPI AG, v. 10, n. 9, p. 204, ago. 2021.

ZHENG, Y.; LI, S. E.; LI, K.; WANG, L.-Y. Stability margin improvement of vehicular platoon considering undirected topology and asymmetric control. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 24, n. 4, p. 1253–1265, jul. 2016.

ZHENG, Y.; LI, S. E.; LI, K.; BORRELLI, F.; HEDRICK, J. K. Distributed model predictive control for heterogeneous vehicle platoons under unidirectional topologies. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 25, n. 3, p. 899–910, maio 2017.

ZHENG, Y.; LI, S. E.; LI, K.; REN, W. Platooning of connected vehicles with undirected topologies: Robustness analysis and distributed h-infinity controller synthesis. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 19, n. 5, p. 1353–1364, maio 2018.

ZHENG, Y.; LI, S. E.; WANG, J.; WANG, L. Y.; LI, K. Influence of information flow topology on closed-loop stability of vehicle platoon with rigid formation. In: *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. [S.l.]: IEEE, 2014.

ZHENG, Y.; LI, S. E.; WANG, J.; CAO, D.; LI, K. Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: Study on the influence of information flow topologies. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 17, n. 1, p. 14–26, jan. 2016.

ZHU, P.; ZHU, K.; ZHANG, L. Security analysis of LTE-V2X and a platooning case study. In: *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. [S.l.]: IEEE, 2020.

ZHU, Y.; ZHAO, D.; ZHONG, Z. Adaptive optimal control of heterogeneous CACC system with uncertain dynamics. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 27, n. 4, p. 1772–1779, jul. 2019.