



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E
SISTEMAS

Renê da Rosa Oliveira

**CO-DESIGN DE ABORDAGEM BASEADA EM CONSENSO E PROTOCOLO DE
COMUNICAÇÃO CONFIÁVEL PARA O CONTROLE DE PELOTÕES DE VEÍCULOS**

Florianópolis
2020

Renê da Rosa Oliveira

**CO-DESIGN DE ABORDAGEM BASEADA EM CONSENSO E PROTOCOLO DE
COMUNICAÇÃO CONFIÁVEL PARA O CONTROLE DE PELOTÕES DE VEÍCULOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Carlos Barros Montez, Dr.

Coorientadora: Profa. Michelle S. Wangham, Dra.

Florianópolis

2020

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

da Rosa Oliveira, Renê

Co-design de abordagem baseada em consenso e protocolo de comunicação confiável para o controle de pelotões de veículos / Renê da Rosa Oliveira ; orientador, Carlos Barros Montez, coorientadora, Michelle Silva Wangham, 2020. 210 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Automação e Sistemas. I. Barros Montez, Carlos. II. Silva Wangham, Michelle. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. IV. Título.

Renê da Rosa Oliveira

**CO-DESIGN DE ABORDAGEM BASEADA EM CONSENSO E PROTOCOLO DE
COMUNICAÇÃO CONFIÁVEL PARA O CONTROLE DE PELOTÕES DE VEÍCULOS**

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

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antônio Alfredo Ferreira Loureiro, Dr.
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Eduardo Coelho Cerqueira, Dr.
Universidade Federal do Pará

Prof. Eugênio de Bona Castelan Neto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Automação e
Sistemas.

Prof. Werner Kraus Junior, Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.
Orientador

Florianópolis, 29 de Abril de 2020.

Aos meus pais e Saskya Bodenmüller.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha mãe, Seule Figueredo da Rosa Oliveira, por ser forte, por lutar, por me apoiar em todos os momentos da minha vida e por ter sido muitas vezes meu porto seguro. Agradeço ao meu pai, Paulo da Silva Oliveira, por ter sido um grande pai, por ter me ensinado valores que levarei para o resto de minha vida. Além de ter trabalhado e lutado juntamente com minha mãe para que eu tivesse oportunidade de me instruir.

Agradeço a Saskya Bodenmüller, por estar sempre ao meu lado, por sempre me incentivar, me valorizar e se preocupar comigo.

Agradeço ao meu orientador Carlos Barros Montez e minha coorientadora Michelle Silva Wingham por terem acreditado neste trabalho e por me ajudarem durante todo o desenvolvimento. Por fim, agradeço a todos os meus amigos e pessoas que de alguma maneira contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

*“Desistir é algo que Lauda não faz.”
(Andreas Nikolaus Lauda)*

RESUMO

A condução automatizada e coordenada de pelotões é muito desafiadora devido à complexidade do controle de múltiplos agentes e à presença de comunicação interveicular sem fio não confiável. Para exacerbar esse problema, este assunto possui natureza interdisciplinar, envolvendo teorias de controle, dinâmica dos veículos, comunicação e engenharia de tráfego. Devido a uma constante interação entre a lógica de controle e a topologia de comunicação, uma abordagem de co-projeto para o controlador e a rede/protocolo de comunicação confiável torna-se necessária. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma nova abordagem para o pelotões de veículos baseada no consenso. As abordagens tradicionais assumem que a topologia voltada ao fluxo de informação é fixada *a priori*, e subsequentemente a lei de controle é projetada. Nesta tese, a abordagem torna a topologia um parâmetro de projeto que pode ser explorado para reconfigurar o controlador, dependendo das necessidades e características do cenário. Além disso, a abordagem compensa automaticamente informações desatualizadas causadas por perdas e atrasos na rede. O controlador foi implementado na ferramenta PLEXE, que é um simulador de mobilidade amplamente utilizado e que inclui blocos de construção básicos para a implementação de pelotões. Análises e simulações mostraram a robustez e o desempenho da abordagem proposta em diversos cenários, incluindo condições realistas de propagação com interferência causada por outros veículos. A abordagem proposta também foi comparada a outras abordagens existentes na literatura, as quais foram escolhidas por meio de revisão sistemática. Os resultados obtidos mostraram a capacidade da abordagem proposta em manter um pelotão veicular estável com diferentes topologias de comunicação, mesmo na presença de fortes interferências, atrasos e condições de desvanecimento.

Palavras-chave: Pelotões Veiculares. Estabilidade em Cadeia. Difusão de Dados Confiável.

ABSTRACT

Automated and coordinated vehicle platoon is very challenging due to the complexity of multi-agent control and the presence of unreliable wireless intervehicular communication. This subject is also challenging due to its interdisciplinary nature, involving theories of control, vehicle dynamics, communication and traffic engineering. Due to a constant interaction between control logic and communication topology, a co-design approach to the controller and the reliable communication network/protocol is required. The objective of this work was to develop a new approach to vehicle platoon based on consensus. Traditional approaches assume information flow-oriented topology as an a priori fixed constraint, and the law of control is designed accordingly. In this thesis, the approach makes the topology a design parameter that can be exploited to reconfigure the controller, depending on the needs and characteristics of the scenario. In addition, the approach automatically compensates for outdated information caused by network losses and delays. The controller was implemented in the PLEXE tool, which is a widely used mobility simulator that includes basic building blocks for platoon deployment. Analyzes and simulations have shown the robustness and performance of the proposed approach in various scenarios, including realistic propagation conditions with interference caused by other vehicles. The proposed approach was also compared to other approaches in the literature, which were chosen through systematic review. The obtained results show the ability of the proposed approach to maintain a stable vehicle platoon with different communication topologies, even in the presence of strong interference, delays and fading conditions.

Keywords: Vehicular Platoons. String Stability. Reliable Data Dissemination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – As forças resistivas	32
Figura 2 – Organização plana	42
Figura 3 – Organização hierárquica	43
Figura 4 – Pilha de Protocolos WAVE (WEIL, 2009)	44
Figura 5 – Rede borboleta. As fontes $F1$ e $F2$ realizam a difusão de suas mensagens para os receptores $R1$ e $R2$	51
Figura 6 – Sistema Rodoviário Automatizado (componentes)	52
Figura 7 – Grafo representando a topologia de comunicação entre veículos de um pelotão	61
Figura 8 – Um sistema de controle simples	65
Figura 9 – Controle de um veículo em um pelotão CACC com topologia PF	69
Figura 10 – Visão geral da abordagem proposta	89
Figura 11 – Módulos do protocolo de comunicação AddP	91
Figura 12 – Mecanismo <i>Neighbor Removal</i>	94
Figura 13 – Fluxograma AddP - Quando um nó recebe uma mensagem WM	99
Figura 14 – Forças atuantes	103
Figura 15 – Política de espaçamento (líder e dois seguidores)	105
Figura 16 – Técnicas de modelagem de mobilidade para a simulação de protocolos e aplicações para VANETs	116
Figura 17 – Rodovia Simulada	117
Figura 18 – Taxa de Sucesso	126
Figura 19 – Quantidade de <i>Beacons</i>	126
Figura 20 – Taxa de Redundância	127
Figura 21 – Taxa de Colisões	128
Figura 22 – Atraso	128
Figura 23 – Distância de Propagação	129
Figura 24 – Eficiência na Disseminação	129
Figura 25 – Topologias selecionadas para as simulações. (a) <i>Predecessor-Leader Following</i> (PLF); (b) <i>Predecessor Following</i> (PF); e (c) <i>Bidirectional-Leader</i> (BDL)	132
Figura 26 – Erros de posicionamento dos veículos do pelotão - (fluxo: 3000 veículos/hora)	133
Figura 27 – Erros na velocidade dos veículos do pelotão em relação ao líder - (fluxo: 3000 veículos/hora)	133
Figura 28 – Velocidades ao rastrear o veículo líder - (fluxo: 3000 veículos/hora)	134
Figura 29 – Distância entre para-choques (distância de paragem: 10 m) - (fluxo: 3000 veículos/hora)	134

Figura 30 – Desempenho em relação ao distúrbio senoidal (Equação 70) sobre a velocidade do líder (Distância entre para-choques) - (fluxo: 3000 veículos/hora)	135
Figura 31 – Desempenho do AddP-CACC referente ao consenso em termos de erro de velocidade. (a) <i>Predecessor-Leader Following</i> (PLF); (b) <i>Predecessor Following</i> (PF); e <i>Bidirectional-Leader</i> (BDL) - (fluxo: 3000 veículos/hora)	136
Figura 32 – Desempenho do AddP-CACC referente ao consenso em termos de velocidade para o cenário de perturbação. (a) <i>Predecessor-Leader Following</i> (PLF); (b) <i>Predecessor Following</i> (PF); e <i>Bidirectional-Leader</i> (BDL) - (fluxo: 3000 veículos/hora)	137
Figura 33 – Erros de posicionamento dos veículos do pelotão (fluxo: 5000 veículos/hora)	138
Figura 34 – Velocidades ao rastrear o veículo líder	139
Figura 35 – Desempenho do AddP-CACC em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)	139
Figura 36 – Comparativo entre abordagens por meio do EQM. (a) <i>Predecessor-Leader Following</i> (PLF); (b) <i>Predecessor Following</i> (PF); e <i>Bidirectional-Leader</i> (BDL) - (fluxo: 3000 veículos/hora)	141
Figura 37 – Desempenho da abordagem PATH (R. RAJAMANI <i>et al.</i> , 2000) em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)	142
Figura 38 – Desempenho da abordagem Connect & Drive (ÖNCÜ <i>et al.</i> , 2014) em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)	142
Figura 39 – Desempenho da abordagem TESTCC (SANTINI <i>et al.</i> , 2017) em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)	143
Figura 40 – Desempenho da abordagem DOT-PATH (CHITRA; SATHYA, 2016) em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)	143
Figura 41 – Porcentagem de veículos envolvidos em colisões assumindo diferentes taxas de veículos equipados com EEBL (velocidade máxima de 110 km/h)	145
Figura 42 – Porcentagem de veículos envolvidos em acidentes assumindo diferentes taxas de veículos equipados com EEBL (velocidade máxima de 150 km/h)	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre softwares de simulação de redes veiculares . . .	75
Tabela 2 – Comparação entre trabalhos relacionados	86
Tabela 3 – Mensagem de Controle (BM)	93
Tabela 4 – Mensagem de Controle (WR)	93
Tabela 5 – Mensagem de Alerta (WM)	97
Tabela 6 – Características dos veículos	118
Tabela 7 – Parâmetros de Simulação da Rede	123
Tabela 8 – Parâmetros do Protocolo de Comunicação AddP	124
Tabela 9 – Parâmetros do Pelotão	125
Tabela 10 – Cenários Simulados (Codificação de Rede)	130
Tabela 11 – Quantidade de retransmissões de Mensagens de Dados (WM) (Sem e Com Codificação de Rede)	131
Tabela 12 – Terminologia e quantidade de artigos encontrados na busca utili- zando a IEEE Xplore	206
Tabela 13 – Terminologia e quantidade de artigos encontrados em outros meca- nismos de busca	207

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACC	Adaptive Cruise Control
AddP	Adaptive Data Dissemination Protocol
AHS	Automated Highway System
AR-HUD	Augmented Reality Head-Up Display
BD	Bidirectional
BDL	Bidirectional-Leader
BM	Beacon Message
BSD	Berkeley Software Distribution
C-V2X	Celular-V2X
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
CAH	Constant-Acceleration Heuristic
CAM	Cooperative Awareness Messages
CAMP	Crash Avoidance Metrics Partnership
CC	Cruise Control
CD	Connect & Drive
CNI	Confederação Nacional da Indústria
COORP	Cooperative Optimal Output Regulation Problem
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance
D	Denso
D-FPAV	Distributed Fair Power Adjustment for Vehicular
DCC	Distributed Congestion Control
DGPS	Differential GPS
DP	Distância de Propagação
DSRC	Dedicated Short-Range Communication

DTMC	Discrete-Time Markov Chain
DynB	Dynamic Beacons
E	Esparso
ECU	Electronic Control Unit
ED	Eficiência na Disseminação
EEBL	Emergency Electronic Brake Light Application
EESC	European Economic and Social Committee
EMBARC	Error Model based Adaptive Rate Control
EQM	Erro Quadrático Médio
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
GPL	General Public License
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
ICWS	Intersection Collision Warning System
IDM	Intelligent Driver Model
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ITS	Intelligent Transportation System
JB	Jerk Beacons
KB	Knowledge Base
LDW	Local Danger Warnings
LIMERIC	Linear Message Rate Integrated Control
LTE	Long Term Evolution
MANET	Mobile Ad hoc Network
ME	Muito Esparso
MDP	Markov Decision Process

MU	Máxima Utilização
N	Normal
NAHSRP	National Automated Highway System Research Program
NCS	Networked Control System
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OBU	On Board Unit
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++
PATH	Partners for Advanced Transportation Technology
PD	Proporcional Derivativo
PF	Predecessor Following
PGEAS	Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas
PGR	Processo Gaussiano de Regressão
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLEXE	Platooning Extension for Veins
PLF	Predecessor-Leader Following
POI	Point Of Interest
RAMS	Road Alert Message Service
RSU	Road Side Unit
RTK-GPS	Real-Time Kinematic GPS
RVS	Regressão de Vetor de Suporte
SMC	Sliding Mode Control
STE	Suspected Tracking Error
SUMO	Simulation of Urban MObility
TB	Total de Beacons
TC	Taxa de Colisões
TDMA	Time Division Multiple Access

TP	Tempo de Propagação
TPF	Two Predecessors Following
TPLF	Two Predecessor-Leader Following
TR	Taxa de Redundância
TS	Taxa de Sucesso
TTL	Time-To-Live
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2N	Vehicle-to Network
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
VANET	Vehicular Ad hoc Network
Veins	Vehicular in Network Simulator
VSC-A	Vehicle Safety Communications–Applications
WAVE	Wireless Access in the Vehicular Environment
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WM	Warning Message
WME	WAVE Management Entity
WR	Warning Revoke
WSM	Wave Short Message

LISTA DE SÍMBOLOS

Tb_i	Tempo entre retransmissões de beacons
Pf	Período mínimo fixo
D_i	Densidade do nó i
TpV	Tempo de cada veículo
Id_i	Identificador do nó (endereço MAC)
Lp_i	Informa se o nó i é líder de pelotão
$d_{i,i-1}$	Distância entre i e $i-1$ (veículo à frente)
Ap_i	Posição anterior no instante t^k
p_i	Posição atual no instante t^k
Av_i	Velocidade anterior do nó i no instante t^k
v_i	Velocidade atual do nó i no instante t^k
IdW	Identificador da mensagem de aviso
BM_i	Tipo da mensagem de controle (BM)
Ti	<i>Timestamp</i> (quando a mensagem foi gerada)
Tr_i	<i>Timestamp</i> (quando a mensagem foi revogada)
β_j	Tempo limite
Pe_j	Posição estimada do nó j
$dpA_{i,j}$	Distância do nó j para o nó i
TDp_j	Estimativa de distância percorrida
M_j	Aproximação do nó j
$dpP_{i,j}$	Distância do nó j para i em uma posição anterior.
G_j	Ganho do retransmissor
B_j	Distância para borda
Th_B	Limite de distância
Th_D	Limite de densidade

w	Peso das componentes de G_j
ToM	Tipo da Mensagem
$Desc$	Descrição do alerta
TTL	Tempo de vida da mensagem
Tag	Agregação de mensagens
$Relay$	Nó retransmissor
γ_k	Tempo de espera
$Thag$	Limite para agregação
\mathcal{G}	Grafo direcionado
\mathcal{V}	Conjunto de vértices
\mathcal{E}	Conjunto de arestas
\mathcal{D}	Matriz diagonal
\mathcal{L}	Matriz laplaciana
\mathcal{P}	Matriz de pivotamento
\mathcal{C}_i	Conjunto de vizinhos
m	Massa do veículo
$a(t)$	Aceleração do veículo
$f_p(t)$	Forças de rolamento sentido do movimento
$f_{at}(t)$	Forças de rolamento no sentido contrário
$f_{ar}(t)$	Força de arrasto
ρ	Densidade do ar
c_d	Coefficiente de arrasto
A_v	Área frontal do veículo
$T(t)$	Torque
r	Raio da roda
η	Eficiência do motor

g	Força da gravidade
μ	Coeficiente de atrito
$T_{des}(t)$	Torque desejado
ς	Atraso inercial
$u(t)$	Sinal de controle
$ds_{i,j}$	Distância de segurança
l_i	Comprimento do veículo
$d_{i,j}$	Distância desejada
$h_{i,j}$	Tempo de <i>headway</i>
k	Coeficiente de rigidez e amortecimento
I_N	Matriz identidade
\otimes	Produto de Kronecker
τ	Atraso
τ_{max}	Atraso Máximo
σ	Imperfeição do condutor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	22
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	25
1.2.1	Pergunta de Pesquisa	29
1.2.2	Solução Proposta	30
1.2.3	Delimitação do Escopo	31
1.2.4	Justificativa	31
1.3	OBJETIVOS	34
1.3.1	Objetivo Geral	34
1.3.2	Objetivos Específicos	34
1.4	METODOLOGIA	35
1.4.1	Metodologia da Pesquisa	35
1.4.2	Procedimentos Metodológicos	36
1.5	ESTRUTURA DA TESE	37
1.5.1	Publicações	38
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	39
2.1	COMUNICAÇÃO EM REDES VEICULARES	39
2.1.1	Organização da Comunicação	41
2.1.2	Padrões de Comunicação	43
2.1.3	Disseminação de Dados	45
2.1.4	Disseminação Confiável de Dados	46
2.1.5	Controle de Carga	48
2.1.5.1	Codificação de Rede	50
2.2	SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES	51
2.2.1	Sistema Rodoviário Automatizado	51
2.2.2	Aplicações Veiculares	55
2.2.3	Pelotões Veiculares	56
2.3	TEORIA DE CONSENSO	58
2.3.1	Consenso de Rastreamento	63
2.4	CONTROLE DE PELOTÕES VEICULARES	65
2.4.1	Atrasos de Atuação e de Comunicação	65
2.4.2	Controle de Velocidade de Cruzeiro	66
2.4.3	Controle de Velocidade Adaptativo	66
2.4.4	Controle de Velocidade Adaptativo e Cooperativo	67
2.4.5	Controle Lateral	70
2.4.6	Estabilidade em Cadeia	71
2.5	SIMULAÇÃO DE PELOTÕES VEICULARES	73

2.6	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	76
3	TRABALHOS RELACIONADOS	78
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	78
3.2	COMPARATIVO ENTRE TRABALHOS RELACIONADOS	85
3.3	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	86
4	ABORDAGEM PROPOSTA	88
4.1	VISÃO GERAL	88
4.2	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO	89
4.2.1	Módulo <i>Beacon Control and Sending</i>	91
4.2.2	Módulo <i>Determination of Neighbourhood</i>	92
4.2.3	Módulo <i>Efficient and Reliable Data Dissemination</i>	96
4.2.3.1	Mecanismo <i>Candidate Selection</i>	96
4.2.3.2	Mecanismo <i>Disseminated Messages Monitoring</i>	97
4.2.3.3	Mecanismo <i>Warning Message Aggregation</i>	98
4.3	CONTROLE COOPERATIVO E ADAPTATIVO	100
4.3.1	Dinâmica Longitudinal do Veículo	102
4.3.2	Política de Espaçamento	104
4.3.3	Modelagem do Pelotão como Problema de Consenso	106
4.3.4	Dinâmica do Pelotão	107
4.3.4.1	Dinâmica Sob Atraso na Comunicação	108
4.3.5	Escalonamento de Ganhos	110
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
5	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	113
5.1	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	113
5.1.1	Simulador de Rede	113
5.1.2	Simulador de Tráfego	114
5.1.3	Implementação e Simulação de Pelotões Veiculares	114
5.1.4	Parâmetros do Ambiente Computacional	115
5.1.5	Cenário de Mobilidade	115
5.1.5.1	Cenário de Mobilidade Desenvolvido	116
5.2	PROJETO DE EXPERIMENTOS	119
5.2.1	Métricas de Desempenho	119
5.2.2	Experimentos para Avaliar a Comunicação	122
5.2.3	Experimentos para Avaliar o Desempenho do Controlador	124
5.3	RESULTADOS E ANÁLISES DOS EXPERIMENTOS	125
5.3.1	Confiabilidade na Comunicação	125
5.3.2	Mecanismo de Codificação de Rede	130
5.3.3	Desempenho do Controlador Proposto	131
5.3.4	Comportamento Sob Diferentes Topologias	134

5.3.5	Comportamento Sob Alto Fluxo de Veículos	138
5.3.6	Comparativo Entre Abordagens de Controle	140
5.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	146
6	CONCLUSÕES	147
6.1	VISÃO GERAL DO TRABALHO E MOTIVAÇÕES	147
6.2	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	149
6.3	PERSPECTIVAS DE ATIVIDADES FUTURAS	150
6.3.1	Questões Abertas de Pesquisa	150
6.3.2	Extensões Imediatas da Proposta nesta Tese	154
	REFERÊNCIAS	156
	APÊNDICE A – ARTIGOS PUBLICADOS	175
	APÊNDICE B – REVISÃO SISTEMÁTICA	205
B.1	INTRODUÇÃO	205
B.2	METODOLOGIA	205
B.3	RESULTADOS	206
B.4	CONCLUSÃO	208
	APÊNDICE C – INSTALAÇÃO DE SOFTWARES	209
C.1	INSTALAÇÃO DO OMNET++	209
C.2	DOWNLOAD DA EXTENSÃO PLEXE	209
C.3	COMPILAR SUMO	210
C.4	COMPILAR PLEXE VEINS	210

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nos Sistemas de Transporte Inteligentes (do inglês, *Intelligent Transportation Systems* (ITSs)), as aplicações de assistência à segurança dos condutores têm obtido crescente importância, devido ao desenvolvimento e consolidação de protocolos e tecnologias relacionadas às áreas de computação móvel, comunicação sem fio e sensoriamento remoto (PAPADIMITRATOS *et al.*, 2009; FAEZIPOUR *et al.*, 2012). Nessas aplicações, as redes *ad hoc* veiculares (do inglês, *Vehicular Ad hoc Networks* (VANETs)) cumprem papel fundamental, formando uma espinha dorsal ao interligar os elementos desse tipo de sistema, viabilizando, por exemplo, as comunicações interveiculares (FAEZIPOUR *et al.*, 2012). Esse tipo de comunicação tem se tornado realidade, principalmente devido aos desenvolvimentos de padrões, tais como o definido pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) 802.11p, o que tem suscitado pesquisas e desenvolvimentos de diversas aplicações associadas ao conforto, eficiência e segurança no tráfego (KARAGIANNIS *et al.*, 2011).

Aplicações de segurança podem diminuir significativamente o número de acidentes. Cerca de 70 % das colisões em rodovias poderiam ser evitadas se o condutor recebesse um aviso, pelo menos, meio segundo antes da colisão (C. WANG; THOMPSON, 1997). Nestas aplicações, veículos atuam como roteadores móveis de mensagens com o propósito de enviar, receber e encaminhar mensagens de alerta através da rede e, dessa maneira, informam os condutores sobre as situações de risco nas vias (TIMO, 2004; MITROPOULOS *et al.*, 2010). O recebimento antecipado desses alertas ajuda os condutores a adaptarem suas formas de dirigir, permitindo-os evitar situações de perigo, antes mesmo que estas entrem em seu raio de visão (MITROPOULOS *et al.*, 2010).

De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) (2015), dos acidentes de trânsito, somente nas rodovias brasileiras, os custos para os cofres públicos foram de 40 bilhões de reais entre o período de janeiro de 2013 a dezembro de 2014. Já em vias urbanas, os custos chegam a 10 bilhões de reais. O levantamento considerou desde danos materiais até gastos com atendimento e os prejuízos por interrupção do trabalho. Essa pesquisa constatou que as rodovias nacionais contabilizam, em média, trezentos acidentes por dia, o que corresponde a um acidente a cada quatro minutos e meio. Os acidentes de trânsito no Brasil matam cerca de 45 mil pessoas por ano e deixam mais de 300 mil pessoas com lesões graves. Os acidentes por atropelamento acontecem a cada duas horas, resultando na morte de mais de mil pedestres por ano. O número de mortes no grupo dos motociclistas é próximo de um mil a cada ano (IPEA, 2015).

Outro problema importante é o congestionamento do tráfego, que afeta a eficiên-

cia dos sistemas de transporte e, portanto, o consumo de combustível e a poluição. De acordo com as estatísticas publicadas pelo *European Economic and Social Committee* (EESC) (2015), cerca de 25 % das emissões de gases que provocam o efeito estufa são devidas ao transporte. Destes 25 %, parte significativa (72 %) é decorrente do transporte rodoviário (EESC, 2015). Além disso, o EESC calculou os custos anuais dos congestionamentos para a União Europeia contabilizando o valor de cerca de 1 % do seu produto interno bruto. Os veículos têm, portanto, um grande impacto sobre o ecossistema do planeta e sobre a economia. Nos Estados Unidos, os custos decorrentes de congestionamentos em áreas urbanas ultrapassaram os 160 bilhões de dólares em 2014 e acarretaram 42 horas de atraso por passageiro (SCHRANK *et al.*, 2015). Ao melhorar a eficiência dos sistemas de transporte rodoviário, pode-se reduzir a quantidade de gases nocivos emitidos na atmosfera, e conseqüentemente melhorar a qualidade de vida.

Segundo a Confederação Nacional da Indústria (2015), os habitantes da cidade de São Paulo passaram, em 2014, o equivalente a um mês e meio no trânsito, ao gastar pelo menos duas horas e cinquenta e oito minutos por dia no trânsito. Esses dados incluem todos os meios de transporte e dá uma ideia do impacto do deslocamento na vida das pessoas em uma cidade de grande população.

A implementação de pelotões inteligentes (*platooning*) pode reduzir a quantidade de tempo desperdiçado na condução (BERNARDO *et al.*, 2015). O *platooning* é um método que busca a automatização da condução, no qual os veículos são agrupados em pelotões, e a velocidade de cada veículo (exceto, eventualmente, a velocidade do veículo líder) é ajustada automaticamente de modo a manter uma distância segura entre veículos (GUO; YUE, 2012). A condução automatizada, por sua vez, é uma área ativa de investigação que visa aumentar a segurança rodoviária, gerir o congestionamento do tráfego e reduzir as emissões dos veículos através da introdução da automação no tráfego rodoviário (BERNARDO *et al.*, 2015).

A ideia básica da formação de pelotões é a de que veículos com interesses em comum possam formar cooperativamente um padrão de condução, no qual cada veículo segue o da frente, buscando manter uma distância pequena e quase constante (JIA *et al.*, 2016). Além de melhorar o fluxo do tráfego e reduzir o consumo de combustível, o *platooning* tem outras vantagens como, por exemplo, o aumento da segurança, já que a maioria dos acidentes rodoviários são devidos a erros humanos, e um sistema automatizado de condução de veículos em uma rodovia tende a reduzir as chances de falhas (C. WANG; THOMPSON, 1997). Segundo L. Li e X. Chen (2017), a quantidade de veículos no tráfego tem alcançado a capacidade das rodovias, resultando em congestionamentos frequentes. Uma forma de se aumentar a capacidade de uma rodovia é através da redução da distância entre veículos (ELEFTERIADOU, 2013). Porém, forçar condutores humanos a diminuir a distância entre veículos, não é uma

medida segura. A automação do deslocamento longitudinal dos veículos é necessária para garantir a segurança do trânsito enquanto se busca uma redução da distância interveicular. Além do controle longitudinal, outros aspectos precisam ser levados em consideração como, por exemplo, o controle do deslocamento lateral, que define a direção que o veículo deve tomar em determinadas situações.

Na automação de pelotões veiculares, a capacidade de atenuar o efeito de distúrbios ao longo do pelotão é um requisito fundamental. Os congestionamentos são geralmente a consequência da amplificação dos efeitos de distúrbios (por exemplo, induzidos por condutores humanos) ao longo do pelotão veicular, porém também podem ocorrer quando a capacidade da rodovia é excedida (C. CHEN *et al.*, 2001). A propriedade relacionada à atenuação dos efeitos de distúrbios ao longo do pelotão é frequentemente referida como estabilidade em cadeia (NAUS *et al.*, 2010). Contrariamente às definições convencionais de estabilidade para sistemas dinâmicos, que se preocupam com a evolução das respostas do sistema ao longo do tempo, a estabilidade em cadeia (em pelotões de veículos) se concentra na propagação de estados do sistema sobre os veículos que fazem parte o pelotão (cadeia). Diferentes definições de estabilidade em cadeia são dadas na literatura, como por exemplo, em (SHEIKHOLESLAM; DESOER, 1993; SWAROOP; HEDRICK, 1996), que têm como foco tipos específicos de perturbações ou topologias específicas de interconexão, que definem como os nós devem se comunicar e se comportar. Swaroop e Hedrick (1996), por exemplo, utilizam uma abordagem de estabilidade de Lyapunov para analisar a estabilidade em cadeia, que apenas se concentra em perturbações de condição inicial. A estabilidade em cadeia garante que os erros diminuam à medida que se propagam ao longo do pelotão veicular (NAUS *et al.*, 2010).

A estabilidade em cadeia é garantida quando a função de transferência do erro de um veículo para o veículo seguinte tiver uma magnitude inferior a 1 (SHEIKHOLESLAM; DESOER, 1993). Para alcançar essa estabilidade com um espaçamento entre veículos constante, uma comunicação interveicular confiável mostra-se necessária (NAUS *et al.*, 2010). No contexto dos pelotões, um problema descrito em trabalhos sobre aplicações voltadas à segurança no trânsito, como por exemplo (NAUMOV; GROSS, 2007; BERNSEN; MANIVANNAN, 2009), é a falta de confiabilidade na troca de informações entre os veículos do pelotão, que está atrelada à dificuldade em prover comunicação com baixa perda de mensagens e atrasos que não comprometam a aplicação. Os pesquisadores Na Nakorn e Rojviboonchai (2010) discutem alguns protocolos confiáveis que oferecem um serviço de entrega de mensagens garantida, por meio de implementações de mecanismos para que seu comportamento possa dinamicamente adaptar-se às condições observadas na rede.

Para prover confiabilidade na entrega de mensagens de dados na rede, um protocolo de comunicação precisa mitigar problemas como, por exemplo, nó oculto,

broadcast storm, alta latência, e oferecer adaptabilidade diante de inúmeros cenários com densidade de veículos variada, a fim de proporcionar uma melhora no desempenho para as aplicações que têm como requisito crítico a entrega das mensagens em um cenário veicular.

Organizar os veículos em pelotões traz desafios quando se considera o pelotão como um sistema distribuído. Segundo Kheirandish *et al.* (2017), uma área de pesquisa que trata com problemas semelhantes aos de controles de *platooning* é a de sistemas de controle via rede (*Networked Control Systems (NCSs)*), os quais se caracterizam por serem sistemas de controle distribuído de malha fechada com seus componentes interconectados por meio de uma rede de comunicação. Estes sistemas precisam tratar com questões relacionadas ao controle discreto, como imprecisões numéricas e o indeterminismo temporal, que ocorre por conta das trocas de mensagens em um cenário no qual as desconexões podem ser constantes (KHEIRANDISH *et al.*, 2017).

Um conceito importante aplicado aos NCSs é o do co-projeto do controle concomitantemente com a rede de comunicação. Esse conceito de co-projeto que existe nesses sistemas pode ser readequado e utilizado em sistemas de aplicações de segurança para veículos que se movimentam em pelotões, pois essas aplicações são sensíveis a questões de rede, tais como sensibilidade ao atraso na entrega da mensagem e a confiabilidade na disseminação de mensagens.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Esta pesquisa tem como foco questões relacionadas à estabilização de um pelotão. Testes de campo em pequena escala mostraram que o controle de pelotões é viável (MILANÉS *et al.*, 2014), mas o que não costuma ser considerado nesses trabalhos é o desempenho de sistemas de comunicação e controle de pelotões em cenários de grande escala. O controlador requer atualizações frequentes e oportunas para garantir a confiabilidade, e precisa se adaptar a cenários com altas densidades veiculares e topologias variadas. Trabalhos focados em estabilizar pelotões normalmente definem a topologia *a priori*, algo que facilita a definição dos parâmetros do controlador CACC (do inglês, *Cooperative Adaptive Cruise Control*), para garantir a estabilidade do pelotão (HAO; BAROOAH, 2013).

As abordagens baseadas em interações entre pares mostraram-se altamente sensíveis a distúrbios externos e à densidade veicular, resultando em instabilidade (HAO; BAROOAH, 2013). Ao mesmo tempo, sabe-se que o espaçamento entre os veículos é definido pelo tempo de *headway*¹ e a obtenção de tempos semelhantes entre os veículos é um assunto muito discutido na literatura (Rajesh RAJAMANI, 2012). Mé-

¹ Intervalo de tempo entre a passagem, por uma determinada seção transversal da via, de dois veículos consecutivos tendo como referência os para-choques dianteiros, independentemente de utilizarem a mesma faixa de rolamento.

todos de controle para garantir a estabilidade de um pelotão existem sob o pressuposto de que a comunicação não é afetada por atrasos, ou seja, a análise da estabilidade é realizada sob a hipótese de uma comunicação ideal (SWAROOP; HEDRICK, 1996). A suposição de que a comunicação é ideal, não é realista, e os atrasos na comunicação são conhecidos por criar instabilidades dificilmente gerenciáveis (X. LIU *et al.*, 2001).

Estudos recentes criaram abordagens de CACC capazes de mitigar os efeitos provocados pelo atraso na comunicação (X. LIU *et al.*, 2001; FERNANDES; NUNES, 2010; 2012; L. ZHANG; G. OROSZ, 2016; NUNEN *et al.*, 2019). Dado que os efeitos e as limitações na comunicação não são explicitamente explicados durante o projeto do controlador, estas questões são investigadas numericamente através de análise de sensibilidade, geralmente realizada na presença de um atraso de comunicação fixo, único e constante (X. LIU *et al.*, 2001; FERNANDES; NUNES, 2010).

Muitas vezes, o desempenho e a estabilidade das abordagens de um controlador CACC em relação às características da comunicação, como atraso, perda de pacotes, confiabilidade, tráfego e dinâmica de mobilidade, são estudados com ferramentas de simulação adequadas, como em (Christoph SOMMER *et al.*, 2011; LEI *et al.*, 2011a; NUNEN *et al.*, 2019). Lei *et al.* (2011a) buscaram analisar o desempenho e a robustez de um controlador CACC em relação à presença de perda de pacotes, falhas na rede e sobrecarga de *beacons*. Ainda na pesquisa de Lei *et al.* (2011a), a estrutura de simulação foi construída com um protótipo de controlador CACC definido em (NAUS *et al.*, 2010), por meio de um simulador de tráfego SUMO (*Simulation of Urban MObility*) e um simulador de rede OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed in C++*). A dinâmica da comunicação é modelada no simulador OMNeT++.

Embora os veículos do pelotão sejam geralmente, modelados como parte de uma cadeia (pelotão), diferentes topologias podem surgir dependendo do padrão de comunicação entre os veículos, bem como a forma como as informações obtidas são usadas pelo algoritmo de controle. Em trabalhos como (Christoph SOMMER *et al.*, 2011; LEI *et al.*, 2011a; NUNEN *et al.*, 2019) cenários com topologias variadas não são tratados. Já em trabalhos como (CHEBOTAREV, 2010; BERNARDO *et al.*, 2016), a estabilidade do pelotão é obtida por um controle baseado em sistemas multi-agentes, mas falhas na comunicação e topologias variáveis não são consideradas.

Szalai e Gabor Orosz (2013), em sua pesquisa também desenvolveram um controle de pelotões baseado em sistemas multi-agentes, no qual uma abordagem é proposta para três veículos idealmente se movendo em círculo e compartilhando informações em um canal de comunicação com um atraso constante e comum. Os autores propõem o uso de uma Cadeia de Markov em Tempo Discreto (do inglês, *Discrete-Time Markov Chain* (DTMC)), mas sem considerar os efeitos que o atraso na comunicação pode exercer sobre a estabilidade do pelotão.

Nos trabalhos citados anteriormente, o controle de pelotões empregado é coo-

perativo e consensual, com o objetivo de entender a influência da topologia da rede na dinâmica do pelotão. Quando vários veículos cooperam e concordam com o valor de uma variável de interesse, chegam a um consenso. A teoria de consenso relaciona-se historicamente com a ciência da computação, e foi uma das bases para o desenvolvimento da computação distribuída (CHATTERJEE; SENETA, 1977). No entanto, o foco desta tese de doutorado é a aplicação desta teoria no contexto de controle cooperativo para sistemas multi-veículos.

Aspectos teóricos sobre a definição do problema de consenso foram introduzidos por Saber e Murray (2004), nos quais incluem-se o fluxo orientado de informação, chaveamento de topologias, atraso na comunicação e, principalmente, o estabelecimento de relação entre a conectividade algébrica do grafo e a convergência de consenso. Segundo Shi *et al.* (2017), dentre as várias opções para aplicação da teoria de consenso no contexto de controle cooperativo, as aplicações voltadas à resolução dos problemas de *rendezvous* e formação de grupos se destacam. O problema de *rendezvous* é caracterizado pela negociação entre os integrantes de um grupo para determinar a localização do ponto de encontro, que *a priori* é conhecido apenas por parte do grupo. Já a formação de grupos busca a coordenação relativa entre os agentes. Ambos os problemas podem ser considerados problemas básicos de coordenação, nos quais as ações de cada veículo do grupo devem ser projetadas de forma descentralizada de acordo com o objetivo em comum do grupo (SANTINI *et al.*, 2017).

O consenso garante que os veículos que compartilham informações sobre uma topologia de rede tenham uma visão consistente das informações que são críticas para a tarefa de coordenação. Para alcançar o consenso, deve haver uma variável compartilhada de interesse, chamada de variável de coordenação, bem como métodos adequados para negociar o consenso sobre o valor dessa variável (REN; BEARD, 2007). Por necessidade, as abordagens consensuais são projetadas para serem descentralizadas, assumindo apenas uma interação entre veículos. Os veículos atualizam o valor de variável de coordenação com base nas informações obtidas de seus vizinhos. O objetivo é projetar uma lei de atualização para que as variáveis de coordenação de todos os veículos da rede convirjam para um valor comum (REN; BEARD, 2007).

Em tarefas de coordenação, tanto o fluxo da informação como a troca de informação são fatores chaves para o sucesso na cooperação entre os integrantes do grupo. Os dispositivos de comunicação instalados nos veículos naturalmente têm limitação no alcance, tanto para transmissão como recebimento de mensagens, o que obriga os veículos manterem uma distância mínima para que haja comunicação (SANTINI *et al.*, 2015).

Segundo Christoph Sommer *et al.* (2014), há também outros fatores importantes relacionados com a difusão de informação, por exemplo, falhas nos canais de comunicação podem acontecer por consequência da alta demanda de dados no canal, ou

pelas falhas pontuais e passageiras devido à presença de obstáculos no ambiente, ou ainda, em razão da incidência de falhas temporárias nos dispositivos de comunicação.

De acordo com o contexto apresentado anteriormente, é de se esperar que existam topologias de rede diferentes em um cenário veicular. A topologia de rede poderá interferir na realização de tarefas voltadas à comunicação e controle, já que os veículos (nós da rede) estão em movimento. Para que haja disseminação de informação é preciso que os veículos respeitem requisitos de conectividade para que a informação seja distribuída aos veículos e infraestrutura, e efetivamente, ocorra uma troca de informação entre os nós.

Surge a necessidade de projetar leis de controle que, além de garantir a estabilidade do pelotão, também garantam a conectividade entre os veículos. A primeira vista, uma estratégia natural é manter uma condição de conectividade, admitindo que é uma condição já existente na topologia da rede. Ou seja, a ideia principal aqui é garantir a cada instante uma comunicação que inicialmente apresenta-se como conectada, e portanto, suficiente para obtenção do consenso entre os veículos. Entretanto, de acordo com as aplicações, falhas de comunicação podem ocorrer enquanto os veículos estão em movimento devido a obstáculos, falhas nos dispositivos ou perda de pacotes. Estas faltas dificultam a garantia de estabilidade, e constata-se como principal desvantagem dos algoritmos existentes já que os mesmos são aplicados em situações em que a comunicação é limitada apenas pela distância, desprezando situações em que não há total confiabilidade nos canais de comunicação (L. ZHANG; G. OROSZ, 2016).

A questão que surge é: como projetar leis de controle que garantam conectividade e que lidem com a presença de falhas na comunicação? Como os veículos estão em movimento, desconexões podem ocorrer, uma vez que a comunicação entre os veículos é diretamente proporcional à distância entre os nós. Além deste aspecto de mobilidade, citam-se outros fatores que conduzem a ideia de que a rede sofre mudanças e por isso, são abordados no cálculo da lei de controle: perda de pacote devido à comunicação sem fio, atrasos e falhas temporárias nos dispositivos de comunicação. Mesmo que os veículos estejam a uma distância passível de comunicação, existe a possibilidade de perda de informação devido a interferências e outros fatores ligados à comunicação sem fio.

Nesta tese, busca-se superar esses problemas descritos desenvolvendo uma abordagem de controle de pelotões flexível que pode ser reconfigurada com base no estado da rede (que suporte topologias variadas). Diante deste contexto, também faz-se necessário acrescentar à estratégia de controle cooperativo baseado em consenso um protocolo de comunicação confiável *multi-hop* que torna, tanto a comunicação entre veículos, quanto a comunicação entre veículos e infraestrutura presentes ao longo da via, mais robustas e eficazes, viabilizando a criação, manutenção e dispersão de pelotões formados pelos veículos que trafegam na via. O protocolo também busca

prover controle de carga na rede veicular. Uma hipótese assumida nesta tese é que uma comunicação robusta permitirá a troca de informações entre os nós da rede veicular e permitirá um melhor gerenciamento da estrutura de comunicação em Sistemas de Transporte Inteligentes. Assume-se que essa abordagem terá impacto positivo na convergência do problema de consenso e na estabilidade do pelotão.

1.2.1 Pergunta de Pesquisa

O principal questionamento nesta pesquisa é:

“ É possível manter os veículos de um pelotão na formação desejada diante de diferentes topologias, falhas e atrasos na comunicação, por meio de uma abordagem de co-projeto para o controlador e sua topologia de comunicação subjacente? ”

Em busca da solução para tal questionamento, considerando o contexto apresentado, outras perguntas deverão ser respondidas no decorrer deste trabalho, como:

1. Como conceber uma abordagem que visa prover comunicação confiável e estabilidade ao pelotão veicular diante de cenários distintos?
2. Quais métricas serão utilizadas para avaliar o desempenho da abordagem proposta?
3. Qual é o desempenho da solução de comunicação projetada?
4. Qual é o desempenho da abordagem de controle frente ao pelotão veicular?
5. Qual impacto que a abordagem proposta causa no desempenho de uma aplicação voltada à segurança?

Tendo em vista os desafios impostos pelos pelotões, a **Pergunta 1** trata da complexidade em desenvolver uma abordagem de co-projeto para o controlador e sua topologia de comunicação subjacente, de modo que mantenha os veículos de um pelotão na formação desejada. A **Pergunta 2** trata da dificuldade de simular e avaliar abordagens voltadas ao controle de pelotões por meio de simulações bidirecionais entre simuladores de rede e de tráfego. Essa dificuldade é decorrente do fato que, além de simular a própria rede de comunicação e os traços de mobilidade, também deve-se controlar o pelotão criado no cenário para que seja possível avaliar o desempenho da proposta em cenários com topologias variáveis. As **Perguntas 3 e 4**, tratam do desempenho dos componentes da abordagem proposta. Por fim, a **Pergunta 5** está relacionada ao impacto que a abordagem proposta e seus mecanismos podem gerar no desempenho do ITS.

1.2.2 Solução Proposta

A proposta é dividida em duas partes, uma parte teórica e uma parte construída por meio de simulações que buscaram utilizar traços de mobilidade reais. Na parte teórica, buscou-se construir uma nova abordagem de controle cooperativo descentralizada baseada em consenso com o objetivo de coordenar todos os veículos para atingir a máxima utilização da via e prover estabilidade ao pelotão. A abordagem é projetada especificamente para levar em consideração a dinâmica da topologia lógica de comunicação, bem como as falhas existentes em cenários reais, como atraso e perdas. Também buscou-se definir de forma detalhada o projeto do controlador e do protocolo de comunicação e realizar a análise do desempenho provido pela proposta.

Este trabalho difere de outros estudos por levar em consideração atrasos e falhas na comunicação e densidades veiculares variáveis em cenários com traços de mobilidade reais. Além de preparar o controlador para diferentes topologias de rede. Levar em consideração estes aspectos na fase de projeto é de suma importância para que o sistema possa lidar com situações não programadas e assim possa manter a estabilidade do conjunto.

Na estrutura de controle os veículos têm conhecimento e troca de informações limitados, o que aproxima o cenário de simulação de casos práticos. Neste sentido, o fluxo da informação é sempre orientado, os veículos têm comunicação limitada pela distância e os canais de comunicação estão sujeitos a falhas temporárias com origem diversa. A estratégia de controle cooperativo baseado em consenso para o problema de coordenação de pelotões permite que seja utilizado um controle local.

O objetivo principal da abordagem proposta é garantir a estabilidade do pelotão na presença de atrasos na comunicação. Esta característica pode ser muito importante também em situações de emergência, nas quais o controlador deve definir quais ações de controle devem ser realizadas para, por exemplo, evitar uma colisão. Com a estratégia proposta, buscou-se melhorar a análise teórica apresentada em (BERNARDO *et al.*, 2015), estudando-se a implementação de uma política de espaçamento baseada em tempo de *headway*.

Os resultados de simulação são utilizados para ilustrar a efetividade da estratégia de cooperação. Desta forma, buscou-se mostrar que a proposta deste trabalho pode manter os veículos de um pelotão na formação desejada, mesmo em cenários com diferentes topologias e densidades. Por fim, foi desenvolvido um comparativo entre a proposta e abordagens presentes na literatura que são voltados ao controle cooperativo de pelotões.

Como hipótese, têm-se as seguintes afirmações:

1. A proposta mantém os veículos de um pelotão na formação desejada e com isso aumenta a taxa de utilização da via;

2. A proposta provê flexibilidade ao controlador diante de topologias variáveis;
3. Mesmo aumentando o tempo de processamento das mensagens, a proposta provê confiabilidade na comunicação entre veículos; e
4. Mesmo aumentando o atraso na comunicação, a proposta não prejudica a estratégia de controle.

1.2.3 Delimitação do Escopo

Nesta tese, foi definida uma nova abordagem de controle cooperativo descentralizada baseada em consenso com o objetivo de coordenar veículos de um pelotão para atingir a máxima utilização da via e manter os veículos de um pelotão veicular na formação desejada. A abordagem também provê confiabilidade na entrega de mensagens difundidas no ambiente veicular. A abordagem foi implementada em simuladores de rede e de tráfego, visto que o desenvolvimento de um protótipo real possui um custo muito elevado.

1.2.4 Justificativa

De acordo com Elefteriadou (2013), um dos fenômenos típicos causados por congestionamento de veículos é a onda de choque de tráfego. As ondas ocorrem devido a zonas de transição onde o fluxo muda, de alta velocidade para o fluxo congestionado (estável) e vice-versa. Segundo Carlson *et al.* (2011), congestionamentos em rodovias se formam em locais onde a capacidade a montante (por exemplo, ponto de acesso à via) é maior do que a capacidade a jusante (ponto posterior ao acesso à via), chamados de gargalos. Tais zonas de transição se propagam do ponto onde o fluxo é restringido e cresce em direção a montante, o que de fato forma uma onda. Além de serem perigosas para os condutores, as ondas de choque causam desaceleração e aceleração desnecessárias e, portanto, um desperdício de combustível e consequente aumento das emissões de gases de efeito estufa. Para reduzir as ondas de choque do tráfego, é necessário a redução do congestionamento rodoviário, que ocorre quando a demanda de tráfego é maior do que a capacidade da rodovia (ELEFTERIADOU, 2013).

Segundo Elefteriadou (2013), a melhor alternativa para aumentar o fluxo e diminuir o congestionamento é reduzir o espaçamento entre veículos. Por meio de um sistema automatizado, pode-se manter uma densidade constante até alcançar a velocidade de fluxo livre desejada. Nesse caso, pode-se obter um grande ganho na capacidade máxima da rodovia. A razão por trás disso é que a distância de segurança necessária para o tempo de reação humana causa um grande desperdício de infraestrutura rodoviária. Para compreender a fração real da rodovia utilizada (MU), pode-se

calcular a razão entre o comprimento utilizado da rodovia e o comprimento total da rodovia, isto é:

$$MU (\%) = \frac{l}{l + h \cdot v} \cdot 100, \quad (1)$$

onde a variável l é o comprimento do veículo, h é o tempo de *headway* e v representa a velocidade. Ao analisar a Equação 1, conclui-se que ao diminuir o tamanho do veículo, a taxa de utilização da rodovia diminui. Isso mostra o quão importante é reduzir o tempo de *headway* entre veículos pertencentes a um pelotão.

As forças resistivas (ver Figura 1) são geradas pelas zonas de alta pressão na frente do veículo e pela zona turbulenta de baixa pressão, que se forma na traseira do veículo. Quando dois veículos viajam muito próximos uns dos outros, o primeiro veículo está sujeito a um arrasto² inferior traseiro porque o segundo veículo perturba o fluxo turbulento. O segundo veículo, em vez disso, sofre um arrasto frontal inferior porque viaja em um fluido de menor densidade. Quanto maior o grupo de veículos, maior é a economia de combustível geral (ELEFTERIADOU, 2013). Ao pesquisar sobre pelotões e distâncias interveiculares Jootel (2012) afirma que, ao conduzir a uma distância de 5 a 8 metros, todos os veículos do pelotão economizam combustível. Em particular, os veículos seguidores reduzem o seu consumo de combustível em até 16 %, enquanto o líder em até 8 %.

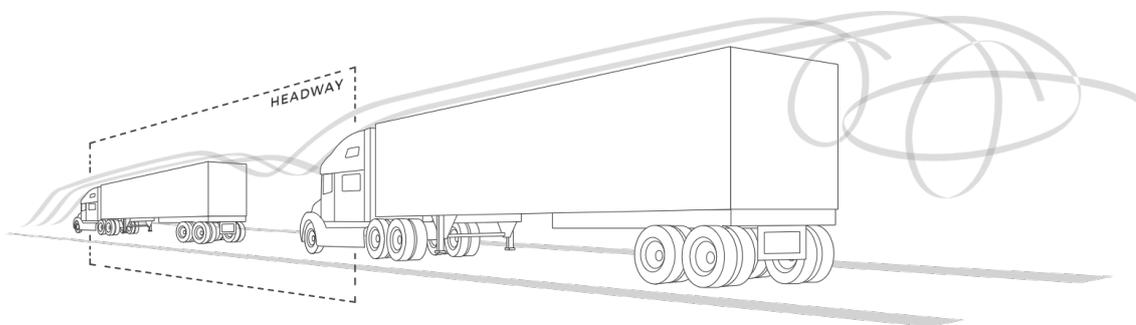


Figura 1 – As forças resistivas

Essas questões mostram o quão importante é reduzir o espaçamento entre veículos, mas isso deve ser claramente feito por um sistema de condução auxiliado por computador (ITS), pois os condutores humanos não podem violar a restrição de distância de segurança sem aumentar o risco de colisões. Uma forma de prover uma condução mais segura e mais eficiente é a introdução de mecanismos de controle longitudinal baseados apenas em sensores encontrados em veículos modernos (R.

² O arrasto é a força que faz resistência ao movimento de um objeto sólido através de um fluido. Ao contrário de outras forças resistivas, como o atrito, que é quase independente da velocidade, forças de arrasto dependem da velocidade (XIONG *et al.*, 2015).

RAJAMANI, 2011). Para facilitar a pesquisa e implementação de automação em veículos, a *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) classificou cinco níveis distintos de automação; do nível 0 (sem automação) ao nível 4 (automação completa) (HICKS, 2018).

Uma classificação similar foi definida pela SAE International, que adotou seis níveis: nível 0 (sem automação) até o nível 5 (automação completa) (LV *et al.*, 2018). O primeiro sistema de suporte à condução com certo nível de automatização é o controle longitudinal que mantém automaticamente uma velocidade de cruzeiro constante (do inglês, *Cruise Control* (CC)) (R. RAJAMANI, 2011). Segundo Santini *et al.* (2017), nos últimos anos, com o aprimoramento da tecnologia de controle de veículos, o sistema de Controle de Cruzeiro Adaptativo (do inglês, *Adaptive Cruise Control* (ACC)) é um exemplo de tal automação longitudinal do veículo. Atualmente, a funcionalidade ACC é generalizada e está disponível em vários veículos modernos. O ACC permite que o veículo mantenha uma certa distância de um veículo a frente, aumentando a utilização da via e a segurança do tráfego, bem como a eficiência no consumo de combustível (ELEFTERIADOU, 2013). Este sistema foi concebido para melhorar ainda mais a experiência de condução, como o conforto. No ACC, a distância interveicular e a velocidade relativa ao veículo anterior são medidas por sensoriamento. Os atuais sistemas ACC se concentram principalmente no conforto da condução e, em menor grau, na segurança do trânsito. Por consequência, as distâncias entre os veículos são relativamente grandes em sistemas comercialmente disponíveis, ou seja, o mecanismo de controle longitudinal baseado apenas em sensoriamento mantém uma distância de segurança comparável a dos condutores humanos e, portanto, não busca prover a máxima utilização da rodoviária (R. RAJAMANI, 2011).

Ao permitir a conectividade entre veículos e *Road Side Units* (RSUs), o controle ACC teve sua extensão chamada de Controle de Cruzeiro Adaptativo e Cooperativo (CACC). Diante deste controle, é possível a criação de pelotões veiculares (GUO; YUE, 2012). O CACC pertence ao nível 2 na escala de automação, tanto para a NHTSA, quanto para a SAE International. Com as informações compartilhadas entre os veículos, o CACC permite que os veículos em um pelotão mantenham um *headway* menor em comparação ao ACC (XU; SENGUPTA, 2003). Os veículos, que estão equipados com o CACC, não apenas medem a distância e a velocidade em relação ao veículo anterior, mas também podem se comunicar com outros veículos equipados com CACC por meio de uma rede sem fio e protocolos de comunicação. As informações adicionais obtidas através dessa rede de comunicação são um facilitador chave para o projeto de outros controladores que permitem distâncias menores entre veículos, enquanto ainda garantem estabilidade na cadeia (em comparação com ACC) (ALI *et al.*, 2015; SANTINI *et al.*, 2015). Uma vantagem adicional do CACC é que o consumo de combustível será reduzido porque as variações na velocidade diminuem. Além disso, pequenas

distâncias entre os veículos reduzem o arrasto, em particular para caminhões e com isso pode gerar uma redução significativa no consumo de combustível, como descrito em (ALAM *et al.*, 2010).

Segundo Delis *et al.* (2016), ao equipar 100 % dos veículos com o CACC em um cenário rodoviário, o tráfego poderia atingir mais de 4600 veículos/hora, enquanto a vazão máxima em condições normais fica próxima de 2000 veículos/hora. Já Parka *et al.* (2011) mostraram que em um cenário simulado o CACC pode reduzir as emissões e o consumo de combustível em mais de um terço. Além disso, algumas das principais causas de colisões são o comportamento de condução heterogêneo no fluxo de tráfego e falhas humanas. A aplicação do CACC permite reduzir essa diversidade formando um pelotão com espaçamentos entre veículos e tempos de *headway* menores (L. LI; X. CHEN, 2017). Existem vários estudos que exploram a viabilidade do CACC em simulações e sistemas rodoviários do mundo real (LIDSTROM *et al.*, 2012; SCHAEUFELE *et al.*, 2017; X. LU; S. SHLADOVER, 2017). Abordagens recentes do CACC assumem um controle de topologia estático, com isso suas topologias de comunicação são fixas (ZHENG *et al.*, 2016). Caso existam outras topologias de comunicação no cenário, o controlador pode não ser capaz de operar de forma segura o pelotão veicular (ZHENG *et al.*, 2016). A escolha do controle de topologia para pelotões passou a despertar estudos recentes, pois a própria topologia impulsiona o comportamento do controlador, mas também determina os requisitos da rede (ZHENG *et al.*, 2016; Y. ZHU *et al.*, 2018).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma estratégia de controle cooperativo descentralizada baseada em consenso para manter os veículos de um pelotão na formação desejada, e prover comunicação confiável que suporte, atrasos na comunicação, a dinâmica dos veículos e topologias variáveis em um ambiente veicular.

1.3.2 Objetivos Específicos

Diante do que está especificado como objetivo geral neste trabalho, diversos passos devem ser dados no sentido de solucionar os problemas atrelados aos pelotões veiculares. A seguir, são listados os objetivos específicos:

- Desenvolver uma estratégia de controle cooperativa descentralizada para prover estabilidade ao pelotão veicular;
- Desenvolver uma solução de comunicação para apoiar a estratégia de controle que seja tolerante a falhas na comunicação sem fio;

- Avaliar o impacto que a solução de comunicação pode causar na convergência do problema de consenso;
- Avaliar o desempenho da estratégia de controle cooperativa e descentralizada; e
- Estudo sobre a convergência de consenso no âmbito de pelotões veiculares.

1.4 METODOLOGIA

Nesta seção, apresenta-se uma classificação da metodologia utilizada nesta pesquisa, bem como os procedimentos metodológicos.

1.4.1 Metodologia da Pesquisa

Segundo Silva e Menezes (2005), a pesquisa científica tem por objetivo contribuir para a construção do conhecimento humano em qualquer área. Neste capítulo, é apresentada a metodologia de pesquisa e os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa. No desenvolvimento da pesquisa descrita neste trabalho, está sendo aplicado o método hipotético-dedutivo. Conforme Gil (2002), esse método parte da percepção de uma lacuna no conhecimento, acerca da qual se formula hipóteses e, pelo processo de inferências dedutivas, testa a predição da ocorrência de fenômenos abrangidos pela hipótese.

Sob o ponto de vista de sua natureza, este trabalho pode ser classificado como pesquisa aplicada. Esse tipo de pesquisa tem como objetivo gerar conhecimentos para a aplicação prática dirigida a solução de problemas específicos (SILVA; MENEZES, 2005). Diante do exposto anteriormente, este trabalho tem como objetivo a formação de conhecimentos através da concepção de uma abordagem para solucionar problemas existentes no âmbito de pelotões veiculares. Neste trabalho, emprega-se o método científico indutivo com a validação dos conceitos relacionados a controle, automação e comunicação de dados através de pesquisa experimental. Assim, é possível generalizar o conhecimento adquirido no trabalho para outras aplicações voltadas à segurança e coordenação no trânsito.

Do ponto de vista da abordagem do problema, o trabalho utiliza a forma quantitativa. Segundo Silva e Menezes (2005), a pesquisa quantitativa utiliza recursos e técnicas de estatísticas, pois nesta tudo deve ser quantificável, ou seja, as informações devem ser transformadas em números. Neste trabalho, serão coletados dados estatísticos a partir da execução de simulações que permitirão a avaliação das hipóteses estabelecidas.

De acordo com os objetivos traçados, este trabalho pode ser classificado como de natureza exploratória, uma vez que exige amplo levantamento bibliográfico, troca de conhecimento com pesquisadores qualificados sobre o assunto, bem como análise de simulações/experimentos. Entretanto, não está descartada a presença de característi-

cas das pesquisas explicativas, cujo objetivo é “identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos”, esclarecendo o motivo da sua existência (GIL, 2002).

1.4.2 Procedimentos Metodológicos

Esta seção tem como objetivo descrever as etapas para realização do trabalho de acordo com as definições citadas anteriormente. Assim, procura-se envolver os objetivos definidos (Seção 1.3) em uma discussão sobre o encaminhamento de sua realização.

Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico sobre o tema proposto, englobando artigos publicados em anais de eventos, jornais e revistas. Tal pesquisa visou estabelecer o atual estágio do estado da arte na área de interesse desse trabalho. Verificou-se que, no contexto das VANETs, realizar o controle de pelotões por meio de um sistema de comunicação é de extrema relevância. Isso fica claro diante da grande quantidade de trabalhos publicados envolvendo estudos sobre redes veiculares, uso de diferentes abordagens para prover confiabilidade na transmissão de dados, mecanismos de controle para buscar segurança em rodovias e técnicas/heurísticas para resolver os problemas apontados na Seção 1.2.

Apesar desses trabalhos proporem soluções para certos problemas, acredita-se que a área não está totalmente coberta. Assim, foi necessário um estudo aprofundado sobre pelotões e suas características no contexto das VANETs, além de conhecimentos específicos com relação aos mecanismos de controle já utilizados.

A etapa seguinte envolveu o estudo dos problemas relacionados a comunicação de dados em redes veiculares e suas características, como: confiabilidade, padrões de comunicação, aplicações voltadas à segurança, controle de carga, codificação de rede e modos de organização da comunicação. Além disso, esta fase serviu para definir os próximos passos da pesquisa. Foram realizadas simulações em cenários com traços reais para avaliar, na medida do possível, diferentes mecanismos e situações na execução de tarefas rotineiras e, com isso, observar o comportamento da abordagem proposta.

Seguindo os estudos relacionados ao contexto apresentado neste documento, foram realizadas pesquisas sobre Sistemas de Transporte Inteligentes com o intuito de obter entendimento sobre pelotões de veículos e os sistemas de controle já utilizados. Além disso, buscou-se entender as ferramentas existentes para permitir a simulação de pelotões.

Foi realizada uma análise dos trabalhos correlatos encontrados na literatura, referenciados por diversos autores, que empregam métodos para estabilizar pelotões veiculares e aumentar a confiabilidade na difusão de mensagens. Esses trabalhos serviram de base para a construção da abordagem proposta e da sua integração a uma

aplicação embarcada nos veículos. Esses trabalhos foram selecionados e analisados por meios de critérios definidos na revisão sistemática, cujo protocolo de busca é apresentado no Apêndice B.

Após o levantamento bibliográfico e análise de trabalhos correlatos, foi definida a estrutura da abordagem proposta e os mecanismos implementados para prover confiabilidade à transmissão e estabilidade ao pelotão veicular. Com base na modelagem realizada, a aplicação e a abordagem proposta foram implementadas em um simulador de rede bidirecionalmente acoplado. Testes funcionais da abordagem foram realizados em um ambiente de simulação. Estes testes foram baseados em planos de teste que foram definidos visando verificar o atendimento aos requisitos, e aferir alguns parâmetros para a configuração da rede e da abordagem. Também foram definidos cenários com densidades variáveis que seguem padrões reais. Os atrasos e as perdas na comunicação foram modeladas levando em consideração o padrão IEEE 802.11p. Também foram incluídas no modelo de simulação, características físicas detalhadas da dinâmica dos veículos, como motor, transmissão, engrenagens, rodas, além das forças resistivas (atrito), por meio da ferramenta PLEXE (*Platooning Extension for Veins*).

Visando avaliar a abordagem desenvolvida neste trabalho foram realizadas simulações de cenários (rodovia fictícia) com densidades de veículos e topologias diferentes. Foram analisadas as seguintes métricas de desempenho: (i) a confiabilidade referente à taxa de sucesso da entrega dos alertas; (ii) o atraso máximo na entrega dos alertas; (iii) a quantidade de colisões de pacotes, (iv) a quantidade de pacotes gerados na rede; (v) a estabilidade do pelotão frente a perturbação senoidal; e (vi) a distância interveicular.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está enquadrada na área de concentração relacionada aos Sistemas Computacionais, estando de acordo com as atividades desenvolvidas no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas (PGEAS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mais especificamente, pretende-se abordar conteúdos no contexto de Redes Veiculares. A tese está organizada por capítulos. A seguir uma breve descrição geral sobre cada um destes capítulos é apresentada:

- **Capítulo 2:** são abordados os principais conceitos envolvidos no contexto desta tese.
- **Capítulo 3:** discutem-se os trabalhos relacionados com esta pesquisa.
- **Capítulo 4:** é apresentado o detalhamento da abordagem proposta, que inclui a modelagem, tecnologias escolhidas para o desenvolvimento da proposta e simulações realizadas.

- **Capítulo 5:** são apresentados os resultados obtidos nas simulações e suas análises.
- **Capítulo 6:** é apresentada uma discussão final sobre os resultados obtidos com a tese, destacando novamente os objetivos que nortearam o trabalho e as principais contribuições da tese. Por fim, algumas perspectivas para trabalhos futuros são apontadas.

Alguns resultados obtidos em simulações realizadas durante os estudos são apresentados no Apêndice deste documento.

1.5.1 Publicações

Como atividade decorrente da tese de doutorado, o artigo intitulado ***Reliable data dissemination protocol for VANET traffic safety applications***³, publicado em agosto de 2017, no ELSEVIER Journal Ad Hoc Networks, volume 63, páginas 30 a 44, Qualis A2 e Impacto 4.52 (Citescore 2018). O trabalho produzido foi parcialmente apoiado pelo NSERC, CRC Research Chairs Program, NSERC Strategic DIVA Network, NSERC CREATE-TRANSIT Program e a agência brasileira de apoio à pesquisa CAPES. Além de envolver as seguintes instituições de ensino: (i) Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil; (ii) Universidade do Vale do Itajaí, Santa Catarina, Brasil; e (iii) Universidade de Ottawa, Ontário, Canadá (Apêndice A).

Ainda como resultado desta tese, o artigo intitulado ***Projeto Integrado de Controle de Pelotões baseado em Consenso e um Protocolo de Disseminação de Dados Confiável***⁴ foi submetido e aceito na trilha principal do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2020). O trabalho produzido foi apoiado pela agência brasileira de apoio à pesquisa CAPES. Além de envolver as seguintes instituições de ensino: (i) Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil; e (ii) Universidade do Vale do Itajaí, Santa Catarina, Brasil (Apêndice A).

³ ELSEVIER Journal Ad Hoc Networks: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.05.002>

⁴ XXXVIII SBRC 2020 - Artigos Aceitos: http://sbrc2020.sbc.org.br/?page_id=1796

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capítulo é apresentar alguns conceitos fundamentais relacionados ao conteúdo desta tese. Dessa forma, são descritos conceitos de comunicação em redes veiculares, suas topologias e formas de disseminação de dados. Também são descritos os Sistemas de Transporte Inteligentes, com especial atenção ao conceito de pelotões. Em seguida, mecanismos de controle são descritos brevemente, especificamente os direcionados ao controle cooperativo. Finalmente, são apresentados aspectos voltados à simulação de redes veiculares, além de uma revisão da literatura sobre ferramentas voltadas à simulação de pelotões.

2.1 COMUNICAÇÃO EM REDES VEICULARES

Conforme Xiaodong *et al.* (2007), as redes veiculares são divididas em redes interveiculares e intraveiculares. As intraveiculares são redes que estão localizadas dentro dos veículos e permitem que as informações sejam compartilhadas entre diferentes centralinas eletrônicas (do inglês, *Electronic Control Unit (ECU)*). As redes interveiculares, foco deste trabalho, são formadas por sistemas de comunicação entre veículos que fazem parte de um ambiente de trânsito. Estas redes têm seus nós compostos por veículos e por equipamentos fixos que estão presentes ao longo das vias. Todos estes elementos possuem interface de comunicação sem fio (KOSCH, 2004). Todos os nós presentes nestas redes apresentam alta mobilidade e trajetórias que acompanham as extensões das vias de tráfego (KOSCH, 2004).

Estas redes, incorporadas a um ambiente formado por veículos e todos os componentes que formam vias de tráfego, possuem muitos desafios para que possam ser utilizadas em larga escala (BECHLER *et al.*, 2003). Entre estes, destacam-se: a alta mobilidade dos nós, o dinamismo dos cenários, a escalabilidade com relação ao número de nós e o tempo reduzido em que dois nós permanecem conectados (JING; GUOHONG, 2008). Protocolos utilizados em redes *ad hoc* móveis (do inglês, *Mobile Ad hoc Networks (MANETs)*) não são adequados para suprir estes desafios, mesmo assim as MANETs e as redes *ad hoc* veiculares possuem características comuns como o dinamismo da topologia de rede (JING; GUOHONG, 2008).

Segundo Raya e Hubaux (2005), as principais características das VANETs são:

- **Banda Disponível:** as tecnologias sem fio disponíveis atualmente possuem capacidades de transmissão menores do que aquelas disponíveis em redes cabeadas;
- **Conectividade Variável no Tempo:** a conectividade da rede é dependente de fatores como sua densidade em determinado ponto, a velocidade de deslocamento

dos nós, o sentido desse deslocamento e o raio de alcance dos dispositivos móveis instalados nestes veículos;

- **Cooperação:** a funcionalidade da rede recai totalmente sobre a cooperação dos veículos que a compõe. Sem a participação destes, as informações geradas não se tornam de conhecimento geral;
- **Escala:** com milhares de veículos distribuídos por todos os lugares, as VANETs podem se tornar a maior rede *ad hoc* existente;
- **Mobilidade Organizada:** diferentemente das MANET tradicionais, os membros de uma rede veicular não se movimentam de maneira aleatória, mas sim dentro de vias de tráfego existentes e sob a regência de leis de circulação;
- **Topologia Dinâmica:** a alta mobilidade dos nós faz com que a topologia das VANET mude rápida e frequentemente;
- **Recursos Energéticos e Computacionais:** ao contrário das MANET tradicionais, as VANET possuem recursos suficientes para as aplicações desenvolvidas; e
- **Segurança:** com o acesso compartilhado no meio, essas redes são muito mais suscetíveis a ataques do que as redes cabeadas convencionais.

A arquitetura das redes veiculares¹ define a maneira como os nós se organizam e se comunicam, podendo ser classificada em três principais modos: *ad hoc* puro, infraestruturado ou híbrido (FAN; Wang YU, 2007).

- **Ad hoc Puro:** além de geradores de informação, os automóveis funcionam também como roteadores, encaminhando o tráfego através de múltiplos saltos. A comunicação V2V (do inglês, *Vehicle-to-Vehicle*) é realizada sem a presença de um elemento centralizador;
- **Infraestruturado:** utiliza nós estáticos distribuídos ao longo da via, que funcionam como pontos de acesso. Estes dispositivos podem atuar tanto na geração de novas informações quanto no roteamento de dados gerados por terceiros. Estes nós centralizam todo o tráfego da rede, servindo como nós intermediários das comunicações. Esta forma de comunicação é chamada de V2I (do inglês, *Vehicle-to-Infrastructure*); e
- **Híbrido:** é utilizada uma infraestrutura mínima para aumentar a conectividade e prover alguns serviços de rede, como interconexão, por exemplo. Neste modo, há também a possibilidade dos veículos se comunicarem por múltiplos saltos.

¹ Deste ponto em diante, será utilizado o termo redes veiculares para se referir as redes interveiculares.

As redes veiculares trazem inúmeras aplicações que podem ser divididas em duas categorias (JAKUBIAK; KOUCHERYAVY, 2008): **conforto e segurança**. Aplicações voltadas ao conforto procuram melhorar o bem estar e comodidade dos passageiros. Neste aspecto podem ser incluídos os pontos de interesse (do inglês, *Points Of Interest* (POI)), assim os nós podem receber dados de veículos comerciais e da infraestrutura rodoviária sobre seus negócios. Empresas (shoppings, restaurantes, postos de combustível e hotéis) podem configurar *gateways* estacionárias para transmitir dados de marketing para clientes em potencial que passam pela via. A característica importante de aplicações de conforto/comercial é a de que essas não devem interferir nas aplicações de segurança. Neste contexto, a priorização de tráfego e uso de diferentes canais físicos é uma solução viável.

Segundo Jakubiak e Koucheryavy (2008), as aplicações relacionadas à segurança podem ser agrupadas em três classes principais: **assistência** (navegação, prevenção cooperativa de colisões e mudança de faixa de rodagem), **informação** (limite de velocidade) e de **alerta** (pós acidente, obstáculos, ou avisos referentes às condições da via). Essas aplicações geralmente exigem comunicação direta devido ao seu caráter crítico. Nestas aplicações, os principais desafios são reduzir o tempo de divulgação de notificações de forma que o condutor possa reagir de acordo com o potencial obstáculo e garantir a integridade destas notificações. Dentre as classificações das aplicações, este trabalho foca nas que têm como objetivo a segurança do trânsito.

2.1.1 Organização da Comunicação

A comunicação em redes veiculares pode ser organizada para maximizar a eficácia no encaminhamento de informações. Protocolos da camada de rede devem ser cuidadosamente selecionados para oferecer uma organização que leve a uma utilização eficiente dos limitados recursos do canal sem fio, sem comprometer a conectividade de rede (WILLKE *et al.*, 2009).

Segundo Kaixin e Gerla (2002), a comunicação nas redes veiculares é organizada em modo plano ou hierárquico. Na organização plana, os nós estão em um mesmo nível. Todos eles têm a mesma função dentro da rede. O envio de mensagens desta rede ocorre por meio de difusão, utilizando mecanismos de inundação. Na Figura 2, pode ser observado como os nós são organizados em uma comunicação plana. A utilização da organização plana em redes veiculares traz a perda de escalabilidade, devido ao grande número de transmissões e retransmissões geradas durante a comunicação.

Já na organização hierárquica, os nós da rede são separados em grupos (*clusters*). Nesses grupos, os nós podem assumir diferentes funções. Em um grupo existirá o nó que assumirá a função de líder. Este nó será responsável pela disseminação das mensagens dentro do seu grupo, como pode ser observado na Figura 3. Os líderes

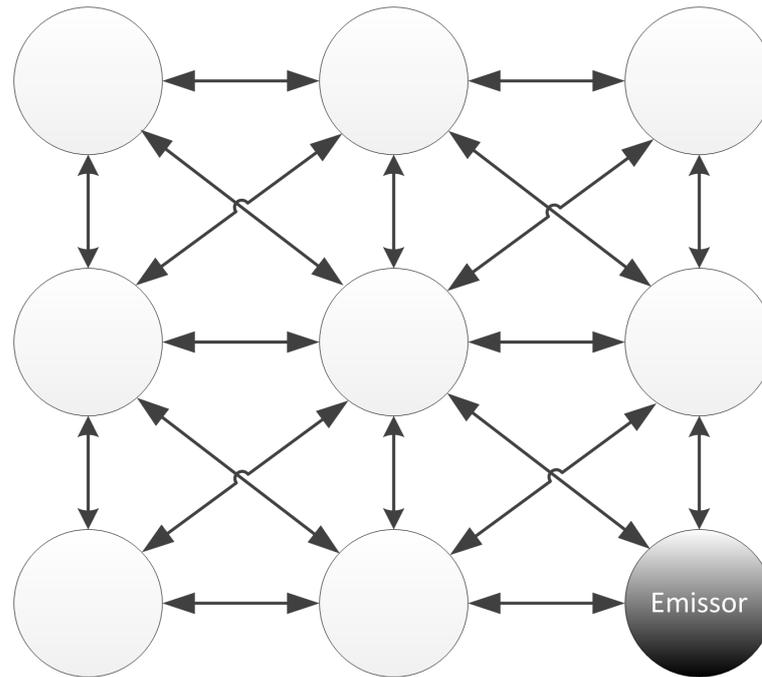


Figura 2 – Organização plana

podem se movimentar juntamente com os veículos ou serem fixados em certos locais, tais como intersecções. Os protocolos apresentados nos trabalhos (CHISALITA; SHAH-MEHRI, 2002; WAI; SHENGWEI, 2005; REUMERMAN *et al.*, 2005), apoiam ambas as definições.

O primeiro nível de hierarquia é tipicamente um protocolo de encaminhamento, que liga os grupos diferentes. As mensagens podem ser enviadas por veículos *gateways*, e *clusters* adjacentes podem utilizar a comunicação em malha para reduzir a latência de encaminhamento, como na abordagem proposta em (DURRESI *et al.*, 2005). Um inconveniente proveniente destes agrupamentos é o *overhead* necessário para formar e manter a organização. Como um exemplo de formação, o primeiro veículo a transmitir uma mensagem pode eleger-se líder e depois definir que seu grupo seja todos os vizinhos a dois saltos de distância.

No trabalho (DURRESI *et al.*, 2005), *beacons* (mensagens de controle) são utilizados para estabelecer os limites de comunicação. Ao contrário da comunicação plana, a comunicação hierárquica melhora a escalabilidade. Se houver problemas de comunicação, estes são tratados dentro do grupo, evitando que se propaguem pela rede (OHTA *et al.*, 2003). Os pelotões veiculares podem utilizar ambos modos de organização na comunicação de dados e serão apresentados com mais detalhes na Seção 2.2.3.

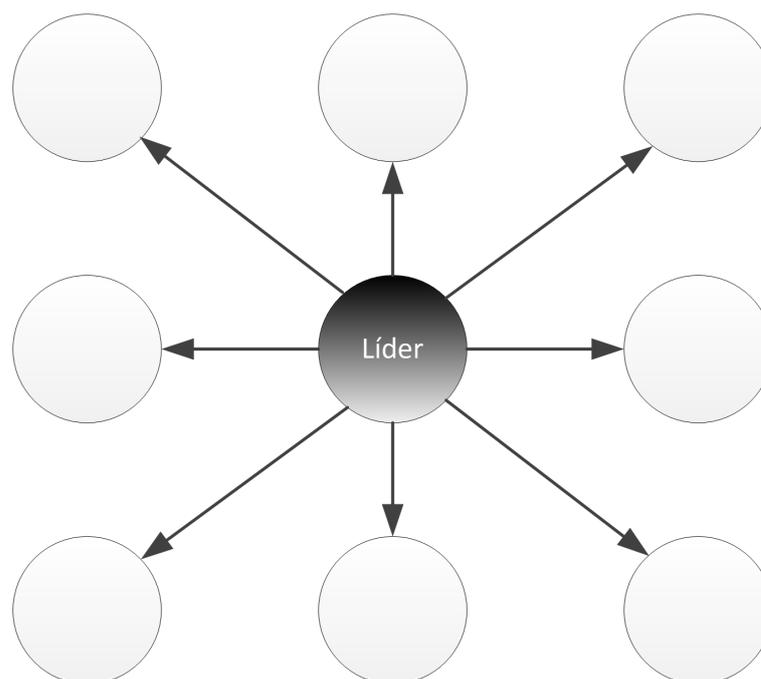


Figura 3 – Organização hierárquica

2.1.2 Padrões de Comunicação

Em 2004, com o objetivo de normatizar as comunicações em redes veiculares, foi definido o padrão IEEE 802.11p WAVE (do inglês, *Wireless Access in the Vehicular Environment*). Na Figura 4 pode se observar a pilha de protocolos WAVE. A arquitetura WAVE é definida por diversos documentos, conforme descrito a seguir (WEIL, 2009):

- **IEEE P1609.0:** descreve a arquitetura WAVE. Este documento define o funcionamento dos padrões e os serviços necessários para que os dispositivos possam se comunicar, utilizando os múltiplos canais DSRC (do inglês, *Dedicated Short-Range Communication*) em um ambiente de alta mobilidade.
- **IEEE P1609.1:** especifica serviços e interfaces da aplicação de gerenciamento de recursos. Seu objetivo principal é favorecer a interoperabilidade de aplicações WAVE, de forma a simplificar as Unidades de Bordo, reduzindo seu custo e aumentando o desempenho. Essa comunicação permite o acesso a recursos como memória, interfaces de usuários e interfaces com outros dispositivos no veículo.
- **IEEE P1609.2:** refere-se aos serviços de segurança para as aplicações e o gerenciamento de mensagens. Este documento define os métodos de processamento e os formatos das mensagens de segurança utilizados pelos sistemas WAVE e DSRC. O documento também descreve como prover segurança para as mensa-

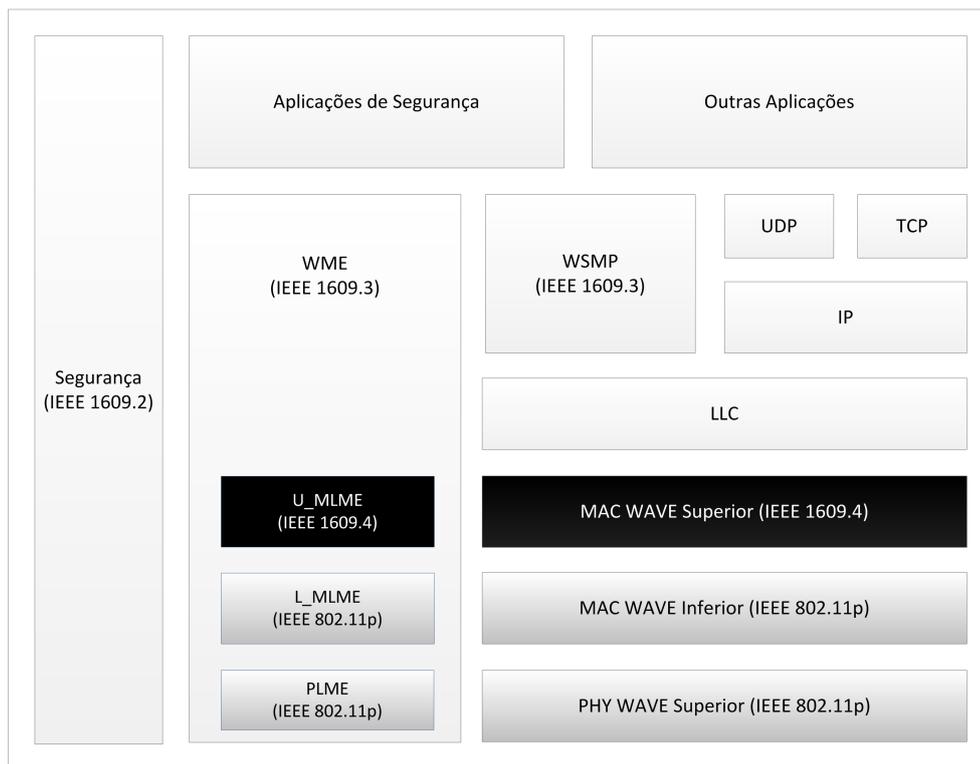


Figura 4 – Pilha de Protocolos WAVE (WEIL, 2009)

gens de aplicações e de gerenciamento, bem como as funções necessárias para suportar mensagens seguras.

- **IEEE P1609.3:** especifica os serviços para as camadas de rede e de transporte, como o roteamento e endereçamento com suporte a troca de mensagens seguras. Este padrão também define um conjunto de funções de gerenciamento, denominado *WAVE Management Entity (WME)*, que deve ser utilizado para prover serviços de rede, e uma base de informações de gerenciamento.
- **IEEE P1609.4:** define modificações no padrão IEEE 802.11, para a operação em múltiplos canais que utilizam o protocolo 802.11p (controle de acesso ao meio e camada física) para a arquitetura WAVE.
- **IEEE 1609.11:** define os serviços e o formato das mensagens necessárias para utilização de sistemas de pagamentos eletrônicos seguros.
- **IEEE 1609.12:** especifica os valores dos identificadores que foram alocados para os sistemas WAVE (WEIL, 2009).
- **IEEE 802.11p:** extensão da família de protocolos IEEE 802.11, baseando-se principalmente na extensão IEEE 802.11a e opera na frequência de 5,9 GHz. Na arquitetura WAVE, é responsável pela definição das diferenças específicas do controle de acesso ao meio em relação ao padrão 802.11 tradicional.

2.1.3 Disseminação de Dados

Após a obtenção de informações de diferentes sensores, uma visão do entorno de um veículo pode ser criada. No entanto, não só o veículo que obteve esta informação terá estes dados, mas também outros veículos devem ser capazes de adaptar seu comportamento com base nestas informações coletadas (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2010). Desta forma, estas informações podem ser enviadas a outros veículos interessados ou dependentes destas informações. Segundo Hartenstein e Laberteaux (2010), foram definidas cinco principais abordagens para disseminação de dados em redes veiculares, a saber:

- **Flooding:** abordagem de difusão de dados muito rápida em que cada nó que recebe um dado simplesmente o reenvia. Para evitar a duplicação infinita de pacotes, cada nó irá transmitir um dado pacote apenas uma vez. Além disso, o TTL (do inglês, *Time-To-Live*) pode ser usado para limitar o número de saltos que o pacote pode dar na rede. Nesta abordagem há uma grande quantidade de pacotes redundantes, o que potencialmente pode levar ao congestionamento da rede. Este problema é abordado por Ni *et al.* (1999) e é chamado de *broadcast storm*.
- **Request/reply:** nesta abordagem, um veículo pede explicitamente uma informação específica enviando uma mensagem de requisição (*request*). O destino final do pacote pode ser conhecido. Por exemplo, o usuário pode solicitar os preços do combustível de determinado posto em suas proximidades. Desta maneira, o posto, ao receber a requisição dos preços, irá responder (*reply*), tendo como destino o nó que realizou a requisição (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2010).
- **Clustering:** esta abordagem de agrupamento organiza a rede de forma hierárquica, criando grupos (*clusters*). Dentro destes grupos são eleitos líderes responsáveis por disseminar informações dentro e fora do grupo, diminuindo assim a quantidade de mensagens geradas na rede e isolando problemas de conectividade, uma vez que estes problemas irão afetar apenas o *cluster* e não a rede como um todo (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2010).
- **Sharing:** nesta abordagem, as informações disseminadas são armazenadas em determinados pontos e compartilhadas somente nas proximidades destes pontos. Nós interessados nas informações armazenadas fazem requisições e, desta forma, podem receber as informações de seu interesse. A duplicação de informação pode ser controlada dinamicamente (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2010).
- **Beaconing:** é a troca de informações por nós que integram na rede. Esta troca é feita por meio de *beacons* que são pequenos pacotes de dados que armaze-

nam informações pertinentes aos nós. Estas trocas podem ser feitas de forma periódica ou adaptativa. Estes *beacons* podem ser utilizados para povoar listas de vizinhos ou até mesmo serem utilizados como mensagens de requisição (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2010).

2.1.4 Disseminação Confiável de Dados

O mecanismo de disseminação de mensagens (*broadcast*) é muito usado no âmbito das redes veiculares. Muitas aplicações voltadas às VANETs disseminam dados pela rede sem conhecer a identificação dos nós que efetivamente receberão estes dados. Muitas aplicações de segurança para rodovias utilizam difusão para alertar os condutores de perigos à frente (KOSCH, 2004).

De acordo com J.-M. Chang e Maxemchuk (1984), os protocolos voltados à disseminação de informações são divididos em duas classes, protocolos de difusão não confiável e de difusão confiável. Os protocolos de difusão não confiáveis oferecem melhor esforço, desta forma, priorizam a disseminação da informação sem garantir a entrega dos dados a todos os nós existentes na rede (J.-M. CHANG; MAXEMCHUK, 1984). Já Koubek *et al.* (2010) definem que um protocolo de difusão confiável deve garantir a entrega de uma mensagem a todos os nós pertencentes a uma rede, dentro de um intervalo de tempo, mesmo operando em um meio compartilhado, não confiável e sem fio. O protocolo também deve garantir taxas de entrega elevadas para mensagens prioritárias em todas as densidades veiculares existentes na via (KOUBEK *et al.*, 2010).

Em aplicações de segurança no trânsito, o tempo é um requisito crítico e a confiabilidade é extremamente importante, pois a entrega confiável de mensagens pode evitar novos acidentes (XU *et al.*, 2004; ALSHAER; HORLAI, 2005). Diante deste cenário, conceber um protocolo que possa entregar mensagens de uma única fonte para cada nó em sua faixa de transmissão com maior confiabilidade possível e com latência mínima apresenta-se como um desafio.

Ao longo dos últimos anos (2005-2019), surgiram uma série de protocolos de transmissão de dados para redes veiculares relatados na literatura. Segundo Panichpapiboon e Pattara-Atikom (2012), geralmente estes protocolos podem ser divididos em duas categorias principais: abordagens *multi-hop*; e *single-hop*.

Um grande contraste entre estes dois tipos de abordagens está na forma como a informação é disseminada na rede. Na transmissão *multi-hop*, uma mensagem se propaga através da rede por meio de inundação. Em geral, quando um veículo transmite uma mensagem, alguns dos veículos próximos da fonte se tornarão os próximos veículos a retransmitir a mensagem. Da mesma forma, depois que um nó de retransmissão retransmite a informação, alguns dos veículos em sua vizinhança difundirão novamente a mensagem. Como resultado, a mensagem poderá propagar-se da fonte

para os outros veículos distantes. Segundo Panichpapiboon e Pattara-Atikom (2012), os protocolos *multi-hop* podem ser baseados em três tipos:

- **Delay-Based Multi-hop Broadcasting:** na abordagem baseada em atraso, um atraso de espera diferente antes da retransmissão da mensagem é atribuído a cada veículo receptor;
- **Probabilistic-based Multi-hop Broadcasting:** na transmissão baseada em probabilidade, cada veículo retransmite ou não a mensagem de acordo com a sua probabilidade de retransmissão atribuída; e
- **Network Coding-Based Multi-hop Broadcasting:** a codificação de rede é uma generalização de roteamento em que os nós podem gerar dados de saída codificando dados de entrada recebidos anteriormente. Assim, a codificação de rede permite a agregação de mensagens em um nó.

Na transmissão em um único salto (*single-hop*), os veículos não utilizam inundação. Em vez disso, quando um veículo recebe uma mensagem, mantém a informação em seu banco de dados. Periodicamente, cada veículo seleciona alguns dos registros em sua base de dados para transmitir. Assim, com a transmissão em um único salto, cada veículo irá transportar a informação consigo mesmo enquanto viaja, e essa informação será transferida para outros veículos de sua vizinhança a um salto de distância nos próximos ciclos de transmissão. Portanto, um protocolo de transmissão *single-hop* depende muito da mobilidade do veículo na disseminação da informação. Ainda de acordo com Panichpapiboon e Pattara-Atikom (2012), os protocolos *single-hop* podem ser classificados em duas subcategorias:

- **Fixed Broadcast Interval:** nestas abordagens é definido *a priori* um intervalo fixo entre retransmissões; e
- **Adaptive Broadcast Interval:** o intervalo entre as retransmissões é adaptado de acordo com parâmetros obtidos em tempo de execução, como taxa de perda de pacotes, sobrecarga da rede e densidade veicular.

Segundo Galaviz-Mosqueda *et al.* (2014), os protocolos voltados à disseminação de informações são classificados como **beaconless** ou **beacon-assisted**. Basicamente, os protocolos *beaconless* usam apenas informações contidas na mensagem disseminada para decidir qual nó será o retransmissor. Por outro lado, os protocolos *beacon-assisted* aproveitam as mensagens de controle que cada nó na rede transmite periodicamente. Além disso, os protocolos *beacon-assisted* podem ser classificados como **sender-oriented** ou **receiver-oriented** (GALAVIZ-MOSQUEDA *et al.*, 2014).

Nas abordagens *receiver-oriented*, a decisão de retransmissão é feita em cada nó quando a mensagem é recebida. Contrastantemente, em protocolos *sender-oriented*, o próximo conjunto de nós de retransmissão é escolhido *a priori* no nó transmissor anterior. Nos protocolos *beaconless* e *beacon-assisted*, as decisões de retransmissão podem ser feitas com base em parâmetros operacionais como distância, densidade de vizinhos, temporizadores ou alguma combinação dos parâmetros anteriores (GALAVIZ-MOSQUEDA *et al.*, 2014).

2.1.5 Controle de Carga

Ao analisar o trabalho de Panichpapiboon e Pattara-Atikom (2012), pode se observar que um dos pontos estudados atualmente na área das redes veiculares é o desenvolvimento de protocolos de disseminação de dados que podem lidar (e prevenir) a sobrecarga da rede. Os protocolos que não ajustam a carga da rede em tempo real podem de fato saturar a rede, o que por sua vez pode prejudicar o funcionamento das aplicações voltadas à segurança no trânsito. Por esta razão, na literatura científica e na padronização há várias abordagens diferentes que lidam com o controle de congestionamento em redes veiculares.

A ideia principal é monitorar o uso (potencial) da rede através de métricas diferentes, que incluem, por exemplo: (i) com que frequência as mensagens são duplicadas; (ii) até que ponto a mensagem pode se propagar; e (iii) quão rápido a mensagem pode ser difundida. Além disso, para ter protocolos confiáveis e que tratam a sobrecarga da rede, é importante saber se as mensagens difundidas são entregues a todos os nós (NA NAKORN; ROJVIBOONCHAI, 2010). Uma das contribuições desta tese é o desenvolvimento de um protocolo de difusão confiável e que busca prover controle de congestionamento na rede veicular para aplicações que usam a abordagem de pelotões.

Na literatura pode se encontrar abordagens que analisam a rede e que definem ações para diminuir a sobrecarga. As abordagens diferem em quais aspectos são levados em consideração para definir suas ações de controle, e quais ações de controle devem ser tomadas para prover controle de carga. O ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) definiu padrões para a comunicação veicular na Europa, em seu pacote de protocolos ITS-G5, desenvolveu o DCC (do inglês, *Distributed Congestion Control*). O protocolo e as regras relacionadas à geração de mensagens de controle são definidas em (ETSI, 2014). Para lidar com o congestionamento do canal, o DCC pode adaptar a taxa de *beacons*, a potência de transmissão e o esquema de modulação. O DCC implementa controles de potência de transmissão, de disseminação de *beacons* e taxa de transmissão. Juntamente com os controles citados anteriormente, a versão mais recente inclui um conjunto de regras baseadas na dinâmica dos veículos para desencadear trocas de *beacons*. O padrão define uma máquina de estado, que

rege os controles do algoritmo. O DCC, com base na ocupação do canal, escolhe qual estado ativar.

Já C. Sommer *et al.* (2015) propuseram o protocolo DynB (*Dynamic Beaconing*), que busca manter a carga do canal sob controle. O DynB difere do DCC em alguns aspectos, tais como, adaptar apenas o intervalo de *beacons* sem agir nos parâmetros da camada PHY, além de calcular o intervalo de *beacons* de acordo com ocupação do canal e o número de veículos vizinhos. Além do DCC e DynB, na literatura, pode se encontrar diferentes abordagens para resolver o problema do congestionamento nas redes veiculares. Por exemplo, o LIMERIC (*Linear MESSage Rate Integrated Control*) (G. BANSAL *et al.*, 2013) é um protocolo de controle que monitora a carga do canal ao longo do tempo e reduz ou aumenta a taxa de *beacons* se a carga for maior ou menor do que a desejada. A abordagem LIMERIC tenta manter a carga do canal em um nível desejado, a fim de fornecer uma garantia mínima a todas as aplicações. No entanto, não dá preferência a aplicações específicas. A abordagem D-FPAV (*Distributed Fair Power Adjustment for Vehicular*) também adapta a potência de transmissão de acordo com a carga do canal (TORRENT-MORENO *et al.*, 2009).

A abordagem proposta por C. L. Huang *et al.* (2010) usa um mecanismo preditivo baseado em estatísticas da rede e define o mecanismo chamado de STE (*Suspected Tracking Error*). No STE, o veículo calcula a probabilidade de transmissão para o próximo intervalo de tempo. Além disso, o algoritmo adapta a potência de transmissão com base na carga do canal atualmente detectada. A ideia é que a carga do canal está correlacionada com a densidade veicular: uma maior carga deve ser causada por uma maior densidade de veículos. Para controlar a carga, o algoritmo diminui a potência de transmissão, mas, em condições de alta densidade, os veículos ainda poderão alcançar os vizinhos mais próximos, os quais são os mais importantes do ponto de vista de segurança. Gaurav Bansal *et al.* (2013) propuseram a abordagem EMBARC (*Error Model based Adaptive Rate Control*), que utiliza um conceito semelhante ao STE.

Zemouri *et al.* (2014) propuseram uma abordagem que leva em consideração a ocupação do canal e as perdas de pacotes. Com esses parâmetros, o algoritmo reduz a taxa de *beacons* tentando convergir para um valor alvo. O algoritmo então adapta a potência de transmissão até atingir o valor desejado relacionado à carga do canal. No trabalho desenvolvido por Sepulcre *et al.* (2014), foi desenvolvido um protocolo dinâmico que permite cada aplicação informar ao protocolo seu próprio requisito de atualização. Os requisitos, como por exemplo, densidade veicular e taxa de perda de pacotes, são então levados em consideração para calcular a taxa de *beacons*.

L. Zhang e Valaee (2014) propõem uma abordagem de otimização distribuída que adapta a probabilidade de transmissão p-persistente. O problema de otimização é baseado em uma função de utilidade que leva em consideração o benefício da

segurança e o atraso esperado.

2.1.5.1 Codificação de Rede

Na disseminação de dados, a informação é armazenada por nós intermediários e em um segundo momento encaminhada para os nós seguintes até chegar a seu destino (YEUNG; CAI, 2006). Nos trabalhos (AHLWEDE *et al.*, 2000; YEUNG; CAI, 2006), constatou-se que o processamento destas informações para aumentar a vazão dos dados nos nós intermediários podem trazer benefícios na difusão dos dados, dando origem à técnica de codificação de rede (do inglês, *Network Coding*). Nesta técnica, os dados que são independentemente produzidos e consumidos não precisam ser necessariamente mantidos separados enquanto são transportados pela rede. Há maneiras de combiná-los e depois extrair as informações originais de forma independente (AHLWEDE *et al.*, 2000), tendo como benefício o controle de carga, vazão, segurança e desempenho (FRAGOULI; SOLJANIN, 2007).

Os primeiros benefícios da codificação de rede foram demonstrados em termos de vazão em uma rede *multicast*, através da rede borboleta (AHLWEDE *et al.*, 2000). A rede borboleta (AHLWEDE *et al.*, 2000), representada na Figura 5, é uma rede de comunicação na forma de um grafo direcionado, no qual os vértices correspondem aos nós da rede e as arestas representam os canais. A rede é composta por duas fontes $F1$ e $F2$ e dois destinos $R1$ e $R2$. Assume-se que as fontes $F1$ e $F2$ podem enviar somente um bit por instante de tempo, denotados por $b1$ e $b2$, respectivamente. Se o receptor $R1$ utiliza todos os recursos da rede para si próprio, ele pode receber a informação de ambas as fontes, de acordo com o apresentado na Figura 5 (a). O mesmo acontece para o receptor $R2$ na Figura 5 (b). Agora, se ambos os receptores precisam receber os sinais de ambas as fontes, há uma limitação no ramo AB , visto que através deste ramo pode-se enviar somente um bit por instante de tempo e deseja-se enviar simultaneamente o bit $b1$ para o receptor $R2$ e o bit $b2$ para o receptor $R1$.

Na Figura 5 (c), o nó A pode realizar a operação XOR (adição no campo binário, denotada por \oplus) com os bits $b1$ e $b2$ e criar um terceiro bit $b3 = b1 \oplus b2$. O receptor $R1$ poderia recuperar $b1$ e $b2$ ao receber $b1$ e $b1 \oplus b2$. De forma análoga, o receptor $R2$ poderia recuperar $b1$ e $b2$ a partir de $b2$ e $b1 \oplus b2$. O exemplo mostra que ao permitir que nós intermediários combinem informações e as mesmas possam ser extraídas nos receptores, um ganho em termos de taxa de transmissão é obtido. Trabalhos como (R. OLIVEIRA *et al.*, 2011; CRUZ *et al.*, 2012) utilizam o XOR para melhorar o roteamento de mensagens em redes veiculares, já Z. Zhang *et al.* (2011) e R. Oliveira *et al.* (2014), utilizam o XOR para diminuir a quantidade de reenvios em redes sem fio. Nesta tese, busca-se utilizar a codificação de rede com o intuito de diminuir a quantidade de mensagens em um cenário veicular.

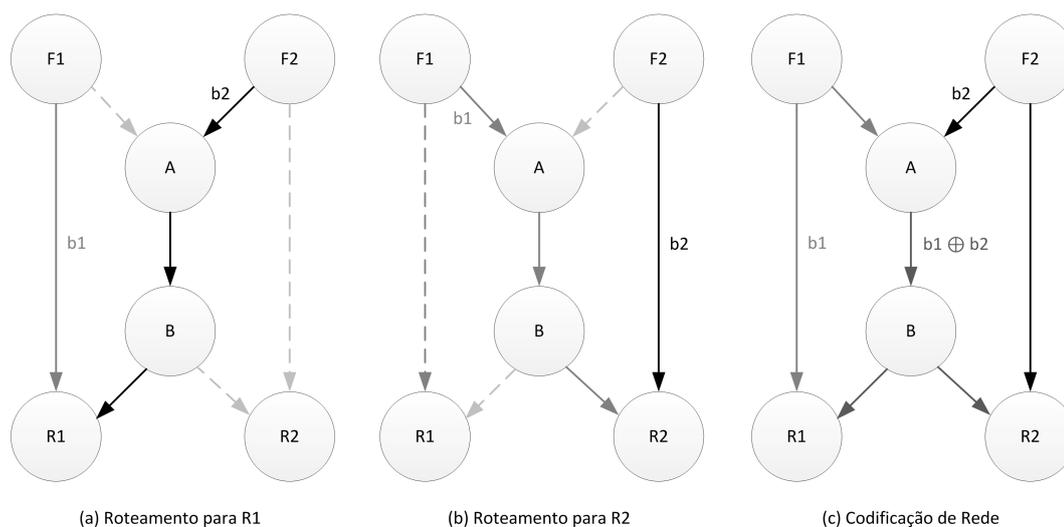


Figura 5 – Rede borboleta. As fontes $F1$ e $F2$ realizam a difusão de suas mensagens para os receptores $R1$ e $R2$

2.2 SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES

Conforme definido pela União Europeia (EESC, 2011), os ITSs são sistemas em que as tecnologias da informação e da comunicação são aplicadas no domínio dos transportes, incluindo infraestruturas, veículos e utilizadores, gestão do tráfego e gestão da mobilidade. O IEEE (2009) define os ITSs como sistemas que utilizam tecnologias sinérgicas e conceitos de engenharia de sistemas para desenvolver e melhorar sistemas de transporte de todos os tipos.

Apesar dos grandes esforços no planejamento urbano, de infraestrutura rodoviária e nos sistemas rodoviários, o transporte rodoviário é constantemente uma fonte de frustração devido a vários problemas como os acidentes devido a falhas humanas (E. ANAGNOSTOPOULOS, 2011). Uma revisão da literatura relacionada indica um grande interesse em várias aplicações e áreas de pesquisa, incluindo planejamento de sistemas, modelagem de tráfego de veículos e condução autônoma. Os ITSs se mostram o caminho para o aumento da eficiência e segurança nas estradas, pois o uso da eletrônica e das telecomunicações tornou-se extremamente comum e os veículos se integram cada vez mais com sistemas eletrônicos de segurança e informação. O custo e a complexidade do desenvolvimento e implantação de novas tecnologias e serviços foram radicalmente reduzidos e pesquisas têm abordado muitas das preocupações de confiabilidade e segurança (E. ANAGNOSTOPOULOS, 2011).

2.2.1 Sistema Rodoviário Automatizado

O AHS (do inglês, *Automated Highway System*) é um sistema de transporte projetado com metas futuras e inúmeros benefícios futuros. A tecnologia AHS deriva

uma nova relação entre os meios de transporte e as redes rodoviárias. É uma técnica que utiliza um sistema de controle automático para a operação de veículos. Diferentes técnicas relacionadas com ideias de computação, microeletrônica, vários sensores e técnicas avançadas de engenharia civil são usadas para a concepção de um sistema rodoviário automatizado (J. HUANG *et al.*, 2017).

Os componentes principais operados mecanicamente de um veículo – isto é, o acelerador, a direção e a travagem – são automaticamente acionados por um sistema rodoviário automatizado e permitem a formação de pelotões inteligentes ao longo da rodovia. Na Figura 6 pode-se observar alguns desses componentes (FENTON, 1980):

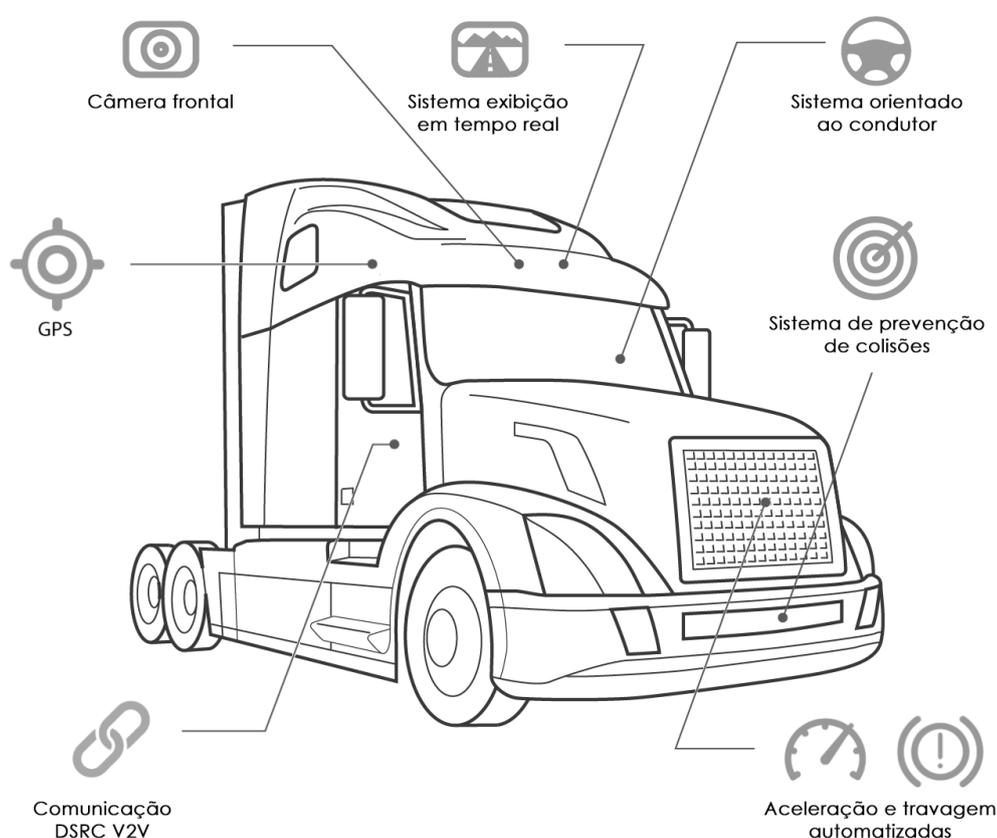


Figura 6 – Sistema Rodoviário Automatizado (componentes)

- **Câmera frontal:** uma câmera de vídeo permite que os condutores tenham acesso às visões dos outros veículos na tela do sistema.
- **Sistema de exibição em tempo real:** os condutores usam a tela do sistema para identificar oportunidades para ingressarem em possíveis pelotões. O condutor que está em um veículo com visão obstruída por conta dos outros veículos do pelotão, pode observar a visão do líder em tempo real.

- **Sistema orientado ao condutor:** o sistema garante que apenas condutores treinados e credenciados possam ingressar no pelotão.
- **GPS (*Global Positioning System*):** o sistema de posicionamento altamente preciso fornece dados de localização, aumentando a segurança do controle do veículo e a funcionalidades baseadas na localização.
- **Sistema de prevenção de colisões:** um radar montado no para-choque dianteiro de cada veículo acompanha dezenas de objetos simultaneamente, monitorando constantemente a via à frente. No caso de uma desaceleração repentina ou obstáculo, o sistema pode acionar os freios mais rápido do que a reação humana.
- **Aceleração e frenagem automatizadas:** um controlador de aceleração e de frenagem permite que o sistema mantenha uma folga constante entre dois veículos do pelotão. Este sistema combinado com o sistema de prevenção de colisões permite que a distância entre os veículos seja menor.
- **Comunicação DSRC V2V:** módulos de comunicação entre veículos que permitem a troca de informações entre os membros do pelotão.

A exigência principal de todas as facilidades do tráfego, tais como, o movimento coordenado dos veículos, a remoção dos obstáculos, o sistema de tráfego improvisado e a segurança são inerentemente fornecidos por um sistema rodoviário automatizado. As técnicas de inteligência recém introduzidas são altamente utilizadas para interligar o sistema rodoviário e os veículos em funcionamento nessas redes rodoviárias. A utilização deste sistema é controlada por sistemas mecânicos e controles por rádio (TURAN *et al.*, 2012).

O incremento na capacidade dos veículos que funcionam na rodovia com o sistema de tráfego totalmente controlado é o conceito básico usado para o projeto do sistema rodoviário automatizado. Com relação ao comportamento dos condutores humanos, o conceito inovador de sistema rodoviário automatizado tem desempenhado papel crucial na gestão da rede de transporte em cidades desenvolvidas (J. HUANG *et al.*, 2017).

O sistema rodoviário automático vem sendo implementado em muitas cidades e se tornou uma técnica importante para a gestão da rede de tráfego. Algumas metas para a introdução desta técnica no projeto de rodovias são brevemente descritas a seguir (TURAN *et al.*, 2012):

- Melhoria da segurança e redução dos acidentes que causam mortes, incidentes pessoais graves, estresse na condução e outras mazelas;

- Conservação ambiental devido à diminuição do consumo de fontes de energia não renováveis, como combustíveis fósseis;
- Os veículos que utilizam fontes de energia alternativas que podem ser operadas com eletricidade podem ser usados em sistemas rodoviários automatizados; e
- Otimização do projeto da rede rodoviária, bem como dos veículos, o que ajuda a reduzir os custos de construção e a maximizar os benefícios.

O sistema rodoviário automatizado utiliza três tipos diferentes de rede rodoviária com base no número de pistas na estrada (J. HUANG *et al.*, 2017):

- **Autoestrada de via única:** Este tipo de autoestrada consiste em uma única pista com funcionamento automatizado e existe controle sobre a velocidade longitudinal do tráfego;
- **Rodovia de pista discreta:** Este tipo de rede rodoviária consiste num número discreto de pistas automatizadas e existe um controle das velocidades longitudinais que é proporcional ao número de mudanças nas faixas; e
- **Rodovia de pista discreta com vários destinos:** Este tipo de rede rodoviária também contém uma série de pistas discretas, mas o destino final dos veículos determina o controle sobre as pistas.

A rodovia automatizada traz grandes benefícios de transporte em termos de segurança, eficiência, acessibilidade, usabilidade e meio ambiente. Uma característica chave da arquitetura do projeto de controle é a separação das várias funções de controle em camadas distintas com interfaces bem definidas. Cada camada é então projetada com seu próprio modelo que é adequado para os serviços que esta oferece. Os modelos nas várias camadas são diferentes não só em termos da sua estrutura formal (desde equações diferenciais, máquinas de estado até gráficos estáticos), mas também nas entidades que têm um papel nelas. O AHS é um complexo sistema de controle em larga escala, cujo projeto exigiu avanços nos sensores, atuadores, tecnologias de comunicação e nas técnicas de síntese e análise do sistema de controle (J. HUANG *et al.*, 2017).

De acordo com J. Huang *et al.* (2017), uma das razões pelas quais muitos programas federais como o *National Automated Highway System Research Program* (NAHSRP) falharam, foi que o programa estava preso ao otimismo da tecnologia. Relatórios do Departamento dos Transportes dos Estados Unidos sobre o AHS mostram que não há apenas riscos técnicos (S. E. SHLADOVER, 2007). Desafios jurídicos, institucionais e sociais são tão críticos quanto questões técnicas. Além disso, essas questões institucionais e sociais não podem ser resolvidas de forma breve, pois têm

muito a ver com a percepção, o comportamento, o consenso e as mudanças sociais com base nelas (S. E. SHLADOVER, 2007).

2.2.2 Aplicações Veiculares

As redes veiculares devem ser utilizadas para aumentar a segurança e também a eficiência do tráfego nas vias urbanas e rodoviárias por meio da troca de dados entre os veículos pertencentes à via (JAKUBIAK; KOUCHERYAVY, 2008). Inúmeras aplicações voltadas à segurança em rodovias foram e estão sendo desenvolvidas. Dentre essas aplicações, destacam-se as de Alertas de Perigo Local (do inglês, *Local Danger Warnings* (LDW)) devido aos benefícios que a disseminação de mensagens traz ao informar situações de perigo nas rodovias. Nas redes veiculares, a cooperação entre os nós se faz necessária para um desempenho adequado, visto que existe uma frequente troca de dados entre os veículos (KOSCH, 2004).

As aplicações de segurança no trânsito possuem requisitos estritos de latência e confiabilidade para as mensagens, devem ser robustas à inserção de mensagens falsas e serem capazes de lidar com informações conflitantes (BENSLIMANE, 2005). Kosch (2004) define uma aplicação para troca de mensagens de perigo local, que consiste em informações baseadas nas leituras obtidas pelos sensores locais dos veículos. Este tipo de aplicação mostra-se como um dos mais promissores, devido ao significativo benefício coletivo trazido pela disseminação de mensagens informando as situações de risco na via (OSTERMAIER *et al.*, 2007).

Em 2006, o consórcio CAMP (*Crash Avoidance Metrics Partnership*), que é composto por grandes fabricantes de automóveis em conjunto com o Departamento de Transporte dos Estados Unidos, iniciou o projeto VSC-A (*Vehicle Safety Communications–Applications*). Os objetivos deste projeto incluíam o desenvolvimento de padrões de comunicação e a identificação e testes de potenciais aplicações de segurança que utilizam o DSRC. O projeto resultou em uma padronização da mensagem básica de segurança SAE J2735 que contém informações importantes para aplicações de segurança como, por exemplo, posição, velocidade e aceleração (GALLER; ASHER, 1995). O projeto buscou usar estas aplicações para aumentar a segurança das rodovias, reduzir congestionamentos, diminuir a poluição do ar e consumo de energia (AHMED-ZAID *et al.*, 2011).

A NHTSA indicou oito principais aplicações de segurança de trânsito que utilizam a tecnologia DSRC (CONSORTIUM, 2005). Dentre essas, a aplicação de luz de freio de emergência (do inglês, *Emergency Electronic Brake Light Application* (EEBL)) foi indicada como sendo uma das três principais que possuem alto potencial de benefício à segurança. A EEBL é uma aplicação responsável por alertar os condutores sobre qualquer frenagem forte feita por veículos na frente deles, e cumpre o mesmo papel da luz traseira acionada pelo freio que existe nos veículos convencionais atuais

(SZCZUREK *et al.*, 2012).

Aplicações EEBL podem ser de grande importância em situações de formação de pelotão (*vehicle platooning*). A ideia básica da formação de pelotões é a de que veículos com interesses comuns podem formar cooperativamente um padrão de condução, no qual cada veículo segue o da frente, buscando manter uma distância pequena e quase constante (JIA *et al.*, 2016). As aplicações EEBL têm como alvo os condutores que estejam com a visão obstruída. Quando um veículo freia, suas luzes de freio se acendem para informar os condutores que o seguem. Se a linha de visão é obstruída, por exemplo, por um caminhão, os veículos seguidores do pelotão não conseguirão ver o sinal de frenagem, comprometendo a reação dos condutores. Em uma rodovia, essa situação pode levar a uma situação de colisões em cadeia (engavetamento). Ao usar comunicação inter-veicular, o veículo que executa a frenagem de emergência pode informar esse evento aos outros veículos, por meio da aplicação EEBL (Michele SEGATA, 2016).

Outro exemplo de sistema voltado à segurança é o ICWS (*Intersection Collision Warning System*) (JOERER *et al.*, 2014). Com esse sistema o condutor pode ser notificado se, ao se aproximar de um cruzamento, outro veículo está em curso de colisão. Se este for o caso, o condutor recebe um aviso e pode realizar uma ação para evitar um potencial acidente. Outras versões deste sistema implementam uma reação automatizada, então o sistema decide se o veículo precisa frear ou acelerar para evitar a colisão (HAFNER *et al.*, 2013). Cada sistema claramente tem diferentes requisitos de rede. No ICWS, os dados devem ser compartilhados quando se aproxima de um cruzamento, dando maior prioridade aos veículos em perigo (JOERER *et al.*, 2014). A aplicação da estratégia de *platooning* precisa de uma fonte constante e periódica de dados (MILANÉS *et al.*, 2014).

2.2.3 Pelotões Veiculares

Um pelotão é um grupo de veículos que podem viajar juntos, com segurança e em alta velocidade. Cada veículo comunica-se com os outros veículos que fazem parte do pelotão. Há um veículo líder que controla a velocidade e a direção, e todos os veículos seguintes (que têm suas ações automatizadas) respondem ao movimento do veículo principal (Michele SEGATA, 2016).

Ideias originais para os pelotões de veículos envolviam algum tipo de engate mecânico, como se fosse um trem. Porém, com o avanço da tecnologia, esta ideia acabou sendo substituída pela comunicação sem fio e técnicas de automatização. Em 1989, A Ford forneceu ao projeto PATH (*Partners for Advanced Transportation Technology*) quatro veículos para serem usados como plataformas experimentais para o controle longitudinal automático em um pelotão curto (S. E. SHLADOVER, 2007). Os pesquisadores do projeto PATH equiparam esses veículos com atuadores de aceleração e

freio, radares de alcance direto e sistemas de comunicação sem fio, bem como computadores de controle e software para implementar veículos cooperativos. Em 1992, as primeiras experiências de pelotões de veículos foram concluídas com sucesso e a capacidade de pelotões de quatro veículos foi demonstrada para os visitantes nas pistas I-15 HOV em San Diego nos Estados Unidos (S. E. SHLADOVER, 2007).

A implementação de um pelotão inteligente deve levar em consideração alguns pontos: primeiro, o sistema de controle, isto é, o sistema que aciona de forma automática o veículo. Este sistema é dividido em controle longitudinal e lateral. O sistema longitudinal tem o cuidado de acelerar e frear veículo, enquanto o controle lateral cuida da direção (JIA *et al.*, 2016). O segundo ponto importante para a construção de um pelotão é a comunicação interveicular, que é utilizada pelo controle longitudinal, e é necessário para a gestão do pelotão (JIA *et al.*, 2016).

A comunicação é essencial para que o controle longitudinal permita que os veículos se aproximem de forma segura. Em sistemas baseados apenas em sensores, não é possível reduzir a distância entre os veículos a um valor suficientemente pequeno para que o pelotão seja formado. Portanto, os veículos têm a necessidade de compartilhar dados em tempo real sobre a sua dinâmica, desta forma, o sistema permite que os veículos realizem o acompanhamento a curtas distâncias. Já a gerência do pelotão é necessária para criar, fundir, dividir e interromper pelotões, e isso só pode ser realizado por meio de comunicação sem fio, entre veículos, ou entre veículos e a infraestrutura presente ao longo da rodovia (Michele SEGATA, 2016).

Os componentes restantes necessários para a implantação de um pelotão incluem monitoramento e ações por uma entidade central que pode melhorar ainda mais a eficiência. A entidade central pode, por exemplo, sugerir que veículos juntem-se a um determinado pelotão, ou determinar a velocidade que o pelotão deve viajar para maximizar a eficiência. Outro aspecto que a entidade central deve administrar é o custo, para que o pelotão seja socialmente aceitável e sustentável (Michele SEGATA, 2016).

A implantação de pelotões nas rodovias pode trazer possíveis vantagens, como por exemplo, a diminuição do arrasto aerodinâmico, além de aumentar da capacidade das rodovias. Os pelotões fornecem um fluxo de tráfego mais estável, pois os veículos estão muito próximos uns aos outros e desta maneira há redução do consumo de combustível. Como todos os veículos viajam próximos e movendo-se ao mesmo tempo, pode se obter maior eficiência quando os veículos se afastam dos semáforos. Por exemplo, quando temos condutores humanos, cada condutor espera o veículo da frente se mover, para então iniciar o processo de aceleração, este tempo de reação leva a um efeito de concertina (sanfona) reverso que gera um atraso na movimentação dos veículos (JOOTEL, 2012).

Inicialmente, cada veículo no pelotão tem um condutor em todos os momentos, mas eventualmente veículos automatizados serão capazes de se juntar automatica-

mente a pelotões e o condutor poderá desfrutar dos benefícios de ter um veículo automatizado, como ser capaz de realizar outras atividades não ligadas à condução do veículo. Além disso, a implantação de pelotões inteligentes tem o potencial de reduzir acidentes (JIA *et al.*, 2016).

Por outro lado, possíveis desvantagens podem surgir ao implementar pelotões em uma rodovia. Pelotões longos podem impedir que outros veículos mudem de faixa, mesmo que o condutor tenha ciência da manobra que o outro veículo precisa realizar, o pelotão vai exigir o controle do veículo, para que possa gerenciar a distância entre os veículos, por conta disso, pode impedir a manobra de mudança de faixa (S. E. SHLADOVER, 2007). Nenhum sistema computacional é 100 % seguro e pelotões poderiam ser desfeitos de forma repentina. Essa é uma razão pela qual um condutor deve sempre estar presente em cada veículo. Esta lógica também se aplica a veículos automatizados.

Pelotões de veículos nas cidades podem não funcionar em altas densidades, por exemplo, o veículo líder pode cruzar uma junção, mas pode não haver espaço suficiente do outro lado da junção para acomodar todos os outros veículos do pelotão, assim, o cruzamento seria bloqueado (S. E. SHLADOVER, 2007). Os pesquisadores Bergenheim *et al.* (2010) mostram que em situações de emergência que podem fazer com o que o veículo líder do pelotão pare imediatamente, fazem com que os veículos seguidores provoquem um engavetamento, já que a distância entre os veículos é muito pequena. Além disso, a inserção destes mecanismos nas rodovias poderá trazer situações como, condutores em veículos comuns tentando fazer parte de pelotões automatizados e por consequência, gerar acidentes.

Em cruzamentos que demandam a preferência de outras faixas (sem semáforos), cada um dos condutores deve parar e observar se é seguro atravessar o cruzamento. Em situações como a descrita, os pelotões seriam desfeitos a cada cruzamento. As funcionalidades providas pelos pelotões inteligentes podem ser difíceis de serem empregadas em veículos antigos que já trafegam nas rodovias. A tecnologia irá aumentar o custo de veículos novos e as companhias de seguros ainda não aceitam a responsabilidade por acidentes causados por pelotões de veículos automatizados (JOOTEL, 2012).

2.3 TEORIA DE CONSENSO

Ao decompor um problema em pedaços menores, pode-se melhorar a eficiência da execução das tarefas que compõem o problema geral. Desta forma, cada tarefa poderá ser executada por um equipamento próprio para a situação. A decomposição do objetivo de um sistema em problemas menores (descentralização) implica em se obter subtarefas que, ao serem combinadas, compõem a solução do problema. Estas subtarefas são chamadas de comportamentos (MOHSENI *et al.*, 2017). Em áreas

focadas em controle, o foco recai sobre os sistemas dinâmicos descentralizados. Com o avanço da tecnologia, surgiram trabalhos que buscaram a cooperação entre máquinas operadas remotamente.

O controle de formação foi um dos primeiros tópicos na literatura que tratavam do objetivo geral de um sistema de formação dividido em quatro partes: líder-seguidor, manutenção e formação, encontro e a navegação (S. E. LI *et al.*, 2015). O líder-seguidor define um líder na formação. Ao líder são aplicadas técnicas de controle e os membros da formação devem seguir o líder. Na manutenção, a formação do pelotão é tratada como uma única estrutura. Desta forma, o controle deve manter as distâncias entre os membros da formação. Após realizar o agrupamento dos membros, a formação deve se movimentar em direção a um destino predefinido. Já a navegação, define quais leis predefinidas os membros da formação devem seguir, para que colisões entre os membros e obstáculos possam ser evitadas. As leis de navegação podem ser de direção, velocidade e acompanhamento da trajetória. Na divisão apresentada, tem-se duas restrições importantes, temporal e espacial. Restrições espaciais, normalmente, são impostas a problemas de navegação sob a forma de obstáculos, já as restrições temporais estão ligadas, por exemplo, ao atraso de atuação ou às variações dos atrasos (jitter) (MOHSENI *et al.*, 2017). Para que haja cooperação entre os membros de uma formação, é necessária a troca de informação entre os membros (REN; BEARD, 2007).

Dentre os algoritmos de controle cooperativo, destaca-se o controle consensual. Na literatura, consenso é definido como sendo a convergência para um valor comum (REN; BEARD, 2007). Ao considerar dois nós i e j em um cenário, sendo que ambos têm opiniões que divergem sobre uma determinada ação. Neste caso, tem-se três situações: (i) o nó i tem predominância na decisão que deve ser tomada, desta forma, a decisão a ser tomada, será definida por apenas i ; (ii) o nó j tem predominância e tomará a decisão sozinho; e (iii) nenhum dos nós tem predominância, desta forma, a decisão será tomada de acordo com o consenso entre i e j .

A definição de consenso pode ser aplicada ao problema de cooperação, sendo que o consenso é atingido quando há uma convergência para um valor comum das informações compartilhadas por cada um dos nós da formação. Ao levar em consideração o exemplo exposto anteriormente, se houver um líder na formação (nó predominante), haverá convergência dos outros nós da formação para o valor da informação compartilhada pelo líder. Se não houver um líder, a convergência se dará em um valor intermediário entre os valores das informações compartilhadas entre os nós da formação. Se houver mais que um líder, o consenso não será possível (REN; BEARD, 2007).

A teoria de consenso tem sido aplicada em redes veiculares e também atraído atenção de grupos de pesquisa na comunidade acadêmica devido ao seu caráter

teórico que possibilita unificar vários problemas. Para citar alguns, tem-se controle de formação, *rendezvous* e redes de sensores móveis. As características fundamentais relacionadas com a teoria de consenso podem ser encontradas em (REN; BEARD, 2007; S. E. LI *et al.*, 2015; REZAEI; ABDOLLAHI, 2017; MOHSENI *et al.*, 2017).

Ren e Beard (2007) definem um controle consensual linear. Os autores também abordam a quantidade de informações que devem ser compartilhadas a fim de se atingir o consenso. Estas informações compartilhadas são denominadas variáveis de coordenação. Caso a topologia de implementação adotada seja a centralizada, tem-se um vetor de variáveis de coordenação global, acessível a todos os nós da formação. Caso a topologia seja descentralizada, existem variáveis de coordenação compartilhadas localmente entre grupos de nós da formação e, neste caso, o consenso deve ser buscado localmente. A quantidade de variáveis de coordenação compartilhadas por cada nó da formação define a ordem do controle de consenso (REN; BEARD, 2007).

Já Rezaee e Abdollahi (2017) abordam situações nas quais a topologia sofre com atrasos na comunicação, e os autores definem requisitos que devem ser levados em consideração para que o consenso entre os membros do agrupamento seja obtido. F. Li *et al.* (2017) propuseram uma solução para as falhas na comunicação através de filtros de Kalman que atuam como estimadores das variáveis de coordenação. No trabalho desenvolvido por W. Yu *et al.* (2017), o consenso linear de segunda ordem é apresentado. Nesse trabalho, a restrição de trocas de informações é descrita e abordada, sendo que os autores passaram a permitir apenas trocas de informações entre nós vizinhos em uma topologia descentralizada.

No trabalho de K. Liu *et al.* (2017), a consensualidade é tratada como sendo a capacidade de uma formação entrar em consenso. As condições necessárias e suficientes para que uma formação entre em consenso são deduzidas. A obtenção do consenso é verificada em redes de agentes na presença de distúrbios externos e incertezas nos modelos. O atraso na comunicação em topologia fixa também é discutido. Funções de Lyapunov e desigualdades de Riccati são utilizadas para se estabelecer critérios de robustez.

Os autores Y. H. Chang *et al.* (2011) propuseram uma lei de consenso não linear baseada nas técnicas de *Fuzzy Sliding-Mode*. O algoritmo é aplicado a redes de agentes na presença de distúrbios externos e incertezas nos modelos. Morbidi (2013) propôs uma generalização do protocolo de consenso contínuo obtido substituindo-se o Laplaciano do grafo de comunicação pelo chamado Laplaciano deformado. O Laplaciano deformado de um grafo é um polinômio matricial na variável real s , em que para os casos onde $s = 1$, recai-se no Laplaciano convencional. Já Yang *et al.* (2013) estudaram a velocidade da convergência da formação de agentes na presença de atrasos de comunicação e de computação. Os autores propuseram um algoritmo de controle para otimizar a velocidade de convergência da formação.

Pela necessidade de aplicação, o projeto de leis de controle para consenso tem um caráter primordial de ser distribuído. Em tarefas de coordenação, tanto o fluxo de informação como o compartilhamento de informação são considerados fatores fundamentais. O consenso em um sistema distribuído, no geral, pode ser definido de diversas maneiras, de acordo com as variáveis de consenso, que tratam da informação a ser modelada em prol da colaboração entre tais veículos. Essa informação pode assumir diversos valores e dimensões de acordo com o problema a ser resolvido (REN; BEARD, 2007).

A estrutura de comunicação de um pelotão veicular, por outro lado, pode ser descrita através de um grafo ou suas variações algébricas. Com isso, uma série de propriedades oriundas da teoria dos grafos podem ser utilizadas para construir redes com características específicas. Seja um pelotão veicular definido pelo grafo da Figura 7 em que cada nó representa um veículo e cada aresta indica um enlace de comunicação entre os nós. A direção da aresta representa o fluxo de informação entre os veículos, assim pode-se ter veículos que recebem e enviam informação (veículos 1, 2 e 4) e veículos que apenas recebem (veículo 5) ou apenas enviam dados para seus vizinhos (veículo 3).

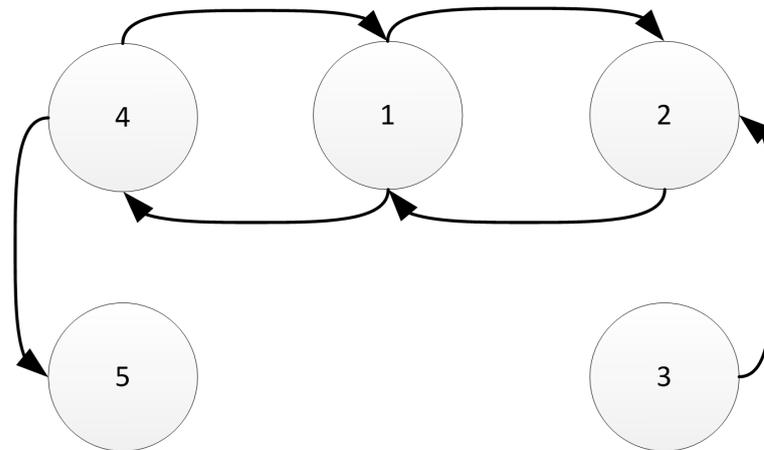


Figura 7 – Grafo representando a topologia de comunicação entre veículos de um pelotão

Essa forma de representar uma rede entre veículos pode ser modelada algebricamente através da matriz de adjacência, que relaciona cada vizinho através da sua capacidade de se comunicar com os demais membros do pelotão. Um grafo arbitrário pode ser definido como $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, onde \mathcal{V} é o conjunto de vértices ou nós desse grafo, enquanto que \mathcal{E} é o conjunto de arestas, ou seja, as ligações entre cada veículo pertencente à rede. Desta forma, define-se a matriz de adjacência denotada por \mathcal{A} para um grafo \mathcal{G} , como:

$$\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}, \quad (2)$$

onde n é o número de nós da rede e a_{ij} representa a relação de vizinhança entre o nó i e o nó j com $a_{ij} > 0$ se $(i, j) \in \mathcal{E}$ e $a_{ij} = 0$, caso contrário.

Com isso, para o grafo da Figura 7, tem-se a seguinte matriz de adjacência:

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

onde cada linha que possui o valor 1 indica que o nó equivalente ao índice da linha recebe informação do nó representado pelo índice da coluna respectiva. O valor 1 pode ser substituído por qualquer outro valor maior que zero, admitindo-se, nesse caso, regras de ponderação que podem ser utilizadas para representar as características físicas da rede.

Genericamente, tem-se que o consenso em um pelotão veicular pode ser definido por um algoritmo que convirja o estado da informação de cada veículo para um valor comum desejado. Desta forma, pode-se definir a dinâmica do algoritmo de consenso para um pelotão de n veículos representados por uma matriz de adjacência como:

$$\dot{v}_i(t) = - \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)), \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

onde a_{ij} é o valor na matriz de adjacência para os veículos i e j , t é o instante de tempo discreto, e x é a variável sobre a qual é realizado o consenso. A atualização da informação sobre a qual se deseja obter o consenso pode ser modelada como um sistema linear de primeira ordem, que utiliza como entrada o resultado da Equação 3, resultando em:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + u_i(t)\Delta t, \quad (4)$$

onde Δt é o período de amostragem e $x_i(t)$ e $u_i(t)$ são respectivamente o estado da informação e entrada de controle para o veículo i no intervalo de tempo t . É interessante notar que esse algoritmo pode ser elaborado para que apresente comportamento descentralizado, pois cada veículo i necessita apenas da informação local acerca de sua vizinhança (a_{ij}), o que o torna ideal para implementações reais. Para simplificar estas implementações é comum a representação da Equação 3 através do laplaciano da matriz de adjacência que descreve a rede, originando a Equação 5:

$$\mathcal{U} = -\mathcal{L}\mathcal{X}, \quad (5)$$

onde $\mathcal{L} = \Delta - \mathcal{A}$ é a matriz laplaciana, com $\Delta = \text{diag} \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij} \right\}$ sendo a matriz de valência para o grafo \mathcal{G} , $\mathcal{X} = \{x_0, \dots, x_n\}^T$ é o vetor de estados da informação e $\mathcal{U} = \{u_0, \dots, u_n\}^T$ o vetor de sinais de controle para todos os veículos. Uma vez que o consenso sobre x é atingido, então o estado da informação para todos os veículos da rede será o mesmo, desta forma:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i(t) - x_j(t)| = 0 \quad i, j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

No entanto, para se atingir esse consenso global, algumas condições devem ser garantidas. De fato, a maior influência ao processo de consenso sobre uma determinada variável, está na topologia de comunicação adotada pelos veículos da rede. É imprescindível que haja pelo menos uma árvore de extensão orientada na rede para que a informação se propague de forma correta (REN; BEARD, 2007).

Uma árvore de extensão é um subgrafo que conecta todos os vértices do grafo de que esta faz parte e é orientada quando esse grafo é direcionado (REN; BEARD, 2007). Assumindo que o estado da informação desejado é conhecido apenas por alguns veículos, então essa informação deve ser a raiz da árvore de extensão orientada. Desta forma, pode-se concluir que em caso de falhas de comunicação permanentes, o consenso não se realizará, sendo esta uma das principais restrições para esse tipo de algoritmo.

2.3.1 Consenso de Rastreamento

O objetivo do consenso de rastreamento é direcionar todos os estados da informação, referentes a cada veículo, do grupo para um estado de referência. Nos protocolos básicos de consenso, sabe-se que o valor de consenso está somente relacionado com a topologia da rede e de forma complementar, também com os pesos das entradas da matriz de adjacência a_{ij} , sendo, portanto, um valor desconhecido *a priori*.

Entretanto, em algumas aplicações ou até mesmo situações particulares, pode ser desejável que o consenso sobre o estado da informação convirja para um valor pré definido. Como por exemplo, em operações de cooperação para manter tempos de *headway* semelhantes entre os veículos, é preciso determinar um tempo de referência. Neste caso, a convergência deve incluir ambas situações de convergência, tanto para um valor acerca do objetivo comum do pelotão como para um valor de referência.

Uma estratégia usual para abordar o consenso de referência é considerar um mesmo grupo de veículos com ordem n e um líder virtual, o qual é denominado pelo índice $n + 1$. O estado de referência é $x_{n+1} = x_r \in \mathbb{R}^n$, em que x_r contém toda a informação relacionada ao valor de referência.

Neste caso considera-se que o estado de referência x_r é constante, e o estado

da informação é modelado com dinâmica de primeira ordem conforme Equação 7:

$$u_i = - \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i - x_j) - a_{i(n+1)}(x_i - x_r), \quad (7)$$

onde $x_i \in \mathbb{R}^m$ é o estado da informação do veículo i e a_{ij} com $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n+1$ é a entrada (i, j) da matriz de adjacência $\mathcal{A}_{n+1} \in \mathbb{R}^{n(n+1)}$. O consenso de referência em um rede veicular é alcançado se, para qualquer estado inicial $x_i(0)$ com $i = 1, \dots, n$,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i(t) - x_j(t)| = 0 \quad i, j = 1, \dots, n \quad (8)$$

e

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i(t) - x_r(t)| = 0 \quad i, j = 1, \dots, n. \quad (9)$$

Neste caso, o consenso inclui convergência tanto para um valor acerca do objetivo comum do grupo como para um valor de referência. O estado de referência x_r é conhecido por apenas parte do grupo, daí a importância de partilhar informação acerca dos estados da informação referentes a cada veículo. Evidentemente, algumas modificações na representação do dígrafo são requeridas. O dígrafo $\mathcal{G}_{n+1} = (\mathcal{V}_{n+1}, \mathcal{E}_{n+1})$ é usado para modelar as interações entre todos os $n+1$ veículos. Seja $\mathcal{A}_{n+1} \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$ a matriz de adjacência associada com \mathcal{G}_{n+1} , em que: (i) $a_{ij} > 0$ se $(j, i) \in \mathcal{E}_{n+1}$; (ii) $a_{i(n+1)} > 0$ se x_r , caso esta informação esteja disponível para o veículo i , para $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n$; (iii) $a_{(n+1)j} = 0$ para todo $j = 1, \dots, n+1$; e (iv) $a_{ii} = 0$ para todo $i = 1, \dots, n$.

Deve se considerar que se o dígrafo \mathcal{G}_{n+1} tem uma árvore de extensão orientada, o veículo $n+1$ (exemplo, veículo líder) tem a informação de referência e trata-se do veículo relacionado com o nó raiz da topologia da rede. A condição para que \mathcal{G}_{n+1} tenha uma árvore de extensão orientada é que, no mínimo, o veículo $n+1$ tenha um caminho de forma orientada para todos os outros veículos do pelotão. Esta é uma garantia para o sucesso do consenso de convergência. Nota-se que no caso dos dígrafos (exemplo, fluxo orientado), a existência da árvore de extensão orientada é uma condição mais fraca do que a condição de fortemente conectada.

No âmbito dos pelotões veiculares, o campo de possíveis aplicações de controle consensual é extenso. Trabalhos como (CHEBOTAREV, 2010; FERNANDES; NUNES, 2010; LEI *et al.*, 2011a; SZALAI; Gabor OROSZ, 2013; BERNARDO *et al.*, 2016; L. ZHANG; G. OROSZ, 2016) tratam da estabilidade de pelotões por meio de controles cooperativos e consensuais. Neste trabalho, pretende-se desenvolver uma abordagem de controle cooperativo baseado nas técnicas consensuais lineares para resolver problemas nos quais se deseja controlar a distância relativa entre os nós de um pelotão e ainda manter a estabilidade da formação.

2.4 CONTROLE DE PELOTÕES VEICULARES

Um sistema de controle regula ou supervisiona outros sistemas (ver Figura 8), atuando em algumas entradas para alcançar o objetivo desejado. Os sistemas de controle são usados para realizar uma enorme quantidade de tarefas, por exemplo, nas tarefas da vida cotidiana, desde a regulagem da temperatura de uma sala até pousar uma aeronave. Nesta tese, o objetivo é gerenciar pelotões de veículos.

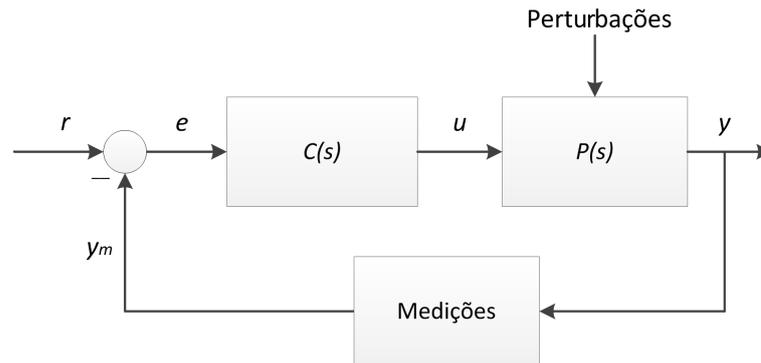


Figura 8 – Um sistema de controle simples

No contexto veicular, um tipo de controle empregado pode ser o Controle de Velocidade de Cruzeiro (CC). O CC é um sistema de controle longitudinal disponível em veículos modernos que mantém automaticamente a velocidade desejada (R. RAJAMANI, 2011). Neste caso, o sinal de referência r é a velocidade desejada e o erro e é a diferença entre r e a velocidade medida pelo velocímetro. A entrada de controle u é um sinal que indica ao motor acelerar ou desacelerar: por exemplo, pode indicar à unidade de controle do motor que acione uma determinada posição do acelerador.

As perturbações são as fricções externas, como o arrasto do ar, a resistência dos rolamentos e a gravidade. A saída y será o estado real do veículo, sua posição, velocidade, aceleração e qualquer outra variável que possa ser necessária para descrevê-lo. Nas seções a seguir, são descritos detalhes importantes sobre controle de veículos em pelotões e os conceitos necessários para o seu entendimento.

2.4.1 Atrasos de Atuação e de Comunicação

Antes de descrever os sistemas de controle, é preciso descrever a atuação, isto é, o momento em que o sistema executa o que o controlador calculou. Essa atuação pode ser adiada devido à dinâmica interna do sistema de controle. Em um veículo, por exemplo, quando o controlador define que o veículo deve acelerar, o sistema precisa enviar a entrada para a unidade de controle do motor, que abre as válvulas de combustível para acelerar o virabrequim que, no final, acelera o veículo. Este processo não é claramente imediato e é referido como atraso de atuação (J. PLOEG *et al.*, 2011).

O atraso de atuação também pode ser modelado de forma mais realista, por exemplo, levando em consideração as características do motor e dos freios. Esse tipo de atraso define $u(t-\tau)$ como a entrada de controle com um atraso de tempo τ (Michele SEGATA *et al.*, 2014a).

Em controles cooperativos, podem ocorrer atrasos de comunicação, os quais ocorrem na transmissão da informação entre os veículos da rede (BERNARDO *et al.*, 2016). Nesse tipo de atraso, $x(t)$ representa as informações do veículo no instante de tempo t , $x(t-\tau)$ representa as informações com um atraso de tempo τ e $u(t)$ representa a entrada de controle.

2.4.2 Controle de Velocidade de Cruzeiro

Um CC é um sistema de controle que permite ao condutor escolher uma velocidade desejada que é automaticamente mantida pelo veículo. Um CC não executa frenagem automática: se o veículo se aproximar de outro veículo mais devagar à frente, o condutor precisa desabilitar manualmente o controlador (acionar os freios). Ainda assim, esse sistema pode aumentar o conforto de condução durante longas viagens em rodovias. Uma possível lei de controle para um CC é definida como (R. RAJAMANI, 2011):

$$u = -k_p(v - v_d) - k_i \int (p - p_d) dt, \quad (10)$$

onde v e v_d são a velocidade atual e desejada, respectivamente, enquanto p e p_d são as posições que o veículo teria ao viajar a essas velocidades. Este tipo de controlador é conhecido como controlador PI, porque a lei calcula a ação de controle usando um componente proporcional e integral do erro. Os parâmetros k_p e k_i podem ser alterados para ajustar o comportamento do controlador. Ao definir $k_i = 0$, o controlador reduz-se a um controlador proporcional simples. Ao considerar o componente proporcional e integral do erro o controlador se torna menos suscetível a distúrbios externos (R. RAJAMANI, 2011).

2.4.3 Controle de Velocidade Adaptativo

Uma versão mais sofisticada do CC é o ACC. O ACC utiliza sensoriamento para detectar e monitorar veículos à frente. O condutor escolhe a velocidade desejada como em um CC. Se o sistema de sensores detectar um veículo mais lento à frente, o ACC desacelera automaticamente e mantém uma lacuna segura entre os veículos. Se a estrada à frente se tornar livre novamente, por exemplo, ao mudar a pista para ultrapassar, o ACC acelera novamente e traz o carro para a velocidade de referência escolhida pelo condutor. Uma possível lei de controle para o ACC é definida como (R.

RAJAMANI, 2011):

$$u_i = -\frac{1}{h}(v_i - v_{i-1} + \lambda(p_i - p_{i-1} + l_{i-1} + h\dot{p}_i)), \quad (11)$$

onde v_i e v_{i-1} são a velocidade atual e desejada do veículo, respectivamente, p_i e p_{i-1} são suas posições, l_{i-1} é o comprimento do veículo, h é o tempo de *headway* e λ é um parâmetro configurável. O sistema calcula a velocidade relativa ($v_i - v_{i-1}$) e a distância entre os veículos ($p_i - p_{i-1} + l_{i-1}$). A distância desejada $h\dot{p}_i$ não é fixa, mas depende da velocidade de cruzeiro. Em particular, o ACC mantém uma distância de h segundos do veículo à frente, de modo que a distância real seja constante no tempo. Essa política de espaçamento é chamada de Política de Intervalo de Tempo Constante e é necessária para garantir as propriedades de estabilidade do sistema. Além disso, h não pode ser escolhido arbitrariamente: em particular, como comprovado em (R. RAJAMANI, 2011), a estabilidade na cadeia é garantida somente se a seguinte inequação for válida:

$$h \geq 2\tau, \quad (12)$$

ou seja, o tempo de *headway* deve ser pelo menos duas vezes maior do que o atraso de atuação. Para um atraso de atuação de 0,5 segundos, isso significa que o intervalo de tempo deve ser maior que 1 segundo.

2.4.4 Controle de Velocidade Adaptativo e Cooperativo

Um sistema CACC confiável busca manter o condutor seguro em situações nas quais a condução pode se tornar perigosa ou difícil, como chuva forte e neblina, buscando mitigar falhas e deficiências humanas (DELIS *et al.*, 2016). Além disso, devido ao melhor desempenho aerodinâmico, provido pela menor distância entre os veículos, o consumo de combustível diminui, especialmente para veículos pesados (JOOTEL, 2012). Nas seções seguintes, a implementação de diferentes estratégias de controle para pelotões veiculares serão exploradas.

O sistema CACC tornou-se uma atualização do sistema ACC adicionando um sinal de *feedforward* no *loop* de controle. Este método fornece mais informações. Por exemplo, as informações de aceleração do veículo podem ser enviadas para os veículos seguintes através de comunicação V2V, de modo que uma melhor resposta do sistema possa ser alcançada (DELIS *et al.*, 2016).

Todos os veículos equipados com CACC em um pelotão têm o mesmo objetivo de seguir seu veículo líder dentro de uma certa distância entre veículos aceitável, determinada pela política de espaçamento. Existem duas categorias principais de espaçamento. A primeira categoria é a de distância constante, que assume uma distância fixa entre veículos (PETERS *et al.*, 2014). A segunda é a categoria de espaçamento dependente da velocidade, que determina a distância entre veículos com base na velo-

cidade do veículo. Para um veículo i no pelotão, a política de espaçamento dependente da velocidade relaciona a distância interveicular desejada com o intervalo de tempo (ÖNCÜ *et al.*, 2014):

$$d_{0i} = r_i + h_{di} \times v_i, \quad (13)$$

onde d_{0i} é a distância interveicular desejada entre o veículo i e seu veículo líder, r_i é a distância de paragem², h_{di} é o tempo de *headway* e v_i é a velocidade do veículo i . Então, juntamente com a distância real detectada pelos sensores de bordo do veículo, o erro de espaçamento pode ser calculado.

O modelo dinâmico longitudinal do veículo fornece o ambiente de implementação para os sistemas CACC. Nos trabalhos (X.-Y. LU *et al.*, 2002; SANTINI *et al.*, 2017), a dinâmica longitudinal do veículo é descrita como um modelo não linear, que envolve a resistência do motor, do asfalto e do pneu, a gravidade e o arrasto aerodinâmico. Este modelo está próximo da dinâmica real do veículo, pois leva muitos parâmetros do veículo e do ambiente em consideração. Zheng *et al.* (2014) apresentam um modelo linear para a dinâmica longitudinal do veículo, que é frequentemente utilizado em estudos de ACC e CACC. Neste modelo, a posição do veículo, a velocidade e a aceleração são usadas para formar as variáveis de estado.

O projeto do CACC depende da topologia do fluxo de informações do veículo. A topologia determina a conexão entre os veículos CACC em um pelotão. Há muitas topologias de fluxo de informações CACC estudadas pelos pesquisadores. Os principais tipos de topologias de fluxo de informações são definidas da seguinte maneira em (ZHENG *et al.*, 2014):

- *Predecessor Following* (PF);
- *Predecessor-Leader Following* (PLF);
- *Bidirectional* (BD);
- *Bidirectional-Leader* (BDL);
- *Two Predecessors Following* (TPF); e
- *Two Predecessor-Leader Following* (TPLF).

A topologia mais comumente utilizada é a PF, em que o veículo seguidor considera apenas informações de seu antecessor. O controlador sob este tipo de topologia é formado por duas partes: *feedback* ACC ($C_{i,ACC}$) e *feedforward* CACC ($C_{i,CACC}$). O diagrama de blocos do sistema é apresentado na Figura 9, no qual a_{i-1} é a aceleração

² Distância de paragem é a distância que o veículo percorre desde que o condutor vê o obstáculo até à imobilização do veículo (HOUCHIN *et al.*, 2015).

do veículo antecessor (informação recebida por meio da rede veicular), q_{i-1} é a posição do veículo antecessor e q_i é a posição do veículo. Ambas as entradas CACC e ACC podem ser vistas como sinais de aceleração que atuam como uma entrada para a dinâmica do veículo. O controlador ACC convencional é geralmente um controlador Proporcional Derivativo (PD) ou um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). O controlador CACC é projetado para processar o sinal de comunicação sem fio. Um filtro *feedforward* é usado para processar os dados de aceleração que são transmitidos do veículo líder para obter a entrada de controle CACC (ZHENG *et al.*, 2014).

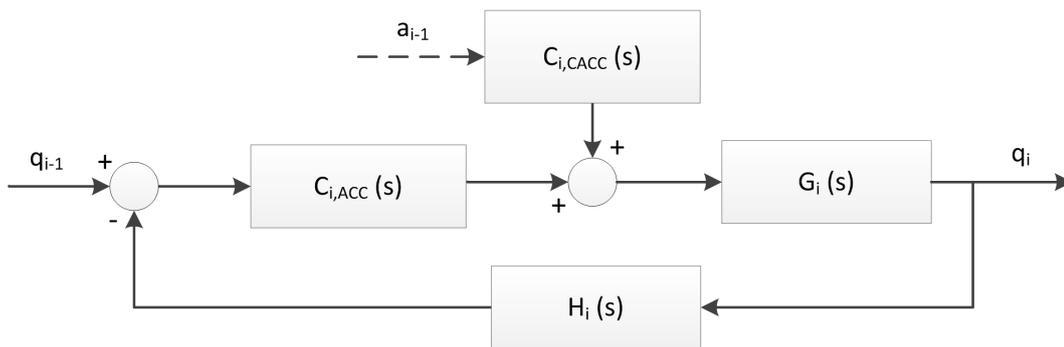


Figura 9 – Controle de um veículo em um pelotão CACC com topologia PF

A topologia PLF é adotada em (PETERS *et al.*, 2014). Sob este tipo de topologia, o controlador leva em consideração dois sinais de erro, uma vez que o veículo i tem comunicação com seu predecessor e líder no pelotão. O controlador PID também é aplicado no projeto do controlador. A topologia BD é implementada em (HERMAN *et al.*, 2015), este método permite que o veículo i se comunique com seus veículos adjacentes.

Outros métodos de controle também são investigados para sistemas CACC. Zegers *et al.* (2016) modificaram os algoritmos de controle de consenso da rede em uma estrutura ponderada e de restrição. O sistema de controle desenvolvido pode coordenar todos os veículos no pelotão para alcançar um padrão distribuído desejado. Um protocolo de controle distribuído baseado na estratégia de consenso distribuído foi derivado em (BERNARDO *et al.*, 2015). O método proposto considerou o atraso heterogêneo na comunicação CACC. Além disso, os autores verificaram o desempenho do sistema sob perturbação.

Dentro da dinâmica do sistema, o atraso do atuador do veículo é levado em conta na implementação prática. Para obter um modelo de ciclo fechado, Öncü *et al.* (2014) apresentaram o atraso do atuador de modo que o tempo de atraso possa ser definido em um modelo de dimensão finita, por meio de aproximação. Detalhes sobre essa abordagem de aproximação podem ser encontrados em (GOLUB; LOAN, 2012). Com este modelo, uma cadeia de veículos CACC conectada pode ser criada usando um método de modelagem de tempo discreto. Zheng *et al.* (2014) adotaram

uma arquitetura de controle de dois ciclos. O controlador de aceleração combina os dados detectados (por exemplo, distância entre veículos e velocidade) e os dados da comunicação para gerar uma entrada de aceleração para o laço interno. O laço interno utiliza o controle SMC (*Sliding Mode Control*) baseado em um modelo simples de veículo.

O ambiente de trabalho para tecnologias de condução autônoma, como ACC e CACC, nem sempre é perfeito. Além disso, os sistemas de controle precisam ter a capacidade de lidar com perturbações estocásticas e incertezas (GUO; YUE, 2012). Szalai e Gabor Orosz (2013) propuseram uma abordagem de aprendizagem por intensificação para projetar o sistema CACC. O sistema foi modelado como um Processo de Decisão de Markov (do inglês, *Markov Decision Process* (MDP)), e os autores incorporaram a teoria dos jogos estocásticos no sistema para melhorar o desempenho do CACC. Os resultados da simulação mostraram que pequenos distúrbios são amortecidos pelo pelotão. Gao *et al.* (2017) propuseram um controlador Fuzzy para se adaptar às incertezas do ambiente durante a condução. L. Zhang e G. Orosz (2016) investigaram as incertezas na rede de comunicação e nas informações dos sensores. Os autores também modelaram os parâmetros e os atrasos do sistema usando a distribuição gaussiana e utilizaram esse modelo para aproximar o tempo mínimo de *headway*. O atraso estocástico de comunicação é considerado por Qin *et al.* (2014), o qual incorpora o atraso no modelo dinâmico do sistema. Nesse trabalho, a estabilidade da cadeia é analisada considerando a distribuição de probabilidade do atraso estocástico.

Já D. Zhao *et al.* (2014) buscaram lidar com situações de condução estocásticas. Além disso, os autores testaram os algoritmos propostos em diferentes cenários, como *stop & go*, frenagem de emergência, mudança de faixa e alterações no padrão de condução. Embora esforços consideráveis tenham sido feitos para o projeto do controlador CACC, que forneceram uma base sólida para a melhoria do desempenho do CACC, fatores mais práticos, como condições de tráfego e fatores humanos, precisam ser explorados para obter todo o potencial dos sistemas CACC.

2.4.5 Controle Lateral

O controle lateral determina qual direção o veículo deve tomar. Essa tarefa normalmente é do condutor humano, o qual ainda é responsável por certos conceitos existentes nos pelotões veiculares como ACC e CACC. No entanto, em algumas aplicações voltadas a AHS, o controle lateral é automatizado (MCAREE; VERES, 2016).

A principal funcionalidade do controle lateral é manter o veículo no centro da via. O controle lateral também se relaciona com a função de mudança de faixa. Ambas as funções são discutidas com mais detalhes nos próximos parágrafos. O desenvolvimento dessa funcionalidade envolve aspectos que buscam prover qualidade e precisão na condução automatizada, assim como no controle longitudinal. Uma boa qualidade

da condução (movimentos fluidos, não bruscos) é importante para que os passageiros passem a aceitar veículos autônomos. Uma alta precisão de tal sistema é essencial para a segurança porém, pode gerar movimentos bruscos que levariam ao desconforto dos passageiros. Para dirigir um veículo ao centro de uma via, é importante conhecer a posição lateral atual do veículo (ERCAN *et al.*, 2017).

Várias tecnologias foram consideradas para medir esta posição, como rastreamento de ímã permanente, visão computacional e Sistema de Posicionamento Global Diferencial (do inglês, *Differential GPS* (DGPS)), que é um aprimoramento do GPS que fornece um serviço de localização mais preciso (ERCAN *et al.*, 2017). O rastreamento por ímãs é uma opção muito robusta, mesmo em altas velocidades, pois as informações de direção, específicas para uma localização, podem ser codificadas na polarização dos ímãs. A partir de dados experimentais, mostrou-se que um sistema de rastreamento magnético pode fornecer erros de rastreamento que são 3 a 4 vezes menores em comparação com a condução manual (MCAREE; VERES, 2016). Uma das principais desvantagens dessa abordagem é a necessidade de equipar as vias com esses ímãs. Outra forma de detectar a posição lateral de um veículo é a utilização de reconhecimento por imagem, assim é possível detectar as vias e definir o posicionamento. A dificuldade com a visão por computador reside na capacidade de lidar com as diferentes condições da via. Por exemplo, as faixas (sinalização) da via podem ficar temporariamente indisponíveis, movidas em caso de obras ou invisíveis devido à condição da luz (ERCAN *et al.*, 2017).

O controle lateral está atrelado à função de mudança de faixa, esta função é responsável por direcionar um veículo da faixa atual para uma faixa adjacente. Este aspecto do controle lateral é considerado o mais desafiador, pois envolve mais dinâmicas do veículo e coordenação entre os veículos (MCAREE; VERES, 2016). Os controles longitudinal e lateral definem a coordenação das manobras do veículo. Essas manobras são tipicamente a formação e a divisão de pelotões, a fusão de fluxos de trânsito e a coordenação da mudança de faixa (MCAREE; VERES, 2016).

2.4.6 Estabilidade em Cadeia

Um conceito fundamental na análise de algoritmos de controle de um conjunto de veículos é o da estabilidade em cadeia (do inglês, *String Stability*). Um algoritmo de controle voltado a pelotões veiculares é dito estável se qualquer erro de posição, velocidade ou aceleração de um veículo não for amplificado em cadeia para todo pelotão (SWAROOP; HEDRICK, 1996). Este é um conceito diferente da noção de estabilidade clássica de um sistema de controle que, por exemplo, diz respeito apenas a um único veículo (ZHENG *et al.*, 2014).

A estabilidade em cadeia é uma propriedade do pelotão e é de extrema importância porque garante que, em condições normais, o sistema não cause colisões

de veículos. A abordagem padrão para analisar o desempenho de um controlador é analisar sua resposta a uma entrada senoidal. Se a amplitude de tal senoide não for amplificada pelos veículos seguidores, o controlador é estável (SHEIKHOESLAM; DESOER, 1993).

Em um controlador estável a oscilação da distância entre o primeiro e o segundo veículo é atenuada pelos veículos seguintes. No caso de um controlador instável, a amplitude de oscilação entre o segundo o último veículo é maior que a dos veículos à frente. Essa instabilidade pode levar a um acidente entre os veículos pertencentes ao pelotão. Por esta razão, a estabilidade na cadeia é uma propriedade relevante para qualquer controlador de *platooning* (NAUS *et al.*, 2010).

Segundo Dey *et al.* (2016), existem três abordagens principais para a análise da estabilidade em cadeias: a abordagem de estabilidade de Lyapunov; a abordagem de sistemas espacialmente invariantes; e a abordagem orientada ao desempenho. Swaroop e Hedrick (1996), usaram a abordagem de estabilidade de Lyapunov para analisar a estabilidade da cadeia de um sistema interconectado. A proposta garante que o controlador CACC e a cadeia permaneçam estáveis sob perturbações. A segunda abordagem concentra-se principalmente no pelotão de comprimento infinito, a abordagem usa a transformação de Fourier e avalia a estabilidade da cadeia (DJOUADI *et al.*, 2018). Em seguida, a abordagem orientada ao desempenho, em particular, é o método predominante para a análise da estabilidade da cadeia do fluxo do tráfego rodoviário. O seguinte critério baseado na função de transferência tem sido amplamente utilizado neste método:

$$SS_i = \frac{A_i(s)}{A_{i-1}(s)}, \quad (14)$$

onde $A_i(s)$ e $A_{i-1}(s)$ são as transformadas de Laplace dos estados do veículo i e $i - 1$, isto é, o erro e da distância entre veículos, estado x do veículo ou entrada de controle u do veículo. Naus *et al.* (2010), investigaram a estabilidade em cadeia usando a abordagem do domínio da frequência em três cenários, incluindo espaçamento entre veículos independente da velocidade constante, espaçamento entre veículos dependente da velocidade com ajuste do ACC e espaçamento entre veículos dependente da velocidade com ajuste do CACC. Os resultados das validações experimentais mostram a capacidade do CACC de alcançar uma menor distância entre veículos, *headway* e uma maior estabilidade na cadeia a partir de uma perspectiva de domínio de frequência. A magnitude da função de transferência da estabilidade da cadeia é usada para desenvolver condições suficientes para manter a estabilidade em (ÖNCÜ *et al.*, 2014).

O cenário de espaçamento entre veículos independente da velocidade constante (*headway* $h_i = 0$ segundos) é a condição mais simples para a configuração do sistema e para garantir a estabilidade na cadeia, isto é, $\sup |SS_i(j\omega)| = 1$, com ou sem o filtro *feedforward*. Para o cenário de espaçamento entre veículos dependente da ve-

locidade, com os sistemas ACC e CACC, a estabilidade da cadeia pode ser alcançada se $\sup |SS_i(j\omega)| < 1, \forall \omega$, o que significa que o erro do sistema não será amplificado ao longo do pelotão. Se o sinal de erro continuar amplificando a montante do pelotão, ou seja, $\sup |SS_i(j\omega)| > 1, \forall \omega$, a cadeia ficará instável (KHATIR; DAVISON, 2004). Além disso, Öncü *et al.* (2014) propuseram um novo critério para a estabilidade em cadeia ι_ρ , que pode ser aplicado em sistemas lineares e não lineares. Os autores consideram as condições iniciais do sistema, perturbações externas e restrições no tempo de *headway*.

2.5 SIMULAÇÃO DE PELOTÕES VEICULARES

Para avaliar protocolos voltados às redes veiculares em um ambiente real, é preciso utilizar veículos, condutores e equipamentos, o que torna os custos com testes elevados. Certamente, haverá repetições de um determinado experimento em um ambiente com muitos parâmetros que podem variar e isto se torna difícil, pois em algum momento uma ou mais variáveis podem não se mostrar satisfatórias para os testes (PUNZO; CIUFFO, 2011). A utilização de simuladores se mostra atraente por permitir o controle sobre o ambiente e por consumir menos recursos. Mesmo assim, reproduzir condições encontradas num ambiente real se torna um desafio, pois envolve inúmeras variáveis como, interferências, velocidade dos nós, distância entre os nós, transmissão de dados, etc. Além disso, trata-se de uma rede móvel, para a qual devem ser desenvolvidos modelos de mobilidade específicos (PUNZO; CIUFFO, 2011).

Os simuladores voltados a redes veiculares geram suas simulações por meio da utilização de duas partes complementares, o modelo de rede e o modelo de mobilidade (C. SOMMER; DRESSLER, 2008). O modelo de rede é responsável por identificar a pilha de comunicação, ou seja, o modelo do canal sem fio, modelo de propagação, camada MAC, camada de rede, camada de aplicação, etc. O modelo de rede utilizado em simulações voltadas às redes veiculares é o mesmo utilizado em redes móveis (C. SOMMER; DRESSLER, 2008). Já o modelo de mobilidade é responsável por identificar os diferentes aspectos da mobilidade dos veículos (TAMPERE; AREM, 2001). Modelos de mobilidade para simulações são classificados de acordo com o nível de detalhe com o qual representam o sistema de tráfego (TAMPERE; AREM, 2001).

Um modelo de mobilidade realista deve incluir características como, mapas topológicos, modelos de desaceleração e aceleração, padrões de condução inteligente, comportamento humano e diferentes tipos de veículos (HARRI *et al.*, 2009). Todos esses recursos são recomendados para um modelo de mobilidade ser o mais realista possível, porém, torna-se muito complexo forçando a utilização de muitas variáveis e seu desenvolvimento torna-se dispendioso. Modelos complexos podem ser úteis apenas na avaliação final do protocolo, mas não durante o ciclo de desenvolvimento do mesmo, no que o pesquisador deve estudar o efeito de seu protocolo em situações

específicas (PUNZO; CIUFFO, 2011). Note-se que, o modelo de rede utilizado no simulador deve também ser adequado para as suas necessidades, com a possibilidade de desenvolvimento de novos protocolos.

Existem muitos simuladores de redes veiculares disponíveis, dentre os mais difundidos, tem-se: NS-2, NS-3, OMNeT++, GloMoSim, QualNet, SWANS, J-sim e OP-NET. Dentre os geradores de mobilidade e de fluxo de tráfego disponíveis, destacam-se SUMO, VISSIM e AIMSUN.

No caso de pelotões, a avaliação pode se concentrar em mostrar os benefícios do fluxo de tráfego (AREM *et al.*, 2006), mostrar as características de um controlador (LEI *et al.*, 2011b), ou em realizar análises em larga escala para entender o comportamento da rede (Michele SEGATA *et al.*, 2014b). As informações necessárias podem ser obtidas por meio de análises teóricas (ÖNCÜ *et al.*, 2014), experimentais (R. RAJAMANI *et al.*, 2000; Jeroen PLOEG *et al.*, 2011) ou simuladas. Há também estudos nos quais a avaliação é realizada usando uma combinação dessas metodologias. Em geral, as simulações de pelotões buscam fornecer certo grau de realismo. Às vezes, no entanto, os simuladores não possuem alguns recursos como detalhes de comunicação, física do veículo ou Licença Pública Geral (do inglês, *General Public License* (GPL)). A seguir, estão descritas as ferramentas mais adequadas para este trabalho.

O objetivo de Hallé e Chaib-draa (2005) foi desenvolver um simulador que se concentra principalmente na física dos veículos para testar diferentes modelos distribuídos baseados em agentes. O simulador possui um ambiente 3D para o máximo realismo que inclui detecção de objetos através de sensores, condições das vias e modelagem do motor.

Para estudar o impacto dos sistemas de controle no fluxo de tráfego, Arem *et al.* (2006) desenvolveram um modelo de simulação estocástico, que possui uma rodovia de várias faixas na qual os veículos têm a possibilidade de realizar ultrapassagens mudando de faixa. É possível configurar e usar diferentes tipos de veículos, bem como considerar a condução humana e automática. Novamente, a parte de rede é negligenciada por causa do objetivo do trabalho. Portanto, as perdas e interferências de pacotes não são consideradas.

Já Lei *et al.* (2011b) determinam o impacto da perda de pacotes no sistema de controle. O simulador desenvolvido é um sistema complexo no qual as leis de controle são implementadas em Matlab/SIMULINK. A rodovia e veículos são manipulados pelo SUMO³ e a rede é simulada pelo OMNeT++⁴. O simulador, no entanto, foi desenvolvido apenas para a análise do sistema de controle específico e não está disponível ao público.

Outro simulador avançado do ponto de vista da dinâmica do veículo foi desen-

³ SUMO: <http://sumo.dlr.de/>

⁴ OMNeT++: <https://omnetpp.org/>

volvido por L. Zhao e Sun (2013). É a extensão do simulador comercial VISSIM, que permite a implementação de mecanismos de controle. Além disso, inclui alguns controles básicos para a formação de pelotões. A parte de comunicação, no entanto, não é implementada e o simulador não está disponível para a comunidade.

Outros estudos se preocupam mais com o realismo da rede e não com a mobilidade. De fato, Böhm *et al.* (2013) usam um simulador com a pilha IEEE 802.11p completa, bem como fenômenos detalhados de desvanecimento e sombreamento. No entanto, não consideram controles personalizados, mas apenas o modelo IDM (TREIBER *et al.*, 2000) que busca representar as ações de um condutor humano. Além disso, o código-fonte não está disponível à comunidade científica.

Ao analisar a literatura, alguns pontos devem ser levados em consideração no momento da escolha de um simulador e *frameworks* que permitam a implementação de protocolos, aplicações e mecanismos de controle. De acordo com o exposto, na Tabela 1 pode-se observar alguns dos pontos levados em consideração no levantamento das ferramentas de simulação de VANETs.

Tabela 1 – Comparação entre softwares de simulação de redes veiculares

Simulador	Licença	Linguagem	GUI	Sistemas	Rede
OPNET	Comercial	C, C++	Sim	Windows	WiFi, LTE, UMTS, WiMAX e Zigbee
NS-2	GNU GPLv2	C++, OTcl	Não	Linux, Windows	WiFi
NS-3	GNU GPLv2	C++ Python	Não	Linux, Windows	WiFi, WiMAX e LTE
J-sim	BSD License	Java, Tcl, Perl, Python	Não	Linux Windows	WiFi
OMNeT++	Acadêmica, Comercial	C++, .NED	Sim	Linux Windows	Módulos Externos
SWANS	Acadêmica	Java Python	Não	Linux Windows	WiFi
GloMoSim	Acadêmica	C	Não	Linux	WiFi
QualNet	Acadêmica	C Python	Não	Linux Windows	WiFi

GUI: Graphical User Interface.

Para determinar a ferramenta de simulação de redes veiculares para o desenvolvimento de estudo de caso, o processo de escolha atendeu os seguintes requisitos: (i)

a ferramenta deve ser gratuita, deve ser possível modificá-la de acordo com propósitos específicos; (ii) ter comunidade ativa que provenha novas atualizações e correções; (iii) a ferramenta deve possuir uma interface gráfica amigável para compreensão ágil de seu escopo de desenvolvimento; e (iv) a ferramenta deve apresentar portabilidade para diversos sistemas operacionais. Além disso, o realismo da simulação de rede é crucial. A dinâmica do veículo, por outro lado, também é muito importante, porque permite entender como um veículo se comportaria em condições particulares do mundo real. Por conta destas características, decidiu-se utilizar neste trabalho a tupla <OMNeT++, *framework* Veins, PLEXE, SUMO>.

O *framework* Veins⁵ (Christoph SOMMER *et al.*, 2011) implementa o padrão IEEE 802.11p e modelos da camada superior da pilha IEEE 1609.4 DSRC/WAVE. Além disso, inclui a manipulação de mensagens curtas (do inglês, *Wave Short Message* (WSM)) e permite a troca de informação entre veículos por meio de mensagens de consciência cooperativa (do inglês, *Cooperative Awareness Messages* (CAM)).

O Veins e sua extensão PLEXE (Michele SEGATA *et al.*, 2014a), por sua vez, formam a ponte que permite a troca de dados entre o simulador de rede e o simulador de tráfego. Esta mecânica permite que os dados provenientes do simulador de rede sejam enviados para os mecanismos de controle. Os protocolos de comunicação e as lógicas da camada de aplicação são implementadas no OMNeT++, enquanto os controladores são implementados no SUMO.

No SUMO existem modelos que representam o comportamento de condutores e que podem ser usados em conjunto com a extensão PLEXE, porém, não podem ser modificados. Já a extensão PLEXE, por padrão, representa o comportamento do condutor por meio do modelo Krauß (KRAUSS, 1998), mas também permite a criação de modelos de controle personalizados dentro de um único arquivo. Mais detalhes sobre codificação, exemplos e um tutorial podem ser encontrados na documentação *online* disponível no site oficial⁶.

2.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

A implantação de pelotões nas rodovias surge como uma boa alternativa para criar condições seguras de circulação para os veículos que trafegam em uma via. Nas redes veiculares, pelo fato de diversos nós colaborarem sem um ponto central, algumas tarefas tornam-se mais difíceis de serem realizadas de forma eficiente. Portanto, um dos desafios neste tipo de rede é a inserção de novos mecanismos que possam torná-las mais seguras e confiáveis, sem adicionar riscos no comprometimento de seu desempenho.

⁵ Veins: <http://veins.car2x.org/>

⁶ PLEXE: <http://plexo.car2x.org/>

Neste capítulo foram abordadas as características principais sobre a teoria de consenso para sistemas multi-veículos. Parte importante no desenvolvimento da tese, a teoria de grafos com seus principais aspectos foi apresentada, sempre com uma visão direcionada ao problema de consenso, com alguns exemplos ilustrativos.

A confiabilidade é extremamente importante para serviços destinados a aplicações de segurança no trânsito, pois a entrega confiável de mensagens pode evitar acidentes. Diante deste cenário, um dos desafios no âmbito dos pelotões veiculares é a concepção de uma abordagem de co-projeto de um controlador consensual, juntamente com um sistema de comunicação que permita a troca de mensagens de controle com maior confiabilidade possível e com latência mínima. O sistema de comunicação deve trabalhar em conjunto com os mecanismos de controle empregados para prover estabilidade ao conjunto de veículos.

Os trabalhos descritos neste capítulo serviram de base para o entendimento sobre a confiabilidade na entrega de mensagens em redes veiculares, para definição do sistema de comunicação e para a concepção de mecanismos de controle voltados a pelotões veiculares. No Capítulo 4 é apresentada a abordagem proposta desenvolvida durante o trabalho.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo apresenta os trabalhos correlatos encontrados na literatura que descrevem protocolos e sistemas de controle para estabilizar pelotões veiculares e abordagens de disseminação confiável. A seleção dos trabalhos voltados ao controle de pelotões veiculares, concentrou-se naqueles que buscam prover controle cooperativo em prol da estabilidade do pelotão. Para selecionar as abordagens voltadas à transmissão confiável, considerou-se protocolos de difusão que são classificados como *delay-based multi-hop*, conforme descrito em (PANICHPAPIBOON; PATTARA-ATIKOM, 2012). Nesta classe de protocolos, existem abordagens com e sem mensagens de controle (*beacons*). No entanto, a seleção concentrou-se em protocolos assistidos por *beacons*, já que a formação e manutenção de um pelotão veicular depende destas mensagens de controle. A descrição dos procedimentos usados na revisão sistemática da literatura realizada nesta tese pode ser vista no Apêndice B.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Swaroop e Hedrick (1996) buscaram definir em seu trabalho a estabilidade em cadeia, estabilidade assintótica e exponencial, para interconexão de sistemas não-lineares. Os pesquisadores usaram a abordagem de estabilidade de Lyapunov para analisar a estabilidade do pelotão veicular e se concentraram apenas nas perturbações de condição inicial. No trabalho, condições suficientes de acoplamento fraco são derivadas de modo que o sistema interconectado, por exemplo, CACC, seja garantido como assintoticamente estável e permaneça estável sob perturbações. O trabalho foi focado no controle do pelotão com uma estratégia de espaçamento constante. Portanto, os autores não investigaram o controle do pelotão veicular com espaçamento variável. Por fim, o fluxo de informação foi definido como uma topologia PLF, e os autores não tratam a questão do atraso na comunicação.

R. Rajamani *et al.* (2000) propuseram um controlador no projeto PATH, que explora a aceleração e a velocidade, tanto do líder quanto dos veículos seguidores. Esse esquema de controle garante a estabilidade do pelotão sob uma distância interveicular constante, que pode ser arbitrariamente selecionada e é independente da velocidade, como no projeto SARTRE (R. RAJAMANI, 2011), que adotou cinco metros. O parâmetro de controle independente do sistema de controle longitudinal é a aceleração desejada que é acionada pelo veículo. A atuação não é imediata devido à defasagem induzida pela dinâmica do *powertrain*¹ e pela dinâmica da transmissão do motor. Em geral, o atraso de atuação é modelado por um filtro passa-baixa de primeira

¹ Em um veículo a motor, o termo *powertrain* descreve os principais componentes que geram energia. Isso inclui o motor, transmissão, eixos de transmissão, diferenciais e a unidade final (BAYINDIR *et al.*, 2011)

ordem. Trabalhos recentes, como (H. HU *et al.*, 2017; SANTINI *et al.*, 2017; H. HUANG *et al.*, 2018; PLÖGER *et al.*, 2018; MARZOUK *et al.*, 2018), citam o CACC PATH como marco no que se diz respeito ao controle de pelotões. Além disso, a implementação do CACC PATH é disponibilizada para simulação na ferramenta PLEXE. O controlador ainda obtém resultados satisfatórios em simulações comparativas com abordagens mais recentes (SANTINI *et al.*, 2017). O controlador utiliza a topologia PLF, porém em estudos mais recentes o CACC PATH foi utilizado com outras topologias como, BD e PF (SANTINI *et al.*, 2017; MARZOUK *et al.*, 2018). A abordagem do programa PATH não trata atrasos na comunicação e não foi projetado para prover confiabilidade na comunicação em aplicações de segurança como EEBL e LDW. Esse trabalho investigou não só a estabilidade do pelotão, mas também o consumo de combustível e as emissões de gases poluentes dos veículos do pelotão.

Naus *et al.* (2010) propuseram um controlador simples focado na viabilidade de implementação. A comunicação é feita por meio de uma topologia PF fixa. Além disso, os autores focaram em um tráfego homogêneo. No estudo, um projeto de controlador descentralizado foi adotado, juntamente com um controlador *feedforward*. O padrão de comunicação utilizado nos experimentos foi o IEEE 802.11g. Os resultados experimentais com dois veículos equipados com um CACC relativamente simples, que foca na viabilidade de implementação, foram superiores ao ACC padrão. Melhorias significativas com relação ao espaçamento interveicular e características de estabilidade foram alcançadas. O trabalho não realiza comparação com outras abordagens existentes, topologias de comunicação variadas, não leva em consideração atrasos na comunicação e dinâmicas de espaçamento. Finalmente, questões importantes, como fluxos de veículos variante no tempo, saturação quanto à robustez contra incertezas e perturbações do modelo no que diz respeito a análise da estabilidade não foram levados em consideração.

Lidstrom *et al.* (2012) desenvolveram um CACC chamado de S²-MOVE, que buscou manter um pelotão estável. O controlador foi implementado em veículos reais na competição Grand Cooperative Driving Challenge. Os autores também apresentaram um sistema de posicionamento baseado na fusão de dados RTK-GPS (do inglês, *Real-Time Kinematic Global Positioning System*) e sistema de navegação inercial em um filtro de Kalman estendido que mostrou-se robusto contra falhas de sinal GPS ao passar sob pontes durante a competição. Dados de localização imprecisos e errados foram recebidos. Como o controlador proposto usa uma topologia PLF fixa, dados de baixa qualidade e falhas na comunicação causaram desacelerações desnecessárias. Em determinados cenários, o CACC proposto teve desempenho inferior ao ACC padrão. Os autores também relatam falhas por conta da frequência utilizada para a comunicação sem fio (5,9 Ghz). Os estudos realizados foram feitos em um cenário com uma quantidade limitada de veículos e métricas voltadas a confiabilidade na comunicação

não foram levadas em consideração.

A estabilidade de um pelotão veicular por meio de um CACC sob a topologia BD foi estudada por Ghasemi e Kazemi (2013). Os autores investigaram a função de transferência de estabilidade em cadeia. Ghasemi e Kazemi (2013) concluíram que o projeto do ganho de controle pode influenciar o sistema, determinando se a magnitude máxima da função de transferência de estabilidade em cadeia pode atender ao critério definido. Os autores propuseram um sistema de controle que suporta tanto os controladores PID longitudinais, quanto os controladores laterais PID alimentados através de comunicações V2V. No estudo, o veículo usa a distância interveicular como entrada. Para cada iteração, a distância de referência e a distância obtida são comparadas e a aceleração apropriada é computada. A distância é calculada usando as coordenadas de GPS obtidas pela rede de comunicação. Contudo, quando a qualidade da comunicação não é totalmente confiável, o veículo muda para um modo degradado e usa sensores para detectar a distância entre os veículos. A saída do controlador PID é a aceleração que leva o veículo até a distância de segurança. No aspecto voltado à comunicação, atrasos no envio de dados não foram analisados e a topologia de comunicação é fixa. Os autores não investigaram a confiabilidade na comunicação nas simulações realizadas.

L. Y. Wang *et al.* (2014) buscaram resolver o problema de consenso em pelotões veiculares, por meio de um controle longitudinal. O CACC proposto utiliza uma estratégia de controle de consenso não ponderada, mas restrita, sob a topologia de rede de comutação Markoviana. O estudo assume que o fluxo de veículos é homogêneo, busca analisar a estabilidade do pelotão formado, porém não se preocupa em desenvolver uma proposta de comunicação confiável para o sistema. Além disso, a topologia de comunicação é definida como PF durante os experimentos.

Öncü *et al.* (2014) abordam o projeto de um sistema CACC (Connect & Drive) de uma perspectiva de NCS e apresentam uma estrutura de modelagem NCS que incorpora o efeito de atrasos na amostragem, que ocorrem devido à comunicação sem fio. Os autores buscam prover a estabilidade do pelotão veicular por meio da confiabilidade na comunicação V2V. Assim, eles buscaram investigar as compensações entre o desempenho do CACC (estabilidade em cadeia) e as especificações da rede (como atrasos), que são essenciais no projeto multidisciplinar dos controladores CACC. O controlador usado nesse trabalho foi definido em (Jeroen PLOEG *et al.*, 2011). O módulo de controle é composto por uma abordagem ACC que provê informações ao módulo CACC que é responsável por disseminar as informações locais. Além disso, o modelo permite expressar os comandos de controle CACC, que são, na verdade, sinais de *feedforward* de um veículo para o outro, como leis de controle de *feedback* de estado. A verificação experimental da estrutura de modelagem e análise apresentada para a estabilidade do pelotão foi realizada em uma pista de testes com dois protótipos

equipados com CACC, onde o veículo líder foi programado para rastrear uma trajetória de velocidade pré-definida. O principal objetivo desses experimentos foi testar as propriedades de estabilidade do pelotão para variações de *headways* e atrasos na comunicação, a fim de validar os resultados baseados no modelo. A escolha de experimentos com dois veículos equipados com CACC deriva do fato de que esta é a quantidade mínima de veículos na qual a estabilidade do pelotão pode ser analisada, e os efeitos da comunicação sem fio tornam-se aparentes. Nos experimentos, o dispositivo de comunicação sem fio, operou de acordo com o padrão IEEE 802.11p no modo *ad-hoc*, e a troca de informações foi constante com frequência de 25 Hz. Os autores definem como trabalho futuro que a abordagem deve ser testada com fluxos diferentes de veículos e com topologias variadas, já que a topologia usada nos estudos foi a PLF.

Bernardo *et al.* (2016) propuseram um controle longitudinal de pelotões baseado na solução de um problema de consenso de alta ordem para uma rede de agentes dinâmicos na presença de atrasos heterogêneos. A abordagem assume uma topologia PLF. Os experimentos foram realizados em um pelotão de três veículos na Universidade Chalmers, Gotemburgo, Suécia. Neste cenário restrito, a abordagem mostrou eficácia ao manter o pelotão estável, e foi capaz de atenuar a propagação de perturbações. No estudo realizado, a confiabilidade da comunicação entre os veículos não é tratada.

O trabalho de L. Zhang e G. Orosz (2016) teve como foco investigar os efeitos de estruturas de conectividade heterogêneas e atrasos de informação sobre a dinâmica de um pelotão veicular. Além disso, foi demonstrado o impacto da taxa de uso do CACC em um cenário com veículos pertencentes e não pertencentes a um pelotão. No trabalho em questão, três atrasos foram implementados pelos autores: (i) tempo de reação humana; (ii) o atraso de detecção; e (iii) o atraso de comunicação. Os atrasos de comunicação são causados por interrupções e perdas de pacotes na comunicação V2V. A topologia utilizada para a realização dos experimentos foi a PLF. Nos experimentos realizados, a dinâmica não-linear do pelotão não foi estudada. Aspectos da simulação foram simplificados, como os parâmetros de comportamento dos condutores, que foram uniformes e constantes. Por fim, o estudo prova que é possível prover estabilidade a um pelotão, porém em certos cenários, o controlador não foi capaz de evitar colisões entre os veículos pertencentes ao pelotão.

Zheng *et al.* (2016) estudaram a influência da topologia do fluxo de informação na estabilidade e escalabilidade de pelotões veiculares homogêneos em uma formação rígida. Um modelo linearizado da dinâmica longitudinal do veículo é derivado usando a técnica de linearização exata por realimentação de estados, que acomoda o atraso inercial da dinâmica do *powertrain*. Sob controladores de *feedback* linear, um teorema de estabilidade interno unificado é provado usando a teoria de grafos algébricos e o critério de estabilidade de Routh-Hurwitz. O estudo trata o atraso como fixo. A escalabilidade foi investigada para pelotões sob duas topologias de fluxo de informação, BD e

BDL. Por fim, apenas simulações numéricas foram usadas para ilustrar os resultados.

Schwartz *et al.* (2012) propuseram o protocolo de comunicação DOT. A abordagem foca o problema da escalabilidade em redes densas na presença de *beacons* periódicos, propondo um esquema de supressão baseada em tempo. Para fazer a atribuição do intervalo de tempo, os autores exploram a informação de posicionamento dos vizinhos a um salto para controlar a os intervalos de tempo de acordo com a densidade da rede. A supressão das retransmissões é feita separadamente para cada direção possível, tentando garantir uma disseminação adequada para todas as direções e evitar situações em que a disseminação seja dificultada devido a uma supressão precoce. Vale ressaltar que o problema de *broadcast storm* é apenas atenuado, mas não resolvido porque os veículos que compartilham uma distância semelhante ao remetente terão atribuídos o mesmo intervalo de tempo e poderão tentar retransmitir simultaneamente. Outro problema deve-se ao fato de que este esquema proposto é orientado para ao receptor e, portanto, o problema do terminal oculto é inevitável. Chitra e Sathya (2016), em seu trabalho, integraram a abordagem de controle presente em (R. RAJAMANI *et al.*, 2000) (CACC PATH), com a abordagem de comunicação confiável vista em (SCHWARTZ *et al.*, 2012). Os autores Chitra e Sathya (2016) implementaram um pelotão com quatro veículos e topologia de comunicação fixa e bidirecional. Além disso, os autores não investigaram o impacto que transmissões oriundas de veículos não pertencentes ao pelotão podem provocar em um cenário com alto fluxo de veículos. Eles também estudaram a disseminação confiável por meio de um modo de disseminação epidêmica.

Gao *et al.* (2017) propuseram um controlador Fuzzy para se adaptar às incertezas do ambiente durante a condução. A proposta busca solucionar o problema de regulação de saída ótima adaptativa de sistemas multi-agentes de tempo contínuo. A abordagem recorre ao aprendizado por reforço e à programação dinâmica aproximada. A eficácia da abordagem de controle proposta é demonstrada através da implementação de um controlador CACC em um pelotão. Os autores estudaram o COORP (Cooperative Optimal Output Regulation Problem) que considera o desempenho estável e transitório de cada subsistema. Ambas as análises teóricas e simulações indicam que os sistemas multi-agentes de circuito fechado podem obter rastreamento assintótico e rejeição de perturbações com propriedades de otimização desejadas. No estudo, o atraso na comunicação é fixo e a topologia de comunicação é a PLF, mantida fixa durante os experimentos. O trabalho também não considera as métricas de desempenho existentes para avaliar a confiabilidade da comunicação em um ambiente veicular.

X. Lu e S. Shladover (2017) focaram em uma abordagem voltada a caminhões. O objetivo do desenvolvimento de tal sistema é melhorar o desempenho do controle longitudinal automatizado (automação parcial). Foram considerados, a modelagem do sistema e projeto de controle para ACC e CACC integrados. Os experimentos

foram realizados com três caminhões Volvo com condutores profissionais nas rodovias interestaduais perto de Berkeley, na Califórnia, EUA, misturados ao tráfego público. O primeiro veículo foi configurado de forma permanente com modo ACC, para que o pelotão (composto por dois caminhões configurados com o CACC) interaja com outros veículos acionados manualmente no tráfego rodoviário. Nesse estudo, foram utilizados os seguintes atrasos: (i) atrasos no sensor e no processamento; (ii) atrasos devido à incompatibilidade de modelos e ao controle de realimentação; e (iii) atrasos na atuação do controle. Ambos os controles ACC e CACC têm a mesma estrutura, que é formada por dois níveis de controle. O nível superior de controle é baseado na cinemática da distância e velocidade desejadas até a aceleração/desaceleração desejada. Já o nível mais baixo de controle é baseado na aceleração/desaceleração desejada até o torque desejado do motor/frenagem. O controle implementado é baseado no projeto PATH (R. RAJAMANI *et al.*, 2000) (CACC PATH). Nos experimentos a topologia utilizada foi a PLF e alguns atrasos foram desconsiderados no momento da implementação do controlador, como por exemplo, atrasos na transmissão de informações através da comunicação sem fio.

Schaeufele *et al.* (2017) buscaram expandir o conceito de controle longitudinal cooperativo introduzindo o planejamento de controle de múltiplos objetos, levando em consideração não apenas o veículo líder, mas também o conhecimento do ambiente compartilhado entre veículos e infraestrutura. Assim, o sistema buscou ser capaz de rastrear veículos diretamente à frente, seja por cooperação direta ou por conhecimento transmitido, tornando possível adaptar adequadamente o controle longitudinal. A comunicação segue o padrão IEEE 802.11p e a ETSI ITS G5. Os autores utilizaram a topologia PLF em todos os experimentos realizados e seus cenários foram simulados no PHABMACS. Eles também estudaram o impacto que a taxa de uso do CACC pode causar no cenário rodoviário. Os pesquisadores buscaram investigar problemas na comunicação, como atrasos e perda de pacotes. Nos cenários simulados não há a presença de outros veículos na via, a não ser os seis veículos pertencentes ao pelotão estudado.

Santini *et al.* (2017) descrevem a dinâmica longitudinal do veículo como um modelo não linear, que envolve a resistência do motor, do asfalto e do pneu, a gravidade e o arrasto aerodinâmico. Este modelo está próximo da dinâmica real do veículo, pois leva muitos parâmetros do veículo e do ambiente em consideração. Além disso, os autores propõem melhorias no controlador desenvolvido em (SANTINI *et al.*, 2015). O controlador proposto por Santini *et al.* (2017) tem como ideia principal considerar o pelotão como um problema de consenso de alta ordem que representa uma topologia de comunicação não fixa com atrasos variáveis no tempo. Os autores, por meio do consenso, buscam que todos os nós de uma rede cheguem a um acordo, ou seja, no estado estacionário todos devem convergir para o mesmo objetivo. O trabalho amplia

as análises realizadas por Bernardo *et al.* (2015), que buscou investigar atrasos na comunicação em cenários de pelotões veiculares. O trabalho desenvolvido por Santini *et al.* (2017) utiliza a abordagem de comunicação chamada de Jerk Beaconing (JB) (M. SEGATA *et al.*, 2015). *Jerk* é uma medida da variação da aceleração dos veículos ao longo do tempo. Usando este conceito, o JB, foi proposto como uma estratégia para controle do envio de *beacons* para aplicações de pelotões. A ideia principal é – através de uma estimativa contínua do *jerk* do veículo – um mecanismo de controle de *beacons* decide dinamicamente se um novo *beacon* deve ou não ser enviado. Os resultados obtidos mostraram que, associado a um controle de potência de transmissão e um mecanismo de entrega confiável, o JB melhora a segurança geral do sistema e reduz o consumo de recursos, quando comparado com uma abordagem de *beaconing* não adaptativa. O controlador proposto por Santini *et al.* (2017) tem como objetivo manter uma distância fixa entre veículos de 25 metros, a uma velocidade constante. A distância interveicular é obtida pelo sensoriamento, enquanto a velocidade é obtida através da comunicação V2V. A abordagem de controle proposta (TESTCC) é comparada com as abordagens ACC padrão e o CACC PATH (R. RAJAMANI *et al.*, 2000) em um pelotão de oito veículos viajando em uma rodovia, com o líder continuamente mudando sua velocidade de forma senoidal. Os autores definem como trabalho futuro a investigação do desempenho do TESTCC em cenários com fluxos rodoviários diferentes.

Os pesquisadores Y. Zhu *et al.* (2018) propuseram uma estrutura de controle ótimo adaptativo que usa uma estimativa de parâmetros dinâmicos para transformar o CACC heterogêneo no problema de regulação da dinâmica de erro para cada veículo no pelotão. A função de transferência de posição entre veículos adjacentes é analisada no domínio da frequência. Pela soma da programação dos quadrados, os valores mínimos de *headway* que garantem a estabilidade do pelotão veicular são encontrados. A topologia de comunicação usada em todos os experimentos foi a PF. O CACC proposto tem resultados superiores ao ACC apresentado, porém os autores mostram que o CACC proposto sofre com fluxos elevados de veículos e que mantém sua estabilidade apenas em cenários com fluxo moderado de veículos. Atrasos como, de atuação, de comunicação e falhas na transmissão de informação não são levados em consideração.

Lyamin *et al.* (2018) realizaram experimentos voltados à investigação do impacto da implementação da Norma EN 302 637-2 proveniente do padrão ETSI, na estabilidade de pelotões veiculares. Os autores buscaram mostrar que o padrão ETSI pode sofrer uma diminuição no desempenho da comunicação sob vários padrões de mobilidade realistas. Além disso, a influência dos fenômenos descobertos na operação de controle de acesso ao meio IEEE 802.11p foi estudada. Na abordagem de comunicação são utilizadas mensagens CAM para disseminar a informação local de cada um dos veículos do pelotão. O controlador usado é baseado nas abordagens CAH

(do inglês, *Constant-Acceleration Heuristic*) (ARNE *et al.*, 2010) e Connect & Drive (Jeroen PLOEG *et al.*, 2011). Porém, os autores realizaram simplificações no modelo de controle, como a velocidade do pelotão ser constante, não haver distância mínima necessária entre veículos e os condutores reagirem sem atraso (tempo de reação zero). Os autores concluíram que a norma estipulada pelo padrão ETSI gera sobrecarga na rede por conta da disseminação de mensagens de controle, desta forma, eles defendem a implementação de controle de carga para que a norma possa ser utilizada em cenários voltados aos pelotões.

Nunen *et al.* (2019) propuseram uma abordagem de controle preditivo em combinação com um projeto de controle de *feedforward*, que é baseado em um vetor compartilhado de acelerações previstas ao longo de um horizonte de tempo finito. Essa abordagem é aplicada em um pelotão heterogêneo de veículos. Os autores definem que as condições necessárias para que haja estabilidade no pelotão estudado sigam as condições operacionais nominais (sem frenagem de emergência, levando a situações inseguras e saturações de atuadores). O trabalho utiliza a topologia PLF. Nos estudos realizados não foram levadas em consideração métricas voltadas a provar a confiabilidade da comunicação existente no ambiente veicular.

3.2 COMPARATIVO ENTRE TRABALHOS RELACIONADOS

Na Tabela 2 é apresentada uma comparação das abordagens descritas, considerando as seguintes características: (i) co-projeto e parâmetros variantes (ganho do controlador de acordo com informações provenientes do protocolo de comunicação); (ii) topologia de comunicação escolhida; (iii) se a abordagem leva em consideração atrasos na comunicação; (iv) quais fluxos veiculares foram usados nas experimentos realizados; e (vi) se a abordagem implementa algum mecanismo de controle de carga.

Dentre os dezoito trabalhos analisados, apenas quatro foram implementados em cenários reais. Todas as abordagens usam um mecanismo de seleção de candidatos para a retransmissão de informação no cenário. No caso de aplicações de segurança, no entanto, elas selecionam o nó retransmissor de formas diferentes. Somente dois trabalhos relacionados investigaram seu desempenho em mais de uma topologia de comunicação e onze consideram o atraso na comunicação. As abordagens pesquisadas não tratam os ganhos do controlador de forma variante e também não levam em consideração informações do protocolo de comunicação para o cálculo dos coeficientes de amortecimento e rigidez do controlador. Todos os trabalhos levantados não analisaram as abordagens de controle em cenários com fluxo veicular denso. Finalmente, dezessete trabalhos não implementam nenhum tipo de controle de carga para diminuir a quantidade de retransmissões no cenário.

Na Tabela 2, as abordagens mais relevantes são destacadas em negrito: CACC PATH (R. RAJAMANI *et al.*, 2000), Connect & Drive (ÖNCÜ *et al.*, 2014), DOT-PATH

Tabela 2 – Comparação entre trabalhos relacionados

Trabalhos Selecionados (ordem cronológica)	Co-projeto Parâmetros Variantes	Topologia de Com.	Atraso na Com.	Fluxo Veic. Util.	Controle de Carga
Swaroop e Hedrick (1996)	Não	PLF	Não	ME	Não
R. Rajamani et al. (2000)	Não	PLF	Não	N	Não
Naus et al. (2010)	Não	PF	Não	ME	Não
Lidstrom et al. (2012)	Não	PLF	Não	ME	Não
Ghasemi e Kazemi (2013)	Não	BD	Não	ME	Não
L. Y. Wang et al. (2014)	Não	PF	Sim	ME	Não
Öncü et al. (2014)	Não	PLF	Sim	ME	Não
Bernardo et al. (2016)	Não	PLF	Não	ME	Não
L. Zhang e G. Orosz (2016)	Não	PLF	Sim	N	Não
Zheng et al. (2016)	Não	BD e BDL	Sim	ME	Não
Chitra e Sathya (2016)	Não	BD	Sim	E	Não
Gao et al. (2017)	Não	PLF	Sim	ME	Não
X. Lu e S. Shladover (2017)	Não	PLF	Sim	N	Não
Schaeufele et al. (2017)	Não	PLF	Sim	N	Não
Santini et al. (2017)	Não	PF, PLF e BD	Sim	N	Sim
Y. Zhu et al. (2018)	Não	PF	Sim	ME	Não
Lyamin et al. (2018)	Não	PLF	Não	ME	Não
Nunen et al. (2019)	Não	PLF	Sim	ME	Não
AddP-CACC	Sim	PF, PLF e BD	Sim	ME-D	Sim

Muito Esparso (ME): 500, 600 e 800 v/h, Esparsos (E): 1000 e 2000 v/h, Normal (N): 3000 e 4000 v/h e Denso (D): 5000 v/h.

(CHITRA; SATHYA, 2016) e TESTCC (SANTINI *et al.*, 2017). As abordagens destacadas foram selecionadas por suas características ou porque são as mais citadas na literatura. Essas abordagens têm seus resultados comparados aos resultados obtidos pela abordagem proposta nesta tese, AddP-CACC, na Seção 5.3.1.

3.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Ao analisar as abordagens estudadas neste capítulo, pode-se verificar que algumas características são importantes e necessárias para que uma abordagem possa prover estabilidade ao conjunto veicular e confiabilidade ao transmitir uma mensagens em uma rede móvel. Estas características devem ser levadas em consideração no desenvolvimento da nova abordagem e de seus mecanismos que buscam prover confiabilidade e estabilidade em um meio não confiável, como por exemplo, as VANETs.

Sendo assim, compreender as abordagens existentes, bem como avalia-las e compará-las é um passo importante para a construção de novos modelos. Este

Capítulo apresentou os trabalhos encontrados a partir de uma revisão sistemática da literatura e referenciados por diversos autores que procuram prover estabilidade a pelotões veiculares e que consideram questões voltadas à rede de comunicação, que tem como alvo a confiabilidade na disseminação de dados em redes móveis. Os trabalhos descritos serviram de embasamento para o desenvolvimento da abordagem proposta descrita no próximo capítulo.

4 ABORDAGEM PROPOSTA

O uso das redes veiculares visa aumentar a segurança do tráfego e melhorar consideravelmente a mobilidade entre os veículos, sendo a transmissão de mensagens entre os nós um dos principais desafios, de forma que a entrega destas mensagens seja confiável (DOTZER *et al.*, 2005). O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver uma abordagem NCS que provê confiabilidade na comunicação e estabilidade em formações de pelotões veiculares.

No capítulo anterior foram apresentados métodos e soluções que buscam a confiabilidade na disseminação de dados e controle em pelotões. Nesses métodos, aspectos importantes relacionados à mobilidade e comunicação, tais como variações bruscas na densidade de veículos, troca de *beacons* sem controle de carga, queda momentânea de enlaces, problema do nó oculto, comumente encontrados na redes veiculares, são usualmente negligenciados.

Para preencher essas lacunas deixadas por essas soluções, propõe-se uma abordagem que utilize comunicação em VANETs para coletar informações dos veículos que estejam trafegando na rodovia para viabilizar a manutenção de pelotões veiculares. Além disso, busca-se fornecer confiabilidade à disseminação de informação pela rede veicular e desta forma, mitigar o problema de terminal oculto e diminuir a quantidade de mensagens que são trocadas entre os nós móveis. Esta abordagem preenche a lacuna deixada pelas atuais propostas, pois se adapta ao ambiente de comunicação encontrado em cenários de tráfego rodoviário.

4.1 VISÃO GERAL

Os elementos fundamentais de uma rede veicular são seus nós e nesta proposta assume-se que existem dois tipos de nós, os fixos e os móveis. Nesta tese, o termo nó diz respeito a qualquer dispositivo de comunicação conectado a rede veicular. Considera-se como premissas que cada veículo (nó) tem sua identidade definida de forma única na rede baseada no endereço MAC do módulo de rede do nó. Os veículos participantes da rede possuem componentes que possibilitam a comunicação e a execução dos aplicativos tais como; sensores, unidades de armazenamento, unidade de comunicação sem fio, sistema de posicionamento (GPS) e uma interface com o usuário para mostrar ao condutor os alertas e a localização dos eventos relatados.

Considera-se ainda que, os eventos podem ser sempre detectados pelos sensores presentes nos veículos e que o GPS proporciona uma precisão suficiente para detectar em qual local da rodovia encontra-se o veículo e em qual momento exato houve sinalização. O funcionamento dos sensores e a tecnologia empregada estão fora do escopo deste trabalho.

A abordagem proposta é composta por um protocolo de comunicação confiável

e um controle cooperativo e adaptativo baseado em consenso. O protocolo de comunicação é formado por três módulos que são descritos a partir da Seção 4.2. Já o controlador trata as informações provenientes da comunicação e do sensoriamento. A visão geral da abordagem proposta pode ser observada na Figura 10.

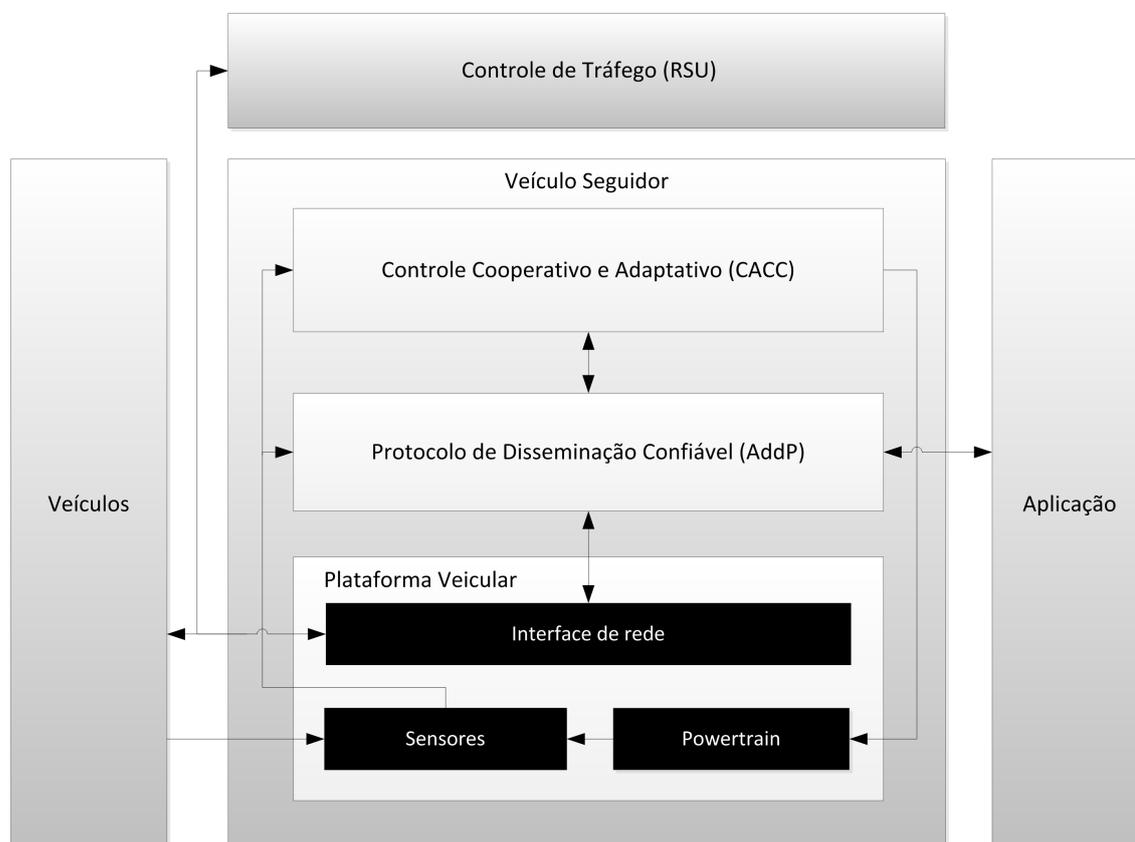


Figura 10 – Visão geral da abordagem proposta

A estratégia de controle cooperativo para pelotões veiculares proposta neste capítulo está fundamentada nos princípios de cooperação apresentados no Capítulo 2. Estes princípios são utilizados na construção da estratégia de controle e também servem como parâmetros para garantir o consenso para o grupo de veículos. Ainda neste capítulo é apresentado o protocolo de comunicação confiável desenvolvido para trabalhar em conjunto com o controlador proposto, seus módulos e mecanismos. Também é apresentado o modelo matemático utilizado para representar a dinâmica longitudinal de cada veículo pertencente ao pelotão. Em seguida, a metodologia utilizada para descrever a abordagem de controle. Por fim, é descrito o modelo em malha-fechada que representa a dinâmica do erro de espaçamento entres os veículos do pelotão.

4.2 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

Para que haja controle em um pelotão veicular, os veículos pertencentes a cadeia devem trocar informações durante o percurso (ELEFTERIADOU, 2013). Esta troca

de informações permite que os veículos possam trafegar com distâncias interveiculares menores do que em cenários que não possuem essa comunicação entre os nós da rede. Diante disso, faz-se necessário o desenvolvimento de um sistema de comunicação que seja robusto, eficiente e eficaz no que diz respeito à transmissão de dados em um ambiente veicular. No trabalho (R. OLIVEIRA *et al.*, 2017), fruto das pesquisas realizadas durante esta tese, foi proposto um novo protocolo *multi-hop* de difusão confiável, chamado AddP (Adaptive Data Dissemination Protocol) para ser utilizado em aplicações LDW e EEBL.

O AddP utiliza a densidade, distância e direção dos nós vizinhos para selecionar os veículos que retransmitirão as mensagens de aviso. O AddP baseia-se em uma abordagem de *beacons* periódicos, as chamadas mensagens de consciência cooperativa (CAM) (ETSI, 2013). A troca de *beacons* permite que os nós (veículos) notifiquem outros nós, que estão localizados a um salto de distância, de sua presença e seu *status*. Estes *beacons* contêm a identificação do veículo, a densidade local, a velocidade, a posição e a outras informações pertinentes a seus vizinhos. No entanto, quando ocorre congestionamento no canal sem fios (por exemplo, numa rede densa), é necessário reduzir a carga de *beacons* para manter uma certa quantidade de largura de banda disponível para as mensagens de aviso, porque elas transportam informações críticas de grande importância. Portanto, o AddP usa o mecanismo chamado de *Adaptive Beacon Congestion Control* para evitar sobrecarga na comunicação do pelotão e para garantir que a transmissão de um alerta no momento da frenagem seja realizada sem interferências.

Ao processar o *beacon*, cada veículo está ciente de outros veículos que fazem parte do pelotão e as mensagens de aviso disseminadas na rede veicular. Quando um veículo recebe um *beacon*, este atualiza sua base de conhecimento (KB) que contém a lista de mensagens recebidas e as informações pertinentes de seus vizinhos.

A seleção de nós para realizar a retransmissão de mensagens é considerada como uma das fases mais importantes em um protocolo difusão *multi-hop* eficiente. Para reduzir o número de mensagens redundantes de retransmissão e conflito de canal, no protocolo proposto, os veículos usam o mecanismo *Candidate Selection* com base na informação de densidade local, distância e direção dos nós vizinhos para determinar qual deles retransmitirá o alerta. Além disso, todos os nós monitoram o nó de retransmissão. Se o escolhido não retransmitir a mensagem em um determinado período de tempo, um dos seus vizinhos irá fazê-lo.

Para reduzir o número de mensagens de aviso retransmitidas na rede, o AddP usa um mecanismo de *Warning Message Aggregation* que implementa uma técnica de codificação de rede simples baseada na operação lógica (XOR) para fornecer agregação de mensagens. Em cenários com mais de uma mensagem de aviso a ser divulgada na rede, o protocolo proposto executa operação XOR e faz uso de apenas

uma retransmissão para ambas as mensagens.

Todos os veículos usam *Disseminated Messages Monitoring* para verificar se um nó selecionado retransmitiu o aviso atual. Caso contrário, o vizinho transmite a mensagem de aviso. Esse mecanismo é usado para resolver o problema do nó oculto e aumentar a confiabilidade da disseminação em cenários de densidade esparsa. O AddP consiste em três módulos operacionais, denominados de: *Beacon Control and Sending*, *Determination of Neighbourhood* e *Efficient and Reliable Data Dissemination* conforme ilustrado na Figura 11.

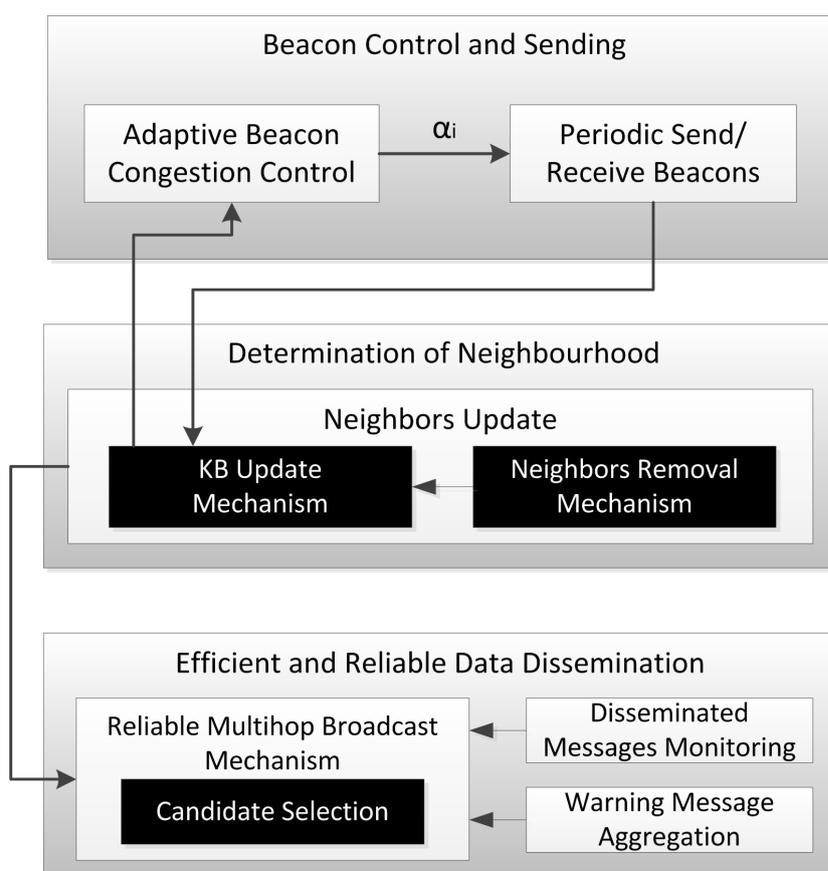


Figura 11 – Módulos do protocolo de comunicação AddP

4.2.1 Módulo *Beacon Control and Sending*

O raio de comunicação do nó i é chamado r_i e define um intervalo de transmissão, representado por um círculo no qual i fica no seu centro e todos os nós que estão dentro deste círculo são chamados de vizinhos ou membros da vizinhança. Os nós dentro da faixa de transmissão do nó são considerados vizinhos a um salto de distância. No AddP, apenas as informações a um salto de distância são usadas para obter informações sobre a vizinhança.

O módulo *Beacon Control and Sending* é responsável pela transmissão dos *beacons* para vizinhos a um salto. A troca de *beacons* é a solução mais importante para

protocolos de difusão seletiva para descobrir e trocar informações locais. O módulo em questão tem dois modos de trabalho: (i) para aplicações LDW e EEBL; e (ii) para prover estabilidade de pelotões veiculares. No que se diz respeito a aplicações LDW e EEBL, em certos cenários, por exemplo, em cenários de alta densidade, a troca de *beacons* periodicamente pode causar uma grande quantidade de colisões de pacotes (LE *et al.*, 2011). A abordagem AddP usa mensagens de *beacons* periódicas (BM) e, para diminuir a sobrecarga em redes densas, implementa um mecanismo chamado de *Adaptive Beacon Congestion Control*. Este mecanismo ajusta o tempo entre *beacons* de acordo com a densidade do nó local. Em um cenário denso, esse intervalo de tempo será mais longo do que em cenários esparsos, deixando o canal de comunicação mais livre para ser usado por mensagens de aviso.

O tempo entre as retransmissões de *beacons* (Tb_i) de um nó i é calculado de acordo com a Equação 15:

$$Tb_i = (Pf + (D_i.TpV)) - Rand[0, 0.002], \quad (15)$$

onde Pf representa um período entre *beacons* mínimo fixo, igual a todos os nós (milissegundos), D_i determina a densidade do nó i , que é o número de vizinhos a um salto de distância, TpV define o tempo que cada veículo adiciona ao cenário (milissegundos). Finalmente, $Random[0,0.002]$ representa um deslocamento de tempo que é gerado aleatoriamente entre 0 e 2 ms. Esse deslocamento é usado para minimizar a probabilidade de dois ou mais nós terem o mesmo tempo entre retransmissões. O tempo Tb_i é calculado sempre que a densidade do nó i é alterada (inserção ou remoção de vizinhos).

Os campos de uma BM estão listados na Tabela 3. As mensagens de controle são usadas pelos nós para construir sua KB local, que contém a base de mensagens recebidas e as informações pertinentes de seus vizinhos (base de vizinhança), conforme descrito na próxima seção. Os campos relacionados a posições de nó e velocidade (p_i e v_i) são usados no mecanismo chamado de *Neighbors Removal* também descrito na Seção 4.2.2 e o identificador da última mensagem de aviso recebida (IdW_i) é usado no mecanismo *Disseminated Messages Monitoring* descrito na Seção 4.2.3.

4.2.2 Módulo *Determination of Neighbourhood*

Conforme ilustrado na Figura 11, o módulo de *Determination of Neighbourhood* é responsável pela atualização da KB local. Quando o nó i recebe uma BM, atualiza sua *base de vizinhança* que contém identificadores de vizinhos e todos os outros campos do BM recebido. O mecanismo KB *Update* também tem a tarefa de atualizar as mensagens de aviso recebidas por um nó. A base de mensagens recebidas é atualizada quando uma nova mensagem de aviso é criada, recebida ou quando uma mensagem teve seu tempo de vida expirado. Neste último caso, a mensagem de

Tabela 3 – Mensagem de Controle (BM)

Campos	Descrições
Id_i	Identificador do nó (endereço MAC)
Lp_i	Informa se o nó i é líder de pelotão
D_i	Densidade Local do nó
$d_{i,i-1}$	Distância entre i e $i-1$ (veículo à frente) (m)
Ap_i	Posição anterior no instante t^k
p_i	Posição atual no instante t^k
Av_i	Velocidade anterior do nó i no instante t^k (m/s)
v_i	Velocidade atual do nó i no instante t^k (m/s)
IdW_i	Identificador da última mensagem de aviso recebida
BM_i	Tipo da mensagem de controle (BM)
T_i	<i>Timestamp</i> (quando a mensagem foi gerada)

aviso é removida da base. Em seguida, o nó precisa transmitir uma mensagem de controle, chamada de WR, para que seus vizinhos também possam atualizar sua base de mensagens recebidas. Os campos de uma WR estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Mensagem de Controle (WR)

Campos	Descrições
IdW_i	Identificador da mensagem de alerta
Tr_i	<i>Timestamp</i> (quando a mensagem foi revogada)
BM_i	Tipo da mensagem de controle (WR)

Devido à alta mobilidade dos nós, o protocolo proposto precisa determinar quais vizinhos ainda estão ativos dentro da faixa de comunicação de um nó (se ainda fazem parte do pelotão). Para este propósito, cada veículo usa o mecanismo *Neighbor Removal* para manter sua base de vizinhos atualizada. Esse mecanismo, além de contribuir para o desempenho do AddP ao reduzir o tamanho do KB, contribui para a seleção de um candidato adequado para ser o nó de retransmissão da mensagem de aviso.

O mecanismo *Neighbor Removal* tem duas tarefas denominadas: *Timeout Adaptation* e *Connectivity Detector*. O *Timeout Adaptation* tem como objetivo determinar um tempo apropriado para aguardar mensagens de *beacons* dos vizinhos. Cada nó i , ao receber um BM de um nó j , precisa determinar o tempo limite (β_j) para aguardar o próximo BM de j . O valor do tempo limite (milissegundos) é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$\beta_j = Pf + (D_j \cdot TpV). \quad (16)$$

A Equação 16 é semelhante à Equação 15 para determinar o tempo entre as

mensagens de *beacons*, onde P_f representa um período mínimo fixo, D_j determina a densidade do nó j^1 , TpV define o tempo que cada veículo adiciona ao cenário.

O fluxograma ilustrado na Figura 12 mostra os passos do mecanismo *Neighbor Removal*. Quando um nó recebe um BM, precisa saber se o nó que enviou o *beacon* está na base de vizinhança. Se for um novo vizinho, o KB *Update* insere o nó em sua base de informação. Em seguida, o mecanismo *Neighbor Removal* calcula o tempo limite (β_j) para aguardar o próximo BM do mesmo nó. Depois disso, o mecanismo cria um novo subprocesso para contagem decrescente do tempo limite.

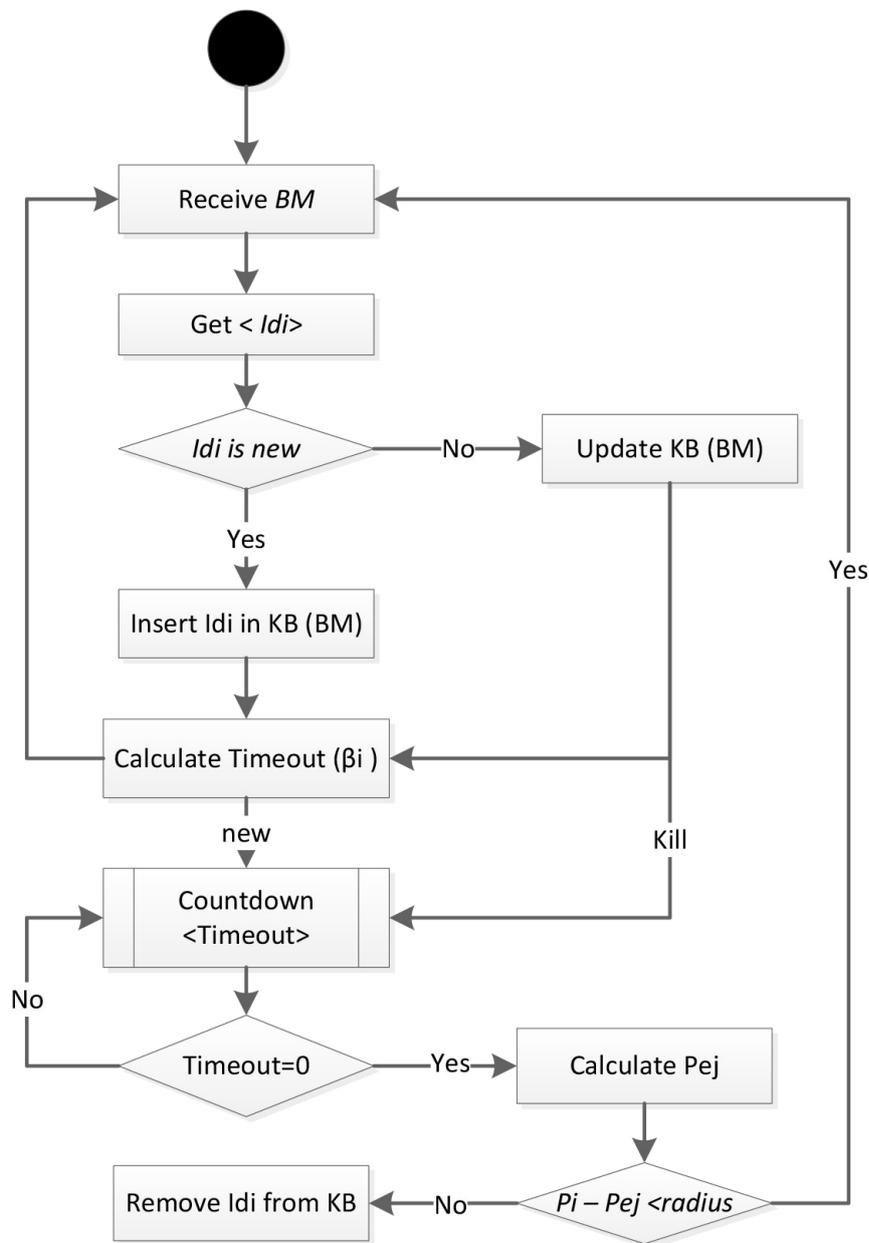


Figura 12 – Mecanismo *Neighbor Removal*

Quando o tempo limite (β_j) expira, o segundo procedimento (*Connectivity De-*

¹ O nó i obtém essa informação do BM recebido de j

tector) é executado para confirmar se o nó j , que não enviou um BM, ainda está no raio de cobertura do nó i . Devido aos problemas de comunicação sem fio subjacentes, tais como perda de pacotes, atrasos e problema de nó oculto, este segundo procedimento é necessário para evitar a remoção e reinserção frequente de nós na base de vizinhança.

O procedimento *Connectivity Detector* visa estimar se um vínculo de comunicação entre dois vizinhos permanece válido. Então, o nó i precisa estimar a posição do nó j , cujo BM não foi recebido (em caso de falhas na comunicação). Se a diferença entre as posições de nó i e do nó j for menor que o raio de comunicação, considera-se que o nó j está ainda dentro da área de cobertura do nó i , Então o nó j deve permanecer na base do nó i . Caso contrário, nó j deve ser removido da base (ver Figura 12).

A posição estimada do nó j (Pe_j) é calculada de acordo com a Equação 17:

$$Pe_j = |dpA_{i,j} + (TDp_j \cdot M_j)|, \quad (17)$$

onde a componente $dpA_{i,j}$ é a distância do nó j para o nó i no instante em que o *beacon* foi enviado (ver Equação 21). TDp_j é a estimativa de distância percorrida pelo nó j , depois de enviar seu último *beacon* e M_j indica se o nó j está se aproximando do nó i (assume o valor -1) ou se o nó j está se afastando do nó i (assume o valor +1).

A estimativa da distância percorrida TDp_j (metros) é definida pela Equação 18:

$$TDp_j = (t_i^k - t_j^{last}) \cdot v_j, \quad (18)$$

na qual, t_i^k é o tempo atual do nó i , t_j^{last} é o último *timestamp* recebido do vizinho j e v_j é a última velocidade conhecida do nó j .

No Algoritmo 1 é descrito como o nó i obtém M_j , onde TD_j é obtido pela Equação 19. Na Equação 19, $dpA_{i,j}$ é a distância do nó j ao nó i no instante em que o *beacon* foi enviado e $dpP_{i,j}$ é a distância do nó j para i em uma posição anterior. Para calcular essas distâncias, o mecanismo usa a distância euclidiana bidimensional (ver Equações 20 e 21).

Entrada: TD_j

Saída: M_j

início

$TD_j \leftarrow$ Calcula a distância do nó j ; (ver Equação 19);

se ($TD_j \geq 0$) **então**

 | return $M_j = -1$;

senão

 | return $M_j = +1$;

fim

fim

Algoritmo 1: Obter a proximidade do nó j

$$TD_j = dpP_{(i,j)} - dpA_{(i,j)} \quad (19)$$

$$dpP_{(i,j)} = \sqrt{(x_i - xA_j)^2 + (y_i - yA_j)^2} \quad (20)$$

$$dpA_{(i,j)} = \sqrt{(x_i - xI_j)^2 + (y_i - yI_j)^2} \quad (21)$$

4.2.3 Módulo *Efficient and Reliable Data Dissemination*

Como mencionado anteriormente, o propósito do AddP é disseminar mensagens de aviso para o maior número possível de nós de uma maneira eficiente. Na Seção 4.2.1, foi descrito como os veículos enviam e controlam os *beacons* para obter informações da vizinhança usando o AddP. Em seguida, na Seção 4.2.2, foi descrito como o módulo *Determination of Neighbourhood* é responsável por atualizações da base de conhecimento local de um veículo. Nesta seção, são descritas outras características do protocolo de transmissão *multi-hop* confiável proposto.

4.2.3.1 Mecanismo *Candidate Selection*

Em aplicações LDW e EEBL, a seleção de um nó retransmissor ocorre quando um nó deseja transmitir ou retransmitir uma mensagem de dados na rede. O nó i , antes de selecionar um nó de retransmissão, verifica sua base de vizinhança (NB) para ver quantos vizinhos estão na base. Se o nó i tiver informações insuficientes², então i envia uma mensagem de controle, chamada de RB, para forçar seus vizinhos a enviar novos *beacons* para atualizar sua base e também verificar se houve mudança no pelotão.

Para determinar o nó mais adequado para retransmitir a mensagem de aviso, o nó i calcula o ganho G_j de cada vizinho que está em sua NB. O cálculo do ganho é dado pela Equação 22:

$$G_j = (w \cdot \frac{B_j}{Th_B} + (w - 1) \cdot \frac{D_j}{Th_D}) \cdot Lp_j. \quad (22)$$

Esse ganho é usado para qualificar os nós vizinhos. O nó que tem o maior ganho será selecionado como o nó de retransmissão. Desta forma, no pelotão veicular, a arquitetura de comunicação baseia-se na organização hierárquica (*clusters*). Ainda na Equação 22, D_j indica a densidade local do nó j . O mecanismo *Candidate Selection* assume que quanto maior a densidade local de um nó, mais provável será que este nó espalhe a mensagem para um número maior de nós. B_j é a distância do veículo j ao veículo i . O mecanismo proposto dá preferência aos nós mais próximos das bordas do raio de comunicação. Lp_j indica se o nó j é líder do pelotão. Caso o nó seja líder, será prioritário. Para calcular a distância B_j , o mecanismo proposto utiliza a distância

² O número de vizinhos é menor que um *threshold* parametrizável.

euclidiana, que leva em conta as coordenadas x e y de cada veículo, de acordo com a Equação 23:

$$B_j = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (23)$$

onde x_i e y_i representam as coordenadas do veículo i , x_j e y_j representam as coordenadas do veículo j . O maior valor de B_j indica que o veículo é o mais próximo da borda do raio de comunicação. Portanto, a mensagem de dados será melhor difundida para os outros nós. Um limite de distância (Th_B) é definido para B_j . Neste caso, o limiar é definido pela cobertura de raio do nó i . De forma semelhante, um limite de densidade deve ser definido para diferentes cenários.

Finalmente, na Equação 22, o peso (w) determina a influência de cada componente (distância e densidade local) para calcular o ganho G_j . Em cenários de alta densidade, é interessante dar maior importância a distância entre o transmissor e o retransmissor. Nesse caso, quando a mensagem atingir as bordas do raio de comunicação, será transmitida, o mais longe possível.

Depois de determinar qual nó será o retransmissor, o nó i pode formar a mensagem de alerta WR, com os campos listados na Tabela 5, e transmitir a mensagem. É importante enfatizar que um nó transmite uma WM apenas uma vez. Então, antes de enviar uma WM, o nó verifica em sua base de mensagens de aviso recebidas para verificar se essa mensagem já foi transmitida.

Tabela 5 – Mensagem de Alerta (WM)

Campos	Descrições
IdW	Identificador do Alerta
Id_i	Identificador do nó i (endereço MAC)
ToM	Tipo da Mensagem
$Desc$	Descrição do alerta
x_i, y_i	Coordenadas GPS que indicam onde foi o evento
TTL	Tempo de vida da WM
T_i	WM <i>Timestamp</i>
Tag	Indica se é uma mensagem única ou mensagem agregada (0 - mensagem única)
$Relay$	Identificador do nó retransmissor

4.2.3.2 Mecanismo *Disseminated Messages Monitoring*

Como mencionado anteriormente, o mecanismo *Disseminated Messages Monitoring* visa fornecer maior confiabilidade à disseminação de dados e resolver o problema do nó oculto. Os veículos monitoram mensagens de aviso disseminadas na rede. Os veículos usam isso para verificar se um nó de retransmissão selecionado já

retransmitiu uma mensagem de aviso específica. Caso não tenha, um nó vizinho deve fazê-lo.

No fluxograma ilustrado na Figura 13 podemos observar as etapas executadas pela aplicação quando um veículo recebe um WM. Depois que confirma que a mensagem é um aviso válido (TTL não está expirado) e é uma nova mensagem, a aplicação irá verificar quem deverá ser o retransmissor da mensagem recebida. Se o identificador de nó retransmissor for diferente do identificador do veículo, a aplicação calcula um tempo para esperar o nó selecionado retransmitir a WM (γ_k) e cria um novo processo para a contagem regressiva até este momento.

Quando um contador (*timeout*) é disparado, se o nó não receber o WM novamente, a aplicação retransmite a mensagem na rede. Se o nó receber o WM duas vezes, a aplicação interrompe a contagem regressiva. Esse tempo é calculado de acordo com a Equação 24:

$$\gamma_k = T_i + \frac{C}{ToM} + Rand[0, 0.002]. \quad (24)$$

Na Equação 24, T_i representa um tempo inicial fixo, que é igual para todos os nós, ToM é o tipo de mensagem de aviso, portanto indica a urgência da mensagem, C é um parâmetro de configuração de protocolo que é usado com ToM para determinar um tempo relacionado à urgência para disseminar a mensagem. Uma mensagem com alta prioridade (urgência), terá um tempo de espera menor do que uma mensagem de menor prioridade porque precisa ser transmitida o mais rápido possível. O componente $Rand[0, 0.002]$ representa um deslocamento de tempo aleatório que é usado para minimizar a probabilidade de que dois ou mais nós tenham o mesmo tempo de espera.

4.2.3.3 Mecanismo *Warning Message Aggregation*

De acordo com R. Oliveira *et al.* (2011), Dietzel *et al.* (2014) e Y.-D. Chen *et al.* (2015), o uso de agregação de dados usando codificação de rede e outras técnicas pode melhorar a disseminação de dados em redes veiculares. Neste trabalho, a operação XOR bit a bit pode ser utilizada em cenários onde existam duas mensagens de aviso a serem divulgadas na rede. Por exemplo, assume-se que o nó i tenha duas mensagens WM1 e WM2 na sua base de mensagens de aviso recebidas. Usando o mecanismo *Disseminated Messages Monitoring*, o nó i pode saber quais nós não receberam WM1 e não receberam WM2 durante um curto período de tempo $(T_a)^3$. Então o nó i , ao usar o mecanismo *Warning Message Aggregation*, pode decidir se agrega o WM1 e WM2 ($WM1 \oplus WM2$).

³ Este período de tempo é o mesmo para todos os nós na rede e é parametrizável.

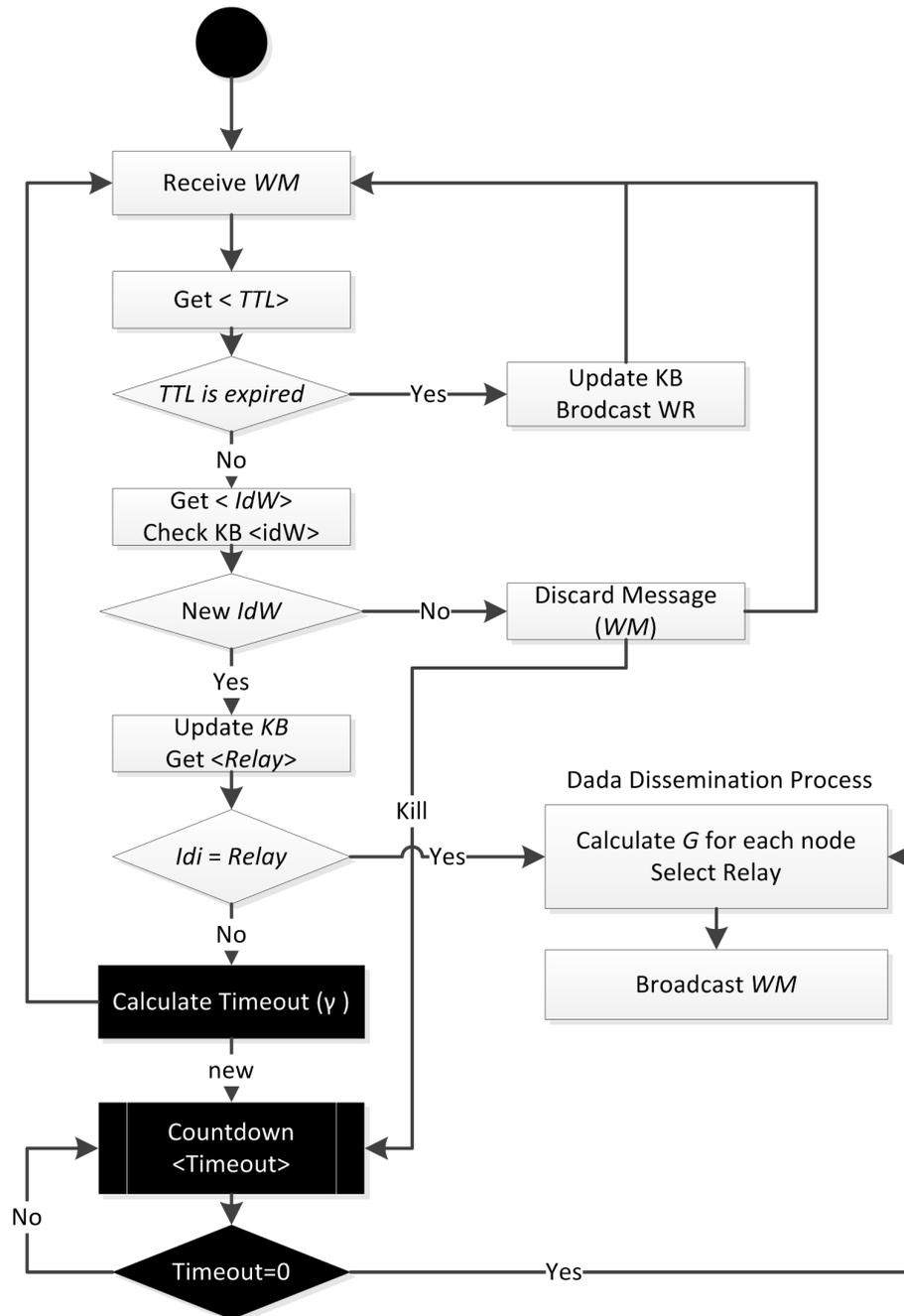


Figura 13 – Fluxograma AddP - Quando um nó recebe uma mensagem WM

No mecanismo proposto, para o nó i decidir se a agregação deve ser feita, é calculada a porcentagem de nós que não receberam WM1 em sua vizinhança de acordo com a Equação 25:

$$P_{xor} = \frac{TotalWM1}{SizeNB_i}, \quad (25)$$

onde $TotalWM1$ é o número de nós que não receberam WM1 durante o tempo Ta e $SizeNB_i$ é o tamanho da base de vizinhança. Se P_{xor} estiver acima de um limite ($Thag$), por exemplo, 40 %, a agregação ocorrerá. Caso contrário, as mensagens (WM1

e WM2) serão divulgadas separadamente.

O processo para definir se deve ser ou não realizada a operação XOR pode ser observado no Algoritmo 2. No Algoritmo 2 pode-se observar que ao verificar a existência de mais de uma mensagem vigente na rede e que P_{xor} está contido em $[Int_{inicial}, Int_{final}]$, o nó i gera o XOR das mensagens e o envia. Ao gerar o XOR das duas mensagens, o alerta recebe em seu campo Tag_k , o valor 1. Desta forma, fica sinalizado que a mensagem é um XOR de duas outras mensagens, e o nó receptor pode realizar o processo inverso, obtendo a mensagem que ainda não havia recebido. Com este mecanismo, a quantidade de retransmissões pode ser diminuída. Esta diminuição pode ocorrer pelo fato que i não terá que realizar duas vezes o processo de retransmissão de mensagens. Com a codificação de rede o protocolo proposto pode, em determinados cenários, atender nós vizinhos com menos retransmissões.

4.3 CONTROLE COOPERATIVO E ADAPTATIVO

A ideia do controlador proposto é considerar o pelotão como um problema de consenso de alta ordem, que é responsável por uma topologia de comunicação não fixa com atrasos no tempo. O consenso distribuído é uma maneira de abordar os NCSs. Em um problema de consenso, todos os nós em uma rede devem chegar a um acordo. Ou seja, no estado estacionário todos devem convergir para o mesmo objetivo. No caso particular de um pelotão de veículos, busca-se ter a mesma distância entre pares de veículos consecutivos.

Para representar o controle proposto, foram usados conceitos e equações apresentados na Seção 2.4.4. Ao considerar um pelotão com n veículos seguidores e um veículo líder, pode-se representar o fluxo de informação entre os seguidores por uma topologia de grafo direcionado $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, tal que $\mathcal{V} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ é o conjunto de n vértices e \mathcal{E} representa o conjunto de arestas que os conectam, dadas por $a_{ij} = (\alpha_i, \alpha_j)$. O vértice α_i representa o i -ésimo veículo do pelotão e cada aresta a_{ij} representa a existência de um canal de comunicação direcionado do veículo i para o veículo j . Para representar o fluxo de informações entre os seguidores e entre os seguidores e o líder, considera-se um grafo aumentado $\tilde{\mathcal{G}} = (\tilde{\mathcal{V}}, \tilde{\mathcal{E}})$, tal que $\tilde{\mathcal{V}} = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n\}$, no qual α_0 representa o veículo líder.

De acordo com o exposto na Seção 2.3, pode-se representar estes grafos de uma forma compacta. Para isso, são usadas as seguintes matrizes:

- **Matriz de Adjacência:** definida pela Equação 2, cujos elementos são: (i) $a_{ij} > 0$ se $(i, j) \in \mathcal{E}$ (se i recebe informação de j); e (ii) $a_{ij} = 0$ (se i não recebe informação de j);
- **Matriz de Valência:** definida pela matriz diagonal $\mathcal{D} = \text{diag} \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij} \right\}$;

início

```

MWi ← Conjunto de mensagens de alertas recebidas pelo nó i;
MBi ← Lista de mensagens de controle recebidas durante o TeBMmax;
LWi ← Lista temporária de mensagens de controle BM;
EnvioUltima ← falso;
cont ← 0;
intervalo ← [Intinicial, Intfinal] /* intervalo de probabilidade */;
Tarefa: T1 /* Recepção de atualização de dados */
ao receber mensagem de controle
se (i recebeu BM) então
  /* i aguarda o tempo de espera TeBMmax expirar */
  /* O nó i armazena todas as mensagens de controle recebidas na lista MBi até
  que o tempo de espera TeBMmax expire */
  repita
    se (BM.Idk = 0) então
      se (EnvioUltima = falso) então
        Alerta ← Recupera o último alerta em MBi;
        EnvioUltima ← verdadeiro;
        Enviar(WM);
      senão
        /* Verifica a próxima mensagem de controle BM */
    senão
      se (BM.Idk ∈ MWi) então
        se (BM.Idk ∉ LWi) então
          LWi ← Recupera alerta de MWi;
          cont++;
        senão
          BM ← GeraBM(Idi, Lpi, Di, di,i-1, Api, pi, Avi, vi, IdWi, BMi, Ti);
          Enviar(BM);
      até fim de MBi;
    se (cont > 1) então
      TamMBi ← sizeof(MBi);
      TotalWM1 ← Recupera o total de vezes que o WM1 aparece em MBi;
      Pxor ← CalculaPxor(TamMBi, TotalWM1);
      se (Pxor ∈ intervalo) então
        WM ← GeraXOR(LWi);
        Enviar(WM);
        MWi ← WM;
      senão
        repita
          Alerta ← Recupera WM de LWi;
          Enviar(WM);
        até fim de LWi;
    senão
      Alerta ← Recupera alerta de LWi;
      Enviar(WM);

```

Algoritmo 2: Recebimento de BM e Codificação de Rede

- **Matriz Laplaciana:** definida por $\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A}$; e
- **Matriz de Pivotamento:** definida por $\mathcal{P} = \text{diag}\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$, representa o fluxo de informação entre o líder e os seguidores, cujos elementos são: (i) $\varphi_i = 1$ se i recebe informação do líder; e (ii) $\varphi_i = 0$, caso contrário.

Desta forma, o conjunto de vizinhos de i é definido como:

$$\mathcal{C}_i = \{j \in \mathcal{V}_n \mid a_{ij} = 1\}. \quad (26)$$

Todas topologias de comunicação assumidas neste trabalho (mostradas na Seção 2.4.4) possuem pelo menos uma árvore geradora. Ou seja, cada veículo do pelotão obtém informações do veículo líder, seja diretamente ou indiretamente.

4.3.1 Dinâmica Longitudinal do Veículo

Ao se mover no plano, o veículo sofre ação de forças externas, tais como: força de arrasto, força gravitacional, força longitudinal dos pneus e força de atrito dos pneus. Dessa maneira, na Equação 27 é considerado um modelo simplificado e por meio da segunda lei de Newton, tem-se o balanço de forças no veículo:

$$m \times a(t) = f_p(t) - f_{at}(t) - f_{ar}(t), \quad (27)$$

onde m é a massa do veículo i , $a(t)$ a aceleração do veículo i , $f_p(t)$ a resultante das forças de rolamento no sentido do movimento, $f_{at}(t)$ a resultante das forças de rolamento no sentido contrário ao movimento e $f_{ar}(t)$ é força de arrasto no veículo. Na Figura 14 são representadas as forças consideradas na Equação 27.

O veículo i , ao se movimentar, fica sujeito a uma força de resistência do ar denominada força de arrasto. Ao desconsiderar a velocidade do vento, $f_{ar}(t)$ é expressa pela Equação 28:

$$f_{ar}(t) = \frac{1}{2} \rho \times c_d \times A_v \times v(t)^2, \quad (28)$$

onde ρ é a densidade do ar, c_d é o coeficiente de arrasto, A_v é a área frontal do veículo i e $v(t)^2$ é a velocidade do veículo i .

Segundo R. Rajamani (2011), a força longitudinal do veículo depende do torque emitido pelo motor e da eficiência de sua transmissão até as rodas. Ao considerar que o deslizamento longitudinal dos pneus é desprezível, a resultante da força longitudinal dos pneus é definida pela Equação 29:

$$f_p(t) = \eta \frac{T(t)}{r}, \quad (29)$$

onde η a eficiência do motor, $T(t)$ o torque recebido pelas rodas e r o raio da roda. Por fim, a força de atrito nos pneus do veículo depende da massa m , da aceleração da

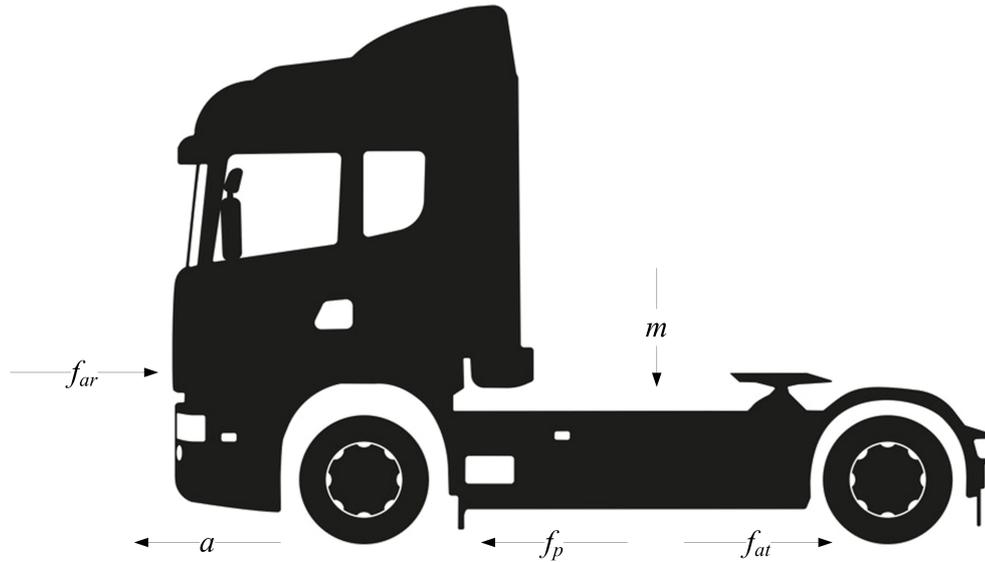


Figura 14 – Forças atuantes

gravidade g e do coeficiente de atrito μ . Ao considerar que o veículo é rígido e simétrico, a resultante da força de atrito nos pneus é expressa pela Equação 30:

$$f_{at} = m \times g \times \mu. \quad (30)$$

Desta forma, pode-se substituir na Equação 27 as Equações 28, 29 e 30. Diante das substituições realizadas, a aceleração do veículo é representada pela Equação 31:

$$a(t) = \frac{1}{m} \left(\eta \frac{T(t)}{r} - m \times g \times \mu - \frac{1}{2} \rho \times c_d \times A_v \times v(t)^2 \right). \quad (31)$$

Deste modo, a aceleração que se deseja é conservada por meio do torque proveniente dos atuadores de aceleração e frenagem. R. Rajamani (2011) definiu um modelo simplificado para retratar o torque no veículo resultante do torque desejado proveniente dos atuadores do veículo (Equação 32):

$$T_{des}(t) = \varsigma \times \dot{T}(t) + T(t), \quad (32)$$

onde $T_{des}(t)$ é o torque desejado e ς é o atraso inercial da dinâmica longitudinal do veículo (*powertrain*). Nota-se que a dinâmica longitudinal do veículo (Equação 31) não é linear. Sendo assim, como em (GUO; YUE, 2012; ZHENG *et al.*, 2016), assume-se que cada veículo é dotado de uma lei de controle linearizante

$$T_{des}(t) = \frac{r}{\eta} \left(\frac{1}{2} \rho c_d A_v v(t) (2\varsigma a(t) + v(t)) + mg\mu + m \times u(t) \right), \quad (33)$$

onde $u(t)$ é usado como sinal de controle para determinar a aceleração desejada de cada veículo. Assim, a partir da Equação 31, tem-se:

$$T(t) = \frac{r}{\eta} \left(m \times a(t) - mg\mu - \frac{1}{2}\rho c_d A_v v(t)^2 \right). \quad (34)$$

Ao calcular-se a derivada da Equação 34, tem-se:

$$\dot{T}(t) = \frac{r}{\eta} (m \times \dot{a}(t) + \rho c_d A_v v_i(t) a(t)). \quad (35)$$

Ao substituir a lei de controle expressa pela Equação 33 e as Equações 34 e 35 na Equação 32 tem-se:

$$\frac{r}{\eta} \left(\varsigma \rho c_d A_v v(t) a(t) + \frac{1}{2} \rho c_d A_v v(t)^2 + mg\mu + mu(t) \right) =$$

$$\frac{r}{\eta} (\varsigma m \dot{a}(t) + \varsigma \rho c_d A_{v_i} v_i(t) a(t)) +$$

$$\frac{r}{\eta} \left(ma(t) - mg\mu - \frac{1}{2} \rho c_d A_v v(t)^2 \right),$$

após as substituições e simplificações, o modelo linearizado para a dinâmica longitudinal do veículo é expresso (Equação 36):

$$u(t) = \varsigma \dot{a}(t) + a(t), \quad (36)$$

onde $a(t)$ é a aceleração do veículo; ς denota o atraso inercial do *powertrain*; e $u(t)$ é a entrada de controle. Ao escolher a posição de cada veículo $p_i(t)$, velocidade $v_i(t)$ e aceleração $a_i(t)$ como o estado, um modelo de terceira ordem é derivado para cada veículo:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t), \quad (37)$$

$$\text{onde } x_i(t) = \begin{bmatrix} p_i(t) \\ v_i(t) \\ a_i(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\varsigma_i} \end{bmatrix} e \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\varsigma_i} \end{bmatrix}.$$

4.3.2 Política de Espaçamento

Ao considerar os parâmetros relativos a qualquer par de veículos no pelotão de acordo com a representação da Figura 15, a distância entre os dois veículos adjacentes,

parados, pode ser expressa tanto em termos dos comprimentos dos veículos, quanto da distância de segurança requerida (SANTHANAKRISHNAN; R. RAJAMANI, 2003):

$$dp_{ij} = \frac{l_i}{2} + \frac{l_j}{2} + ds_{ij}, \quad (38)$$

onde ds_{ij} é a distância de segurança (isto é, a distância mínima a ser garantida entre dois veículos adjacentes) do veículo j até o veículo i e l_i, l_j são os comprimentos dos veículos (assume-se que a referência do veículo está localizada na metade do comprimento de cada veículo). Santhanakrishnan e R. Rajamani (2003) mostram que outras escolhas podem ser feitas com relação à posição da referência de cada veículo, por exemplo, localizada na frente do veículo.

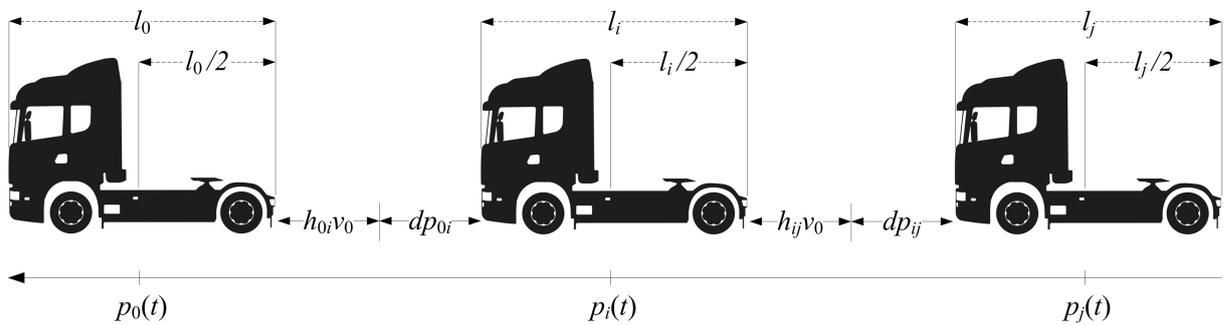


Figura 15 – Política de espaçamento (líder e dois seguidores)

Na Equação 38, a distância entre o i -ésimo veículo e qualquer um dos veículos (não necessariamente o adjacente) ao longo do pelotão ($i > j$) é:

$$dp_{ij} = \sum_{p=j+1}^i dp_{pp-1}. \quad (39)$$

De forma semelhante, a distância entre um veículo i e um de seus seguidores j (não necessariamente o adjacente) parados ($j > i$) pode ser expressa como:

$$dp_{ji} = \sum_{p=i+1}^j dp_{pp-1}. \quad (40)$$

Ao explorar as Equações 38 a 40, a distância entre os veículos i e j pode ser reformulada em relação ao veículo principal como $\hat{d}p_{ij} = \hat{d}p_{i0} - \hat{d}p_{j0}$. Além disso, destaca-se que $dp_{ij} = -dp_{ji}$. Neste trabalho assume-se que a distância desejada a se seguir é linearmente proporcional à velocidade líder

$$d_{ij} = h_{ij}v_0 + dp_{ij}, \quad (41)$$

e que o tempo de *headway* constante do veículo i com relação ao veículo j pode ser calculado a partir do tempo de *headway* em relação ao veículo líder $h_{ij} = h_{i0} - h_{j0}$ (por exemplo, com veículos em movimento na mesma velocidade constante).

4.3.3 Modelagem do Pelotão como Problema de Consenso

Ao considerar o cenário de pelotão da Figura 15, o comportamento do i -ésimo veículo é matematicamente descrito como o seguinte agente inercial ($i = 1, \dots, n$):

$$\begin{aligned}\dot{p}_i(t) &= v_i(t); \\ \dot{v}_i(t) &= a_i(t); e \\ \dot{a}_i(t) &= \frac{-a_i(t) + u_i(t)}{\varsigma},\end{aligned}\tag{42}$$

onde $p_i(t)$ (m), $a_i(t)$ (m/s^2) $v_i(t)$ (m/s) e $u_i(t)$ indica que a entrada de controle deve ser escolhida apropriadamente para alcançar a posição desejada, a manutenção da velocidade e as manobras de frenagem (ver Figura 15).

O modelo linear de veículo da Equação 42 pode ser derivado ao aplicar a linearização *input-output* (I/O) para simplificar a complexidade do modelo que descreve a dinâmica longitudinal de veículo. Por fim, o vetor de estado do i -ésimo veículo é definido como $x_i(t) = [x_i^{(1)}(t), x_i^{(2)}(t), x_i^{(3)}(t)]^T = [p_i(t), v_i(t), a_i(t)]^T \in \mathbb{R}^2$. Ao supor que o pelotão tenha que se mover com uma velocidade constante de referência, v_0 , a dinâmica de referência do líder pode ser descrita como:

$$\begin{aligned}\dot{p}_0(t) &= v_0(t); \\ \dot{v}_0(t) &= a_0(t); e \\ \dot{a}_0(t) &= 0.\end{aligned}\tag{43}$$

Diante do exposto, pode-se definir como $x_0(t) = [p_0(t), v_0, a_0]^T \in \mathbb{R}^2$ o vetor de estado líder. Dadas as Equações 42 e 43, o problema de manter uma política de espaçamento interveicular desejada e uma velocidade comum do pelotão de veículos pode ser reescrito como um problema de consenso de terceira ordem. O objetivo do controle do pelotão é manter a mesma velocidade do líder e manter um espaço desejado entre veículos:

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow +\infty} |v_i - v_0| &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow +\infty} |p_i - p_{i-1} - d_{ii-1}| &= 0,\end{aligned}\tag{44}$$

onde d_{ii-1} representa a distância desejada entre o veículo i e o veículo $i-1$. A distância desejada d_{ii-1} pode ser expressa ao utilizar o tempo de *headway* h_{ii-1} e a distância de paragem dp_{ii-1} , como exposto na Equação 41.

A síntese do controlador local para o nó i só pode usar as informações dos nós no conjunto $\mathcal{I}_i = \mathcal{C}_i \cup \mathcal{P}_i$. Diante do exposto, para definir a lei de controle, pode-se definir que a comunicação é ideal, desta forma, tem-se o seguinte controle local para

o veículo i :

$$u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}} [k_p(p_i - p_j - d_{i,j}) + k_v(v_i - v_j) + k_a(a_i - a_j)], \quad (45)$$

na qual k_p , k_v e k_a são coeficientes de rigidez e amortecimento a serem oportunamente ajustados para regular o comportamento entre os veículos vizinhos. Por fim, pode-se representar a forma compacta da Equação 45, por:

$$u_i = -k^\top \sum_{j \in \mathcal{I}} (x_i - x_j), \quad i = 1, \dots, n, \quad (46)$$

onde $k = [k_p, k_v, k_a]^\top$ é um vetor contendo os ganhos do controlador, $x_i(t) = [p_i, v_i, a_i]^\top$ é o vetor dos estados de cada veículo e $u_i(t)$ a lei de controle.

4.3.4 Dinâmica do Pelotão

Para analisar a dinâmica de formação do pelotão é definido um vetor de estados composto pelos erros dos estados dos veículos em relação ao líder:

$$\bar{x}_i(t) = \begin{bmatrix} \bar{p}_i(t) \\ \bar{v}_i(t) \\ \bar{a}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_i(t) - p_i^*(t) \\ v_i(t) - v_0(t) \\ a_i(t) - a_0(t) \end{bmatrix}, \quad (47)$$

onde $p_i^*(t) = p_0(t) - d_{0i} = p_0(t) - h_{0i}v_0 - dp_{0i}$, que é a posição desejada do veículo i . Diante disso, a lei de controle de cada veículo pode ser definida como:

$$u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}_i} [k_p(p_i(t) - p_i^*(t) - p_j(t) - p_j^*(t)) + k_v(v_i(t) - v_0(t) - v_j(t) - v_0(t)) + k_a(a_i(t) - a_0(t) - a_j(t) - a_0(t))]. \quad (48)$$

Ao utilizar o vetor de estados composto pelos erros dos estados dos veículos em relação ao líder (Equação 47), tem-se:

$$u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}_i} [k_p(\bar{p}_i(t) - \bar{p}_j(t)) + k_v(\bar{v}_i(t) - \bar{v}_j(t)) + k_a(\bar{a}_i(t) - \bar{a}_j(t))], \quad (49)$$

que também pode ser expressa da seguinte maneira:

$$u_i = -k^\top \sum_{j=1}^n [a_{ij}(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + \wp_i(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_0(t))]. \quad (50)$$

Desta forma, a dinâmica de erro em malha-fechada do i -ésimo veículo é expressa por $\dot{\bar{x}}_i(t) = A\bar{x}_i(t) + Bu_i(t)$. Ao substituir $u_i(t)$ na dinâmica de erro em malha-fechada, pela Equação 50, tem-se:

$$\dot{\bar{x}}_i(t) = A\bar{x}_i(t) + Bk^\top \sum_{j=1}^n [a_{ij}(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + \wp_i(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_0(t))]. \quad (51)$$

Assim, ao usar a metodologia apresentada no início da Seção 4.3, a dinâmica do erro de espaçamento em malha-fechada de todo o pelotão é representada por:

$$\dot{\bar{X}}(t) = [I_N \otimes A - (\mathcal{L} + \mathcal{P}) \otimes Bk^\top] \bar{X}(t), \quad (52)$$

onde \otimes é o produto de Kronecker, I_N é a matriz identidade de dimensão $N \times N$ (quantidade de veículos seguidores) e $\bar{X}(t) = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n]^\top$.

4.3.4.1 Dinâmica Sob Atraso na Comunicação

Na seção anterior foi apresentada a lei de controle sem influência do atraso no tempo. Já nesta seção são realizadas análises matemáticas para avaliar a influência do atraso de comunicação na dinâmica do pelotão. Portanto, é apresentado o modelo matemático para a dinâmica do erro na formação de um pelotão sujeito a atraso na comunicação.

Ao analisar a lei de controle representada pela Equação 45, nota-se que o veículo i necessita dos valores em tempo real da posição, velocidade e aceleração dos veículos adjacentes que se comunicam com i . Entretanto, no caso da existência de atraso de comunicação entre os veículos, a lei de controle (Equação 45), passa a ser representada pela Equação 53:

$$u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}} [k_p(p_i(t) - p_j(t - \tau_{ij}) - d_{ij}) + k_v(v_i(t) - v_j(t - \tau_{ij})) + k_a(a_i(t) - a_j(t - \tau_{ij}))], \quad (53)$$

onde τ representa o atraso variável na comunicação, que afeta o i -ésimo veículo quando a informação é transmitida de seu vizinho j e do líder do pelotão, respectivamente.

O atraso de tempo $\tau_{ij}(t)$ pode ser considerado entre um valor máximo e mínimo, por exemplo $0 \leq \tau_{ij}(t) \leq \tau_{max}$ ($\tau_{ij}(t)$ é uma função contínua por partes). Pode-se observar, que algumas das informações transmitidas, como o estado do veículo anterior, podem estar disponíveis a partir de medições realizadas por sensores a bordo, a entrega dessas informações não será afetada por atrasos sensíveis e, portanto, pode-se considerar $\tau_{ij}(t) = 0$. Além disso, embora o atraso $\tau_{ij}(t)$ seja desconhecido, pode ser detectado e avaliado de forma local em todos os veículos do pelotão, já que os nós

recebem *beacons* que não apenas contêm as informações de posição e velocidade absoluta para o i -ésimo veículo, mas também o *timestamp* relativo \bar{t} , que representa o instante de tempo em que a informação é medida. A sincronização do relógio é garantida em todo o pelotão via GPS.

Ao considerar a lei de controle sujeita a atraso na comunicação que é representada pela Equação 53 e adicionando-se o seguinte termo nulo:

$$0 = - \sum_{j \in \mathcal{I}} [k_p(p_j(t) - p_j(t)) + k_v(v_j(t) - v_j(t) + k_a(a_j(t) - a_j(t))), \quad (54)$$

o consenso pode ser alcançado usando uma estratégia distribuída apropriada que leva explicitamente em conta a troca de informações através da camada de comunicação como:

$$\begin{aligned} u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}} [k_p(p_i(t) - p_j(t) - d_{i,j}) + k_v(v_i(t) - v_j(t)) + \\ k_a(a_i(t) - a_j(t)) + \\ k_p(p_j(t) - p_j(t - \tau)) + k_v(v_j(t) - v_j(t - \tau)) + \\ k_a(a_j(t) - a_j(t - \tau))], \end{aligned} \quad (55)$$

ao considerar que $d_{ij} = p_i^*(t) - p_j^*(t)$ e que os termos, relativos ao líder, $k_v(v_0(t) - v_0(t))$ e $k_a(a_0(t) - a_0(t))$ são nulos, conclui-se a Equação 56:

$$\begin{aligned} u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}} [k_p(p_i(t) - p_j(t) - p_i^*(t) - p_j^*(t)) + \\ k_v(v_i(t) - v_j(t) + v_0(t) - v_0(t)) + \\ k_a(a_i(t) - a_j(t) + a_0(t) - a_0(t)) + \\ k_p(p_j(t) - p_j(t - \tau)) + k_v(v_j(t) - v_j(t - \tau)) + \\ k_a(a_j(t) - a_j(t - \tau))]. \end{aligned} \quad (56)$$

Ao considerar o vetor de estados composto pelos erros dos estados dos veículos (Equação 47), pode-se representar a Equação 56 da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}} [k_p(\bar{p}_i(t) - \bar{p}_j(t)) + k_v(\bar{v}_i(t) - \bar{v}_j(t)) + k_a(\bar{a}_i(t) - \bar{a}_j(t)) + \\ k_p(p_j(t) - p_j(t - \tau)) + k_v(v_j(t) - v_j(t - \tau)) + \\ k_a(a_j(t) - a_j(t - \tau))]. \end{aligned} \quad (57)$$

Após a definição da Equação 57, ao considerar o vetor de erro dos estados e as definições apresentadas na Seção 4.3 para a matriz de adjacência e de pivotamento,

a lei de controle pode ser representada da seguinte forma:

$$u_i = -k^\top \sum_{j=1}^n [a_{ij}(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + \wp_i(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_0(t)) + a_{ij}(x_j(t) - x_j(t - \tau)) + \wp_i(x_i(t) - x_i(t - \tau))]. \quad (58)$$

Como visto na Seção 4.3.4, a dinâmica de erro em malha-fechada do i -ésimo veículo é definida por $\dot{\tilde{x}}_i(t) = A\tilde{x}_i(t) + Bu_i(t)$. Ao substituir a lei de controle expressa pela Equação 58, na equação da dinâmica de erro, tem-se:

$$\dot{\tilde{x}}_i = A\tilde{x}_i - Bk^\top \sum_{j=1}^n [a_{ij}(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + \wp_i(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_0(t)) + a_{ij}(x_j(t) - x_j(t - \tau)) + \wp_i(x_i(t) - x_i(t - \tau))], \quad (59)$$

que também pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_i = A\tilde{x}_i - Bk^\top \sum_{j=1}^n [a_{ij}(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + \wp_i(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_0(t))] + \\ - Bk^\top \sum_{j=1}^n [a_{ij}(x_j(t) - x_j(t - \tau)) + \wp_i(x_i(t) - x_i(t - \tau))]. \end{aligned} \quad (60)$$

Por fim, a dinâmica do erro sob atraso em malha-fechada, de acordo com os apontamentos feitos na Seção 4.3, pode ser expressa pela Equação 61:

$$\dot{\tilde{X}}(t) = [I_N \otimes A - (\mathcal{L} + \mathcal{P}) \otimes Bk^\top] \tilde{X}(t) - [(\mathcal{A} + \mathcal{P}) \otimes Bk^\top] \int_{-\tau}^0 \dot{\tilde{X}}(t+s) ds. \quad (61)$$

4.3.5 Escalonamento de Ganhos

Em determinadas situações variáveis mensuráveis podem se correlacionar com as mudanças na dinâmica do processo. As variáveis em questão podem ser utilizadas para realizar variações nos parâmetros do controlador (ASTROM; WITTENMARK, 1994). Desta forma, o escalonamento de ganhos pode ser considerado como um mapeamento dos parâmetros do processo para os parâmetros do controlador. O escalonamento de ganhos consiste em utilizar uma lógica adequada para encontrar o ponto de operação e atualizar os parâmetros do controlador de acordo com uma tabela previamente calculada (ASTROM; WITTENMARK, 1994).

A principal vantagem do escalonamento de ganhos é a rapidez com que os parâmetros do controlador podem ser alterados, de acordo com o monitoramento do

ponto de operação, que é função das entradas, saídas e outras medidas auxiliares. Entretanto, mudanças rápidas e frequentes nos ganhos do controlador podem causar instabilidade no sistema (LEITH; LEITHEAD, 2000).

Para tentar obter uma sintonia de controlador que apresente o desempenho desejado no cenário de referência, recorreu-se à sintonia por tentativas e erros. Esse tipo de sintonia requer grande conhecimento das funções de cada ação do controlador e pode se tornar difícil de obter, pois há várias combinações possíveis para k_p , k_v e k_a . Ao utilizar esse método encontrou-se uma configuração que atendeu os requisitos desejados nessa região. A proposta para a definição dos ganhos do controlador leva em consideração o atraso na comunicação τ que é calculado localmente pelos veículos, por meio das informações trocadas entre os nós do pelotão. Os ganhos foram definidos de acordo com os intervalos de atrasos possíveis no cenário ($0 \mu s$ à $10 \mu s$). Os valores para k_p , k_v e k_a foram definidos de acordo com:

$$k_p = \begin{cases} 0.9, & \text{se } 0 \mu s \leq \tau \leq 2 \mu s \\ 1, & \text{se } \tau > 2 \mu s \end{cases},$$

$$k_v = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \mu s \leq \tau \leq 2 \mu s \\ 0.7, & \text{se } \tau > 2 \mu s \end{cases} \quad (62)$$

$$k_a = \begin{cases} 1, & \text{se } \tau \geq 0 \mu s. \end{cases}$$

De posse dos resultados obtidos por meio de simulações, cada sintonia de controlador foi definida e notou-se que o desempenho do sistema era mais sensível à variação do ganho k_v , a medida que o atraso varia. Também fica clara a necessidade de sintonia dos ganhos do controlador a partir de atrasos maiores que o atraso máximo definido para o padrão IEEE 802.11p.

Posteriormente, as sintonias encontradas para cada faixa de operação foram testadas e refinadas pelo método de tentativas e erros. Assim, observou-se que o ganho k_v deve ser menor a medida que a referência do atraso aumenta e os ganhos k_p e k_a não mudam significativamente. Diante desses resultados foi desenvolvido um sistema de ajuste automático de ganhos, desta forma os ganhos do controlador são ajustados de acordo com o atraso τ . Com essa implementação, obteve-se uma estratégia de controle mais rápida para limites de atrasos altos e que permanece com desempenho satisfatório em limites de atrasos baixos, resultando num desempenho melhor do que quando o controlador faz uso de ganhos fixos por toda a simulação.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização das redes veiculares inclui aplicações para prover segurança aos condutores dos veículos. Estas aplicações visam minimizar acidentes e melhorar as condições do tráfego fornecendo informações úteis por meio de mensagens de dados, como por exemplo, problemas na pista, dados de nós vizinhos, avisos de colisão, ponto de congestionamento, entre outros.

No entanto, é necessário prover confiabilidade na entrega destas mensagens de dados, principalmente em aplicações críticas, como a coordenação de pelotões veiculares. A abordagem proposta foi desenvolvida com o objetivo de aumentar esta confiabilidade na comunicação para auxiliar o CACC projetado que leva em consideração aspectos voltados a comunicação. A abordagem consiste de um co-projeto composto por um protocolo de comunicação confiável e um controle cooperativo de pelotões. Por meio deste co-projeto, a abordagem proposta visa manter a formação de pelotões veiculares diante de perturbações aplicadas ao sistema. Além disso, esta abordagem busca minimizar o impacto que mensagens de controle provocam em cenários com alta densidade, por meio de um mecanismo adaptativo. Os ganhos do controlador foram definidos por escalonamento e não devem ser tratados como ótimos, porém buscam prover desempenho satisfatório em cenários específicos. Por fim, a abordagem proposta foca em se adaptar ao cenário e topologias variadas que definem o fluxo de informação.

Neste capítulo a abordagem proposta foi descrita. Todos os mecanismos empregados na proposta também foram apresentados, juntamente com seus algoritmos e equações necessárias para o funcionamento dos mecanismos implementados.

5 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo descrever o projeto de experimentos executado para avaliar a solução proposta e apresentar os resultados das simulações com suas respectivas análises. A confiabilidade da abordagem proposta e seu impacto na rede veicular foram avaliados por meio da taxa do sucesso da entrega dos alertas, número de colisões de pacotes, da mobilidade e densidade dos nós da rede e latência da rede. Os experimentos simulados serviram para avaliar o impacto dos mecanismos para prover confiabilidade à comunicação sobre o desempenho da entrega dos alertas pelas aplicações LDW e EEBL. Também são apresentados e descritos os experimentos voltados a avaliar o desempenho da abordagem proposta frente a atrasos, alto fluxo veicular e distúrbios inseridos no cenário veicular.

Este capítulo, primeiramente, apresenta o ambiente de simulação com uma breve descrição dos simuladores de rede, de tráfego e pelotões veiculares escolhidos para os experimentos. Os parâmetros adotados na solução proposta também são descritos. Em seguida, o projeto de experimentos utilizados para a avaliação com suas métricas é apresentado. Por fim, os resultados obtidos nos experimentos e uma análise destes são descritos.

5.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O funcionamento da abordagem proposta voltada a pelotões veiculares pode ser verificado de diversas formas. Dentre estas se destacam as simulações, que têm como objetivo reproduzir o comportamento do protocolo, aplicação e controle implementados, visto que muitas vezes os custos dos testes em ambientes reais podem ser bastante elevados. Além disso, a utilização de simuladores permite um controle melhor sobre o ambiente, como a repetição dos experimentos considerando diferentes cenários (por exemplo, o fluxo de veículos em uma rodovia).

5.1.1 Simulador de Rede

O OMNeT++ é um simulador de eventos discretos para modelagem de redes de comunicação que baseia-se, fundamentalmente, no conceito de módulos, permitindo a criação de diferente protocolos, modelos ou topologia de redes. Neste simulador, as simulações podem ser executadas via linha de comando ou com interface gráfica interativa, o que facilita a execução de simulações complexas e em grande escala (VARGA, 2013).

No que diz respeito aos protocolos e padrões de comunicação de rede, estes não são implementados pelo OMNeT++, ficando a cargo de módulos adicionais. O INET *framework* é um destes módulos adicionais, possuindo código livre (*open source*),

no qual há vários protocolos e padrões de redes cabeadas e sem fio já implementados, tais como, UDP, TCP, IP, OSPF, 802.11 entre outros.

A escolha pelo simulador OMNeT++/INET foi devido a este simulador com este módulo ter uma interface clara que facilita o desenvolvimento das aplicações, além de uma ampla utilização no meio acadêmico. O INET *framework* possui uma vasta documentação, o que colabora para o desenvolvimento rápido de novos módulos. Outro fator importante para a escolha deste simulador, foi devido a sua capacidade de trabalhar com *frameworks* específicos para redes veiculares, e funcionar bidirecionalmente acoplado com geradores de tráfegos, como por exemplo, a ferramenta SUMO, o que facilita as simulações mais detalhadas sobre os efeitos de determinados parâmetros sobre o tráfego na rede.

5.1.2 Simulador de Tráfego

Com o objetivo de tornar as simulações mais realistas, foi utilizada a ferramenta geradora de cenários de mobilidade SUMO acoplada bidirecionalmente ao OMNeT++. Essa ferramenta possibilita a criação manual de mapas, a importação de mapas, e a criação de várias classes de veículos (ônibus, carros e motos), caracterizadas pelo seu comprimento, valores de aceleração e desaceleração, velocidade máxima e imperfeição do condutor (DRESSLER *et al.*, 2008). O SUMO destaca-se ainda por permitir a realização de ultrapassagens, sempre que a via da esquerda esteja livre, retornando a sua faixa logo após a ultrapassagem.

A facilidade de configuração dos cenários de mobilidade, a facilidade de implementação dos experimentos e a possibilidade, em tempo real, da integração com o simulador de rede OMNeT++, foram os principais fatores que justificaram a sua escolha como a ferramenta de simulação de tráfego.

5.1.3 Implementação e Simulação de Pelotões Veiculares

A ferramenta PLEXE introduz um modelo de pelotão veicular que permite aos veículos a mudança de faixa, por meio de controle de aceleração longitudinal e um controle transversal simplificado. Com este modelo integrado ao SUMO, os controladores longitudinais descritos na Seção 2.4 são acessíveis via TraCI. Em geral, os modelos padrão de veículos do simulador SUMO são projetados para imitar condutores humanos. Pode-se considerar como exemplo o modelo Intelligent Driver Model (IDM) (TREIBER *et al.*, 2000) ou o modelo Krauß (KRAUSS, 1998). Isso é útil para simular cenários próximos da realidade em que os condutores adentram a rodovia por meio de uma rampa de acesso. O condutor então se junta a um pelotão, assim libera a condução do veículo para o sistema de controle até a saída desejada, quando retomaria o controle do veículo e deixaria a rodovia.

O módulo responsável por armazenar as abordagens de controle na ferramenta PLEXE é chamado de CC (do inglês, *Cruise Controllers*). A ferramenta permite que os modelos CC, ACC e CACC sejam implementados em um único arquivo, e que o desenvolvedor possa modificá-lo para implementar novos modelos. O modelo padrão de pelotões da PLEXE inclui CC, ACC e três CACCs diferentes (J. PLOEG *et al.*, 2011; R. RAJAMANI *et al.*, 2000; SANTINI *et al.*, 2015).

Para reproduzir a dinâmica do mecanismo de controle, a ferramenta PLEXE fornece uma classe de mecanismo genérica, que pode ser estendida para implementar vários modelos. A PLEXE vem com uma implementação de um atraso de primeira ordem que é descrito em (Michele SEGATA *et al.*, 2014a). A interface do TraCI permite acessar, modificar o comportamento e recuperar informações do controle e dos modelos do mecanismo de controle.

5.1.4 Parâmetros do Ambiente Computacional

Todas as simulações realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho foram feitas numa máquina com processador Intel Core I5 com dois núcleos, cada qual com frequência de *clock* de 3,2 GHz, 8GB de memória RAM e sistemas operacionais Microsoft Windows 10 e Ubuntu 18.04.2, ambos de 64 bits.

5.1.5 Cenário de Mobilidade

Nesta tese, o modelo de mobilidade utilizado foi o acoplamento bidirecional entre um simulador de rede e um gerador de tráfego. Este modelo permite movimentos realistas, a obtenção de informações sobre o comportamento dos nós e facilita a análise dos resultados. Este modelo de mobilidade também permite a parametrização da rede e das aplicações desenvolvidas. Nas simulações que utilizam esse modelo de mobilidade, dois processos interdependentes são executados simultaneamente, ou seja, o simulador de rede e o simulador de tráfego. Ambos os processos compartilham dados como a posição e a velocidade dos veículos simulados. Informações atualizadas sobre o movimento de veículos simulados são trocadas em intervalos regulares.

A simulação bidirecional acoplada geralmente consiste de duas fases alternadas (DRESSLER *et al.*, 2008). Na primeira fase, a simulação da rede envia as alterações de parâmetros para a simulação do tráfego, alterando o comportamento do condutor ou atributos referentes à estrada e que influenciam as decisões dos veículos. Já na segunda fase, em intervalos regulares, a simulação do tráfego executa cálculos de tráfego com base nesses novos parâmetros e envia atualizações dos movimentos dos veículos para a simulação da rede.

A modelagem em simulações bidirecionalmente acopladas depende da intercomunicação intensa das ferramentas de simulação que usam diferentes interfaces. Já na modelagem de simulações de traços artificiais, o gerador de tráfego cria estes

traços para que posteriormente sejam utilizados na simulação da rede. Em simulações que utilizam movimentos aleatórios, o modelo de mobilidade pode ser implementado no próprio simulador de rede, dispensando ferramentas geradoras de tráfego, como pode-se observar na Figura 16.

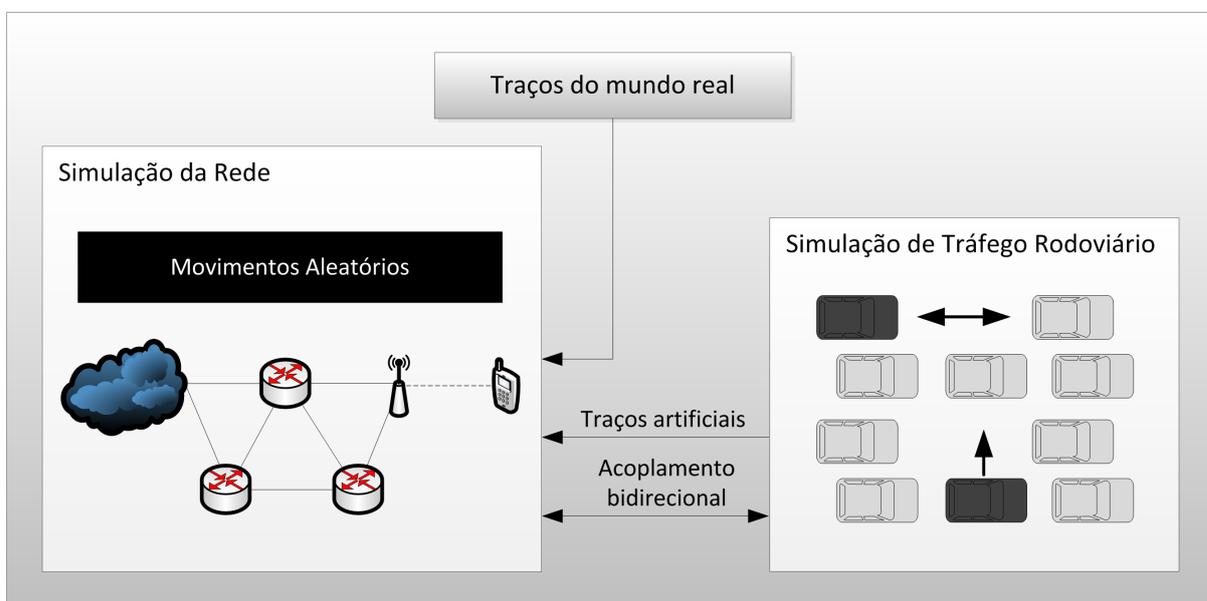


Figura 16 – Técnicas de modelagem de mobilidade para a simulação de protocolos e aplicações para VANETs

5.1.5.1 Cenário de Mobilidade Desenvolvido

O desenvolvimento do cenário de mobilidade utilizado nos experimentos pode ser dividido em três fases: (i) inicialmente, criou-se a via de circulação dos veículos, recorrendo ao gerador de tráfego SUMO; (ii) em seguida, foram criadas e caracterizadas as diferentes classes de veículos utilizadas na simulação; e (iii) finalmente, ao utilizar novamente o gerador de tráfego SUMO, foram gerados os movimentos dos veículos, obtendo-se assim o cenário de mobilidade necessário para as simulações.

Recorrendo ao comando *netconvert* da ferramenta SUMO, foi implementado um trecho real da rodovia BR-101 entre os municípios de Itapema e Porto Belo no estado de Santa Catarina, que se encontra a aproximadamente 50 km de distância de Florianópolis. Este trecho de 5 km pode ser observado na Figura 17, e consiste em uma rodovia de duas vias e duas pistas para cada direção, com quatro faixas no total, com uma velocidade máxima definida em 110 km/h para carros. O tráfego diário normal neste trecho segundo o Posto Policial Rodoviário Federal¹ do município de Itapema é de 60 mil veículos, sendo constituído por veículos de passeio de 2 eixos,

¹ Por meio de contato telefônico com o Posto da Polícia Rodoviária Federal localizado no km 143 da rodovia BR-101, foram obtidos os dados referentes ao fluxo de veículos no trecho.

veículos destinados ao transporte de carga com até 6 eixos, veículos destinados ao transporte de passageiros com até 3 eixos e, por fim, de motocicletas. Em todos os experimentos os dados são coletados somente após 500 segundos, que é assumido como o tempo necessário para que o cenário seja povoado.

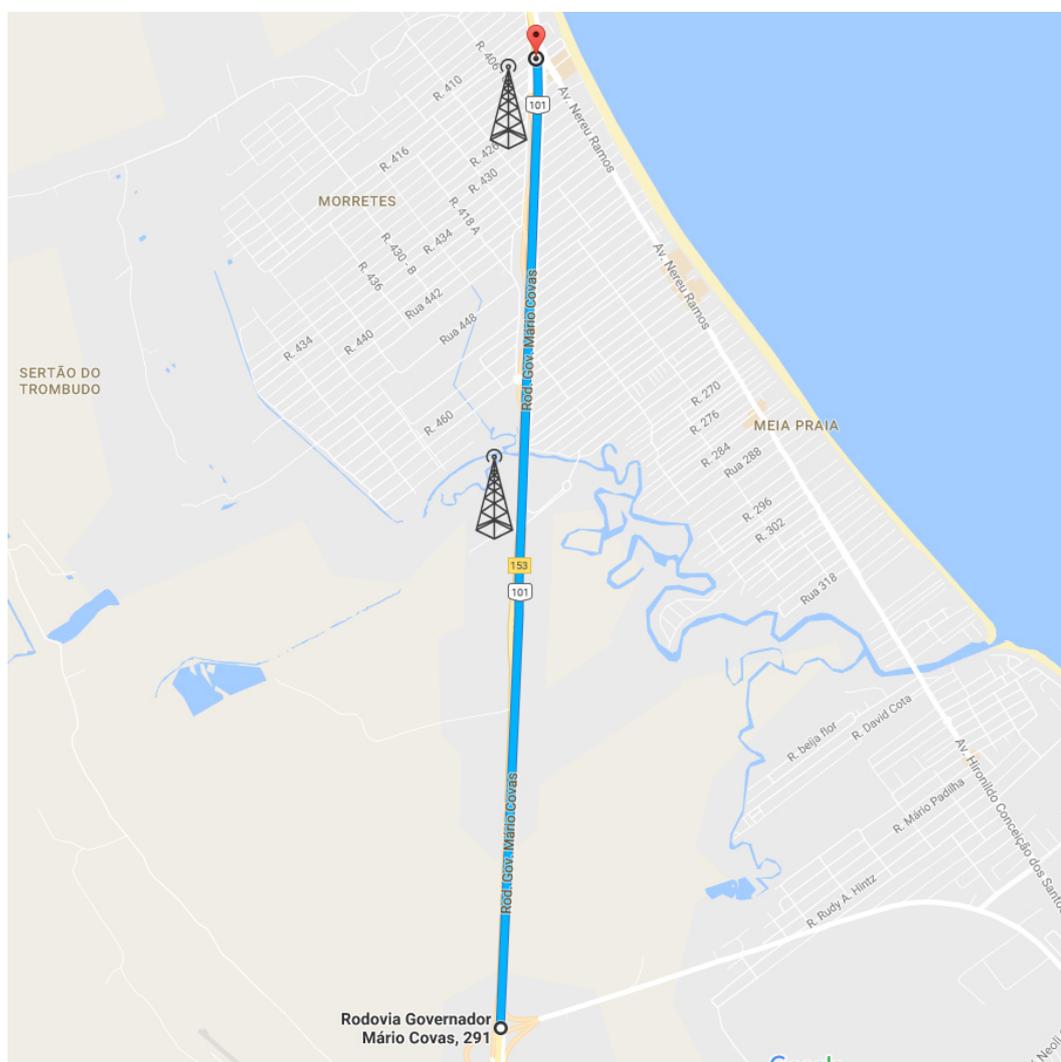


Figura 17 – Rodovia Simulada

No gerador de tráfego SUMO, foram definidos quatro tipos de veículos: carros, caminhões, ônibus e motocicletas. Cada tipo tem características baseadas em cenários reais (tais como, velocidade máxima, comprimento do veículo, aceleração, etc.) (ver Tabela 6). São eles:

- **Classe 1:** os veículos desta classe representam os carros que trafegam na via e são caracterizados por uma velocidade máxima de 30,6 m/s (110 km/h), valores de aceleração e desaceleração são de 3 m/s² e 6 m/s² respectivamente, um comprimento de 5 m. Esta classe representa aproximadamente 65 % dos veículos que compõem o cenário. Seu parâmetro de comportamento do condutor é de 0,5.

- **Classe 2:** os veículos que pertencem a esta classe caracterizam-se por serem mais lentos que os da classe anterior, atingido apenas os 22,3 m/s (80 km/h), sendo parametrizados com valores de aceleração e desaceleração de 1 m/s² e 4 m/s² respectivamente, um comprimento de 15 m e seu parâmetro para o comportamento do condutor está em 0,75. Esta classe corresponde aproximadamente a 26 % dos veículos que circulam na rede e representam caminhões.
- **Classe 3:** os veículos que pertencem a esta classe caracterizam-se por se aproximar das características da classe anterior, atingem um velocidade máxima de 22,3 m/s (80 km/h), sendo parametrizados com valores de aceleração e desaceleração de 1 m/s² e 4 m/s² respectivamente, um comprimento de 15 m e seu parâmetro para o comportamento do condutor está em 0,5. Esta classe corresponde aproximadamente a 8 % dos veículos que circulam na rede e representam ônibus.
- **Classe 4:** os veículos que pertencem a essa classe representam as motocicletas e correspondem a 1 % dos veículos no cenário de mobilidade. Nesta classe, os veículos atingem uma velocidade máxima de 30,6 m/s (110 km/h), parametrizados com aceleração de 3 m/s² e uma taxa de desaceleração de 6 m/s², apresentando 3 m de comprimento e comportamento do condutor em 0,5.

Os estilos de condução foram escolhidos aleatoriamente dentro de limites aceitáveis. O parâmetro de imperfeição do condutor foi definido usando diferentes valores para a velocidade desejada (R. OLIVEIRA *et al.*, 2017). Nos experimentos, optou-se por variar as velocidades máximas dos veículos (50, 70, 90 e 110²). Os parâmetros referentes à mobilidade podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 6 – Características dos veículos

Parâmetros	C1	C2	C3	C4
Tamanho (m)	5	15	15	3
Vel. Máxima (m/s)	30,6	22,3	22,3	30,6
Aceleração (m/s ²)	3	1	1	3
Desaceleração (m/s ²)	6	4	4	6
Probabilidade (%)	65	26	8	1
Imperfeição do Condutor (σ)	0,5	0,75	0,5	0,5

² Velocidade máxima permitida para a Classe 1 no trecho simulado da BR-101.

5.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS

Com o objetivo de avaliar a confiabilidade e o desempenho da abordagem proposta, perante outras abordagens e cenários variados com diferentes condições de tráfego, foram definidos dois projetos de experimentos que são descritos nas Seções 5.2.2 e 5.2.3. Os projetos de experimentos levaram em consideração as métricas de desempenho descritas a seguir.

5.2.1 Métricas de Desempenho

De acordo com Panichpapiboon e Pattara-Atikom (2012), o que a maioria dos pesquisadores está interessada em saber sobre os protocolos de transmissão em redes veiculares são: (i) com que frequência as mensagens são duplicadas; (ii) até que ponto a mensagem pode ser propagada; e (iii) quão rápido a mensagem pode ser disseminada. Além disso, para se ter protocolos confiáveis, é importante saber se as mensagens transmitidas são entregues a todos os nós (NA NAKORN; ROJVIBOON-CHAI, 2010). As seguintes sete métricas foram utilizadas para avaliar a eficácia e a eficiência do protocolo proposto:

- **Taxa de Sucesso ou Taxa de Entrega (TS):** é a porcentagem de veículos que receberam as mensagens enviadas com sucesso ($NumVeRecMsg$) dentro do total de veículos pertencentes a rede ($NumVeRede$), que é a cobertura do protocolo. Protocolos confiáveis de disseminação de dados devem atingir uma taxa de entrega próxima a 100 %. A Taxa de Sucesso é obtida pela Equação 63:

$$TS = \frac{NumVeRecMsg}{NumVeRede}. \quad (63)$$

- **Taxa de Redundância (TR):** é a porcentagem de mensagens duplicadas usadas na disseminação de uma mensagem de original³ ($NumMsgDuplicadas$) de todas as mensagens originais ($NumOrgMsgs$). Um protocolo eficiente deve ser capaz de divulgar informações com a menor quantidade de redundância ou sobrecarga (PANICHPAPIBOON; PATTARA-ATIKOM, 2012). A Taxa de Redundância é obtida pela Equação 64:

$$TR = \frac{NumMsgDuplicadas}{NumOrgMsgs}. \quad (64)$$

- **Quantidade Total de Beacons (TB):** é a quantidade total de *beacons* (mensagens de controle) ($NumBeacons$) por mensagens transmitidas ($NumPacEnv$).

³ Foram consideradas apenas mensagens de dados nesses resultados, excluindo assim as transmissões de *beacons*.

Em um cenário denso, a carga de *beacons* pode reduzir a eficiência do protocolo⁴. A Quantidade Total de Beacons é definida pela Equação 65:

$$TB = \frac{NumBeacons}{NumPacEnv}. \quad (65)$$

- **Taxa de Colisões (TC) ou Taxa de Perda de Pacotes:** é a porcentagem de colisões de pacotes durante a disseminação de dados (*NumPacColis*) pelo número de pacotes transmitidos (*NumPacEnv*). A Taxa de Colisões é definida de acordo com a Equação 66:

$$TC = \frac{NumPacColis}{NumPacEnv}. \quad (66)$$

- **Distância de Propagação (DP):** é a distância média que uma mensagem pode ser propagada (*UltimaPos*) a partir do ponto em que é originada (*InicialPos*) em metros. A Distância de Propagação é obtida por meio da Equação 67:

$$DP = UltimaPos - InicialPos. \quad (67)$$

- **Tempo de Propagação ou Atraso Médio Fim-a-Fim (TP):** é o tempo médio que leva uma mensagem para ser propagada da origem aos outros nós na rede. Esse atraso é medido como o instante de recebimento da mensagem (*TempoRecMsg*) menos o instante inicial (*TempoInicial*). Um baixo atraso é muito importante em aplicações de segurança. O Tempo de Propagação é obtido por meio da Equação 68:

$$TP = TempoRecMsg - TempoInicial. \quad (68)$$

- **Eficiência na Disseminação (ED):** mede o quão longe uma mensagem pode ser propagada através da rede por unidade de tempo e pela quantidade de sobrecarga gerada de acordo com a Equação 69. O valor *ED* aumenta se a mensagem pode ser difundida mais adiante, mais rápido, com uma alta taxa de sucesso e com menor redundância (PANICHPAPIBOON; PATTARA-ATIKOM, 2012). A Eficiência na Disseminação é calculada por meio da Equação 69:

$$ED = \frac{DP \cdot TS}{TP \cdot TR}. \quad (69)$$

Para analisar o desempenho do controlador proposto, tem-se duas métricas importantes que devem ser levadas em consideração. De acordo com (S. ZHU *et al.*,

⁴ Uma alta taxa de redundância e um número elevado de *beacons* pode resultar em um problema de *broadcast storm*

2019), pesquisadores buscam estudar alguns aspectos sobre abordagens de controle em pelotões e estes aspectos são: (i) a estabilidade em cadeia, que é uma propriedade do pelotão e é de extrema importância porque garante que, em condições normais, o sistema não cause colisões de veículos; e (ii) o espaçamento entre veículos que pode ser expressado pelo intervalo de tempo entre a passagem, por uma determinada seção transversal da via, de dois veículos consecutivos. Além disso, para abordagens de controle de pelotões, é importante saber se os veículos seguidores são capazes de rastrear as ações do veículo líder. As seguintes métricas foram utilizadas para avaliar o comportamento da abordagem proposta:

- **Estabilidade em cadeia:** estabilidade em cadeia considera a propagação de perturbação gerada por um veículo para os veículos seguidores. Em um pelotão estável, o distúrbio não deve ser amplificado na direção a montante, isto é, do veículo principal para os seguidores (Rajesh RAJAMANI, 2012). Estabilidade não é apenas uma exigência da abordagem de controle de pelotão, mas também uma métrica para avaliar o desempenho do sistema. Em (NAUS *et al.*, 2010) e (ÖNCÜ *et al.*, 2014), a estabilidade em cadeia é quantificada pela magnitude da função de transferência de estabilidade na cadeia. No entanto, essa abordagem de domínio de frequência mostrou sua capacidade limitada em termos de análise de dados em experimentos reais, na qual várias não-linearidades do mundo real, como atrasos na transmissão e de atuação, são introduzidos. Neste trabalho, a estabilidade do pelotão é avaliada com base nos registros feitos pelos veículos, verificando diretamente a propagação da perturbação. Para avaliar a estabilidade de um pelotão, consideram-se as curvas de velocidade com um período de aceleração e um período de desaceleração. Uma maneira simples de analisar o desempenho é comparar as respostas de cada um dos membros do pelotão. Nesta tese, diante das abordagens para análise de estabilidade em cadeia apresentadas na Seção 2.4.6, a abordagem escolhida foi a orientada ao desempenho, a qual consiste no método predominante para a análise da estabilidade da cadeia do fluxo do tráfego rodoviário.
- **Espaçamento entre veículos:** o espaçamento entre os veículos é definido pelo tempo de *headway*, e a obtenção de tempos semelhantes entre os veículos é um assunto muito discutido na literatura (SANTHANAKRISHNAN; R. RAJAMANI, 2003). O tempo de *headway* indica a distância entre veículos desejada, com as informações compartilhadas entre os veículos. O CACC permite que os veículos em um pelotão mantenham um *headway* menor em comparação ao ACC (XU; SENGUPTA, 2003). Nesta tese, a política de espaçamento leva em consideração o tempo de *headway*, e a distância desejada é definida pela Equação 41. Uma menor distância entre veículos é desejada devido ao menor arrasto aerodinâmico

e maior utilização da rodoviário que é definida pela Equação 1. No entanto, é difícil para o controlador do pelotão manter com segurança uma distância curta entre veículos, uma vez que isso impõe requisitos mais rigorosos no projeto de comunicação e controle. A distância mínima possível entre veículos pode ser modelada pelo tempo de *headway*. Assim, neste estudo, considera-se o espaçamento entre veículos uma métrica de desempenho do pelotão.

5.2.2 Experimentos para Avaliar a Comunicação

Para avaliar a confiabilidade na comunicação provida pela abordagem proposta, deve-se levar em consideração as métricas descritas na Seção 5.2.1. O objetivo dos experimentos foi comparar a abordagem proposta (AddP-CACC) com as abordagens selecionadas no Capítulo 3, assumindo um ambiente de simulação realista no que diz respeito a aplicações de segurança. A aplicação LDW utilizada nesta fase de experimentos foi a RAMS (Road Alert Message Service), desenvolvida em (R. R. OLIVEIRA; WANGHAM, 2011). Além disso, um módulo EEBL foi implementado e integrado à aplicação RAMS. O objetivo destes experimentos foi verificar se a abordagem proposta provê confiabilidade à comunicação de dados em um ambiente veicular.

Em um primeiro momento, buscou-se testar a abordagem sem a necessidade do CACC proposto e a comparação foi feita apenas com protocolos de comunicação voltados à disseminação de mensagens. Os resultados e análises são apresentados no Apêndice A. Nos experimentos realizados em (R. OLIVEIRA *et al.*, 2017), foram considerados dois cenários com traços reais, com condições de tráfego esparsa, normal e densa: (i) Rodovia BR-101 em Santa Catarina, Brasil (Seção 5.1.5.1); e (ii) Centro de Ottawa, Ontário, Canadá. O segundo cenário é apresentado juntamente com os resultados e análises no Apêndice A.

Nas experiências, foi utilizado o SUMO acoplado bidirecionalmente com OM-NeT++. Nesta configuração, considerou-se o modelo de propagação Two-Ray Interference que captura tanto a atenuação do sinal, quanto os efeitos de reflexão do solo (ECKHOFF *et al.*, 2012). Além disso, estipulou-se o Atraso Máximo (τ_{max}) acima do limite típico do padrão IEEE 802.11p que é definido como $\tau = 2 \mu s$ (Y. WANG *et al.*, 2013). Também foi levado em consideração o desvanecimento distribuído Nakagami- m . Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros de simulação usados para definir os módulos do *framework* Veins nos experimentos.

O modelo de rede veicular considerado é composto por veículos equipados com unidades de bordo (do inglês, *On Board Unit* (OBU)) e estações base fixas (RSU) em uma arquitetura híbrida (V2V e V2I). Consideram-se ainda nesta fase as seguintes premissas:

1. A identidade de cada veículo é única na rede (com base no endereço MAC);

Tabela 7 – Parâmetros de Simulação da Rede

Parâmetros	Valores
MAC Layer	IEEE 802.11p/1609.4
Frequência	5.89 GHz
Raio de transmissão	256 metros
Força do sinal	2 mW
<i>Bit rate</i>	18 Mbps
Tamanho do <i>Beacon</i>	32 bytes
Atraso Máximo τ_{max}	10 μ s
Modelo de propagação	Two-ray interference
Modelo de desvanecimento	Nakagami- m
Tempo de simulação	15 min
Quantidade de repetições	33

2. Os veículos são equipados com componentes que permitem a comunicação e a execução de aplicações, tais como sensores, unidades de armazenamento, sistema de comunicação sem fio, GPS e uma interface de usuário para mostrar tanto as mensagens de aviso como a localização dos eventos reportados;
3. Os eventos (exemplo: frenagem) sempre podem ser detectados pelos sensores dos veículos; e
4. O GPS tem precisão suficiente para detectar a localização do veículo na estrada e para sincronizar o seu relógio.

Na Tabela 8 são apresentados os parâmetros do protocolo de comunicação AddP usados nas experiências. Esses parâmetros foram utilizados para calcular o tempo entre retransmissões de *beacons* (Equação 15), *timeout* adaptativo (Equação 16), o ganho para qualificar os nós vizinhos (Equação 22), e o tempo de espera para retransmissão do nó selecionado (Equação 24). Estes parâmetros foram selecionados experimentalmente após realizar simulações iniciais. A seleção foi feita com um procedimento sistemático bem definido. Os valores dos parâmetros foram obtidos de vários experimentos que consideraram diferentes fluxos na rodovia.

Nos experimentos, considerou-se o cenário de mobilidade base descrito na Seção 5.1.5.1. Foram definidos oito cenários com diferentes fluxos de veículos (500, 600, 800, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 veículos/hora)⁵. Esses valores simulam fluxos de tráfego muito esparsos (500, 600, 800), esparsos (1000, 2000), normal (3000, 4000) e tráfego denso (5000).

⁵ Estes fluxos de tráfego foram obtidos por meio de contato com a Polícia Rodoviária Federal.

Tabela 8 – Parâmetros do Protocolo de Comunicação AddP

Parâmetros	Valores
P_f	1 segundo
T_{pV}	20 milissegundos
Th_B	300 metros
Th_D	50 veículos
w	0.5
T_i	150 milissegundos
C	1
T_{oM}	1

Em todos os cenários simulados, haviam dois nós fixos (RSU) responsáveis pela propagação de alertas para veículos que não receberam sinalizações da maneira convencional. Um dos RSUs foi posicionado no início do primeiro quilômetro e o outro no início do terceiro quilômetro (Figura 17). O evento sinalizado foi localizado dentro da metade da rodovia.

5.2.3 Experimentos para Avaliar o Desempenho do Controlador

Para verificar o desempenho da abordagem proposta, o AddP-CACC foi implementado em diferentes cenários de simulação. Inicialmente o controlador foi testado em condições ideais, sem perdas de pacotes. Em seguida, foi considerada uma configuração de rede com traços realistas em um cenário de rodovia em que veículos conduzidos por humanos geram interferência, transmitindo mensagens periódicas de controle (*beacons*). Nos experimentos foram utilizados o simulador OMNeT++ e o simulador de tráfego SUMO acoplados bidirecionalmente. Para a implementação dos pelotões, foi utilizada a extensão do *framework* Veins, PLEXE.

O cenário base selecionado para os experimentos é mostrado na Seção 5.1.5.1. Os parâmetros de simulação usados para definir os módulos do *framework* Veins nos experimentos são apresentados na Tabela 7. No SUMO, foram definidos apenas três tipos de veículos: carros, caminhões e ônibus. Cada tipo tem suas características mostradas na Tabela 6. Os estilos de condução foram escolhidos aleatoriamente dentro de limites aceitáveis. O parâmetro de imperfeição do condutor foi definido usando diferentes valores para a velocidade desejada.

Os parâmetros voltados ao protocolo de comunicação proposto usados nos experimentos são apresentados na Tabela 8. Estes parâmetros foram utilizados para calcular o tempo entre as retransmissões de *beacons*, tempo de espera adaptativo, o ganho para qualificar os nós vizinhos e o tempo de espera para a retransmissão do nó selecionado. Estes parâmetros foram selecionados experimentalmente após a realização de simulações iniciais por meio de um procedimento sistemático bem

definido. Na Tabela 9 são apresentados os parâmetros relacionados ao CACC proposto. Os ganhos usados pelo controlador foram apresentados na Seção 4.3.5. Em todos os experimentos, os dados foram coletados após 500 segundos, tempo necessário para que o cenário seja povoado. Além disso, somente após o cenário ser povoado, o pelotão era inserido na rodovia.

Tabela 9 – Parâmetros do Pelotão

Parâmetros	Valores
Tamanho do Pelotão	10 veículos
Classe utilizada	C1
Tempo de <i>headway</i>	1 s
Distância de paragem	10 m
Constante Inercial ς	0,5

5.3 RESULTADOS E ANÁLISES DOS EXPERIMENTOS

Para obtenção destes resultados, foram realizadas 33 simulações para cada cenário e uma média aritmética simples dos resultados de cada cenário foi calculada. Todos os resultados apresentados dos experimentos possuem 95 % de intervalo de confiança. Conforme já descrito anteriormente, foi considerado um tempo de simulação de 15 minutos (900 segundos). Também nesta seção são avaliados e discutidos os resultados obtidos através dos experimentos das simulações.

5.3.1 Confiabilidade na Comunicação

Na Figura 18 é apresentada a confiabilidade para todas as abordagens sob diferentes fluxos de tráfego. Como pode ser observado, o AddP-CACC é a abordagem com melhor desempenho mesmo em cenários esparsos quando comparado com as abordagens DOT-PATH, TESTCC, Connect & Drive e PATH. Tais resultados podem ser explicados pelo fato de que o protocolo de comunicação do AddP-CACC usa o Mecanismo *Disseminated Messages Monitoring* para transmitir as mensagens de aviso não entregues no caso de uma partição de rede ou um problema de nó oculto. Em cenários densos, o comportamento de AddP-CACC, DOT-PATH, Connect & Drive e TESTCC são semelhantes (cobertura de 100 %). Com base nesse resultado, pode-se concluir que o AddP-CACC é uma solução adequada para aplicações que exigem entrega confiável de dados em cenários de densidade de rede esparsos e densos. Vale ressaltar que a abordagem PATH (R. RAJAMANI *et al.*, 2000), no que diz respeito a disseminação de mensagens, tem funcionamento semelhante à inundação simples.

As abordagens estudadas são baseadas em *beacons*, porém apenas as abordagens AddP-CACC, TESTCC, Connect & Drive e DOT-PATH possuem mecanismos

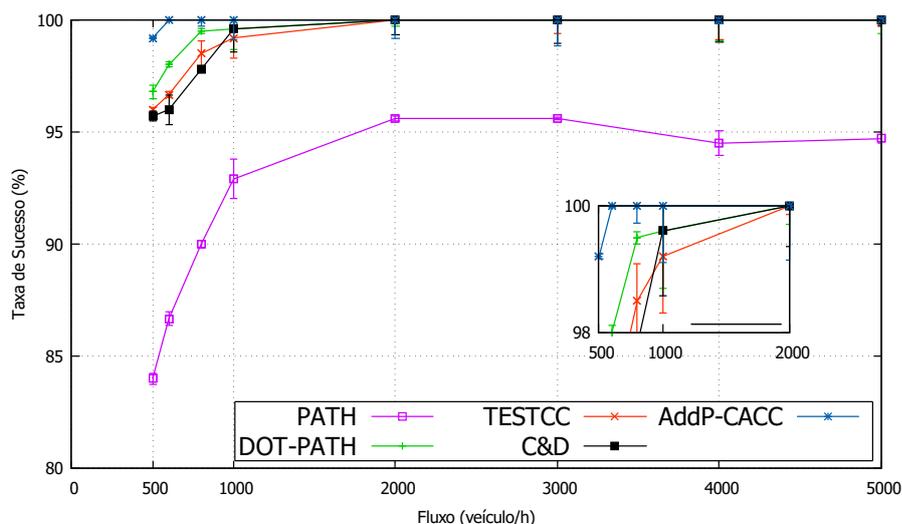


Figura 18 – Taxa de Sucesso

para reduzir a carga de mensagens de controle na rede. Na Figura 19 pode-se observar os resultados da quantidade total de *beacons* transmitidos por todos os veículos durante o processo de disseminação para diferentes fluxos de tráfego. Por não utilizar nenhum tipo de controle de carga, a abordagem PATH, atingiu valores superiores a 2000 *beacons* por mensagem disseminada, desta forma, são apresentados apenas os resultados das abordagens AddP-CACC, TESTCC, Connect & Drive e DOT-PATH. À medida que o fluxo de veículos aumenta, o AddP-CACC obtém a menor quantidade de mensagens de controle transmitidas. Isso vem do fato de que o AddP-CACC ajusta o tempo entre as retransmissões de *beacons* com base na densidade do nó para evitar o problema de *broadcast storm*.

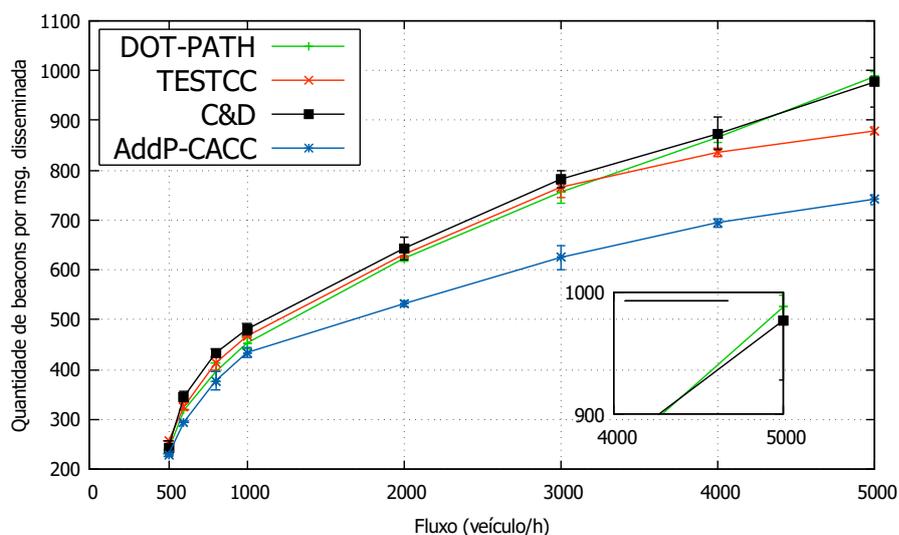


Figura 19 – Quantidade de *Beacons*

Na Figura 20 é apresentada a quantidade de mensagens duplicadas (Taxa de

Redundância) em todas as abordagens sob diferentes fluxos de tráfego. Como esperado, a abordagem PATH, gera maior redundância, uma vez que não emprega nenhum tipo de mecanismo de supressão de retransmissão. A abordagem AddP-CACC apresenta uma sobrecarga mais baixa na rede, especialmente em cenários densos, quando comparado a outras abordagens. A razão está na capacidade do AddP-CACC de selecionar corretamente apenas um veículo para divulgar a mensagem em consideração de duas métricas (densidade local e distância do nó).

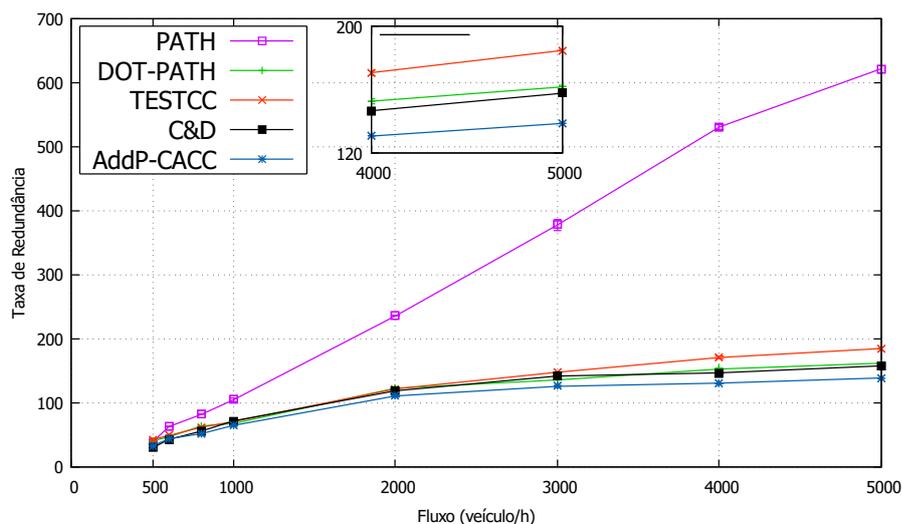


Figura 20 – Taxa de Redundância

Em um resultado semelhante, na Figura 21 observa-se a quantidade de colisões para todas as abordagens. O comportamento, é quase o mesmo que nas Figuras 19 e 20. Pode se observar claramente que o PATH, por não ter nenhum mecanismo de controle de carga, tem o maior número de colisões. Os resultados da abordagem PATH mostram que uma abordagem que trata apenas do CACC não é suficiente, principalmente em cenários de alta densidade veicular. Isto fica mais claro ao analisar os resultados do DOT-PATH, uma abordagem que usa o CACC (PATH) em conjunto com uma abordagem de comunicação confiável (DOT). A abordagem proposta AddP-CACC funciona melhor do que as outras abordagens simuladas em cenários densos e esparsos.

Na Figura 22, pode-se observar o desempenho em relação ao atraso fim-a-fim. Como esperado, nas abordagens (AddP-CACC, DOT-PATH, Connect & Drive e TESTCC) voltadas à comunicação confiável, o atraso para essas abordagens é maior do que em inundações devido ao *store-carry-forward* executado por esses protocolos, ou seja, os veículos precisam armazenar as mensagens para posteriormente retransmiti-las, caso necessário. À medida que o fluxo de veículos aumenta, o atraso para todas as abordagens diminui. Em particular, o AddP-CACC tem o menor atraso em comparação com Connect & Drive, DOT-PATH e TESTCC. Este resultado mostra

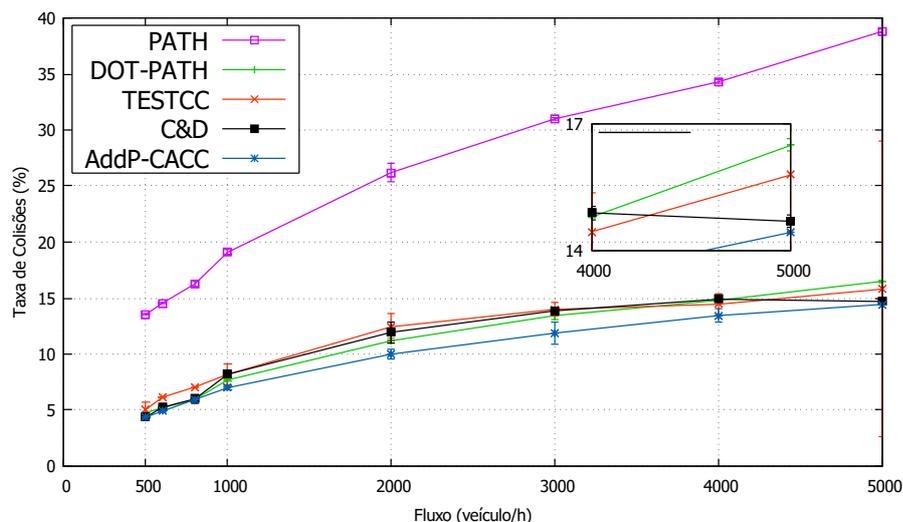


Figura 21 – Taxa de Colisões

que, apesar de um atraso ligeiramente maior quando comparado ao PATH, que utiliza uma abordagem de inundação, o AddP-CACC é uma boa solução para aplicações que exigem entrega confiável de mensagens e carregam informações críticas.

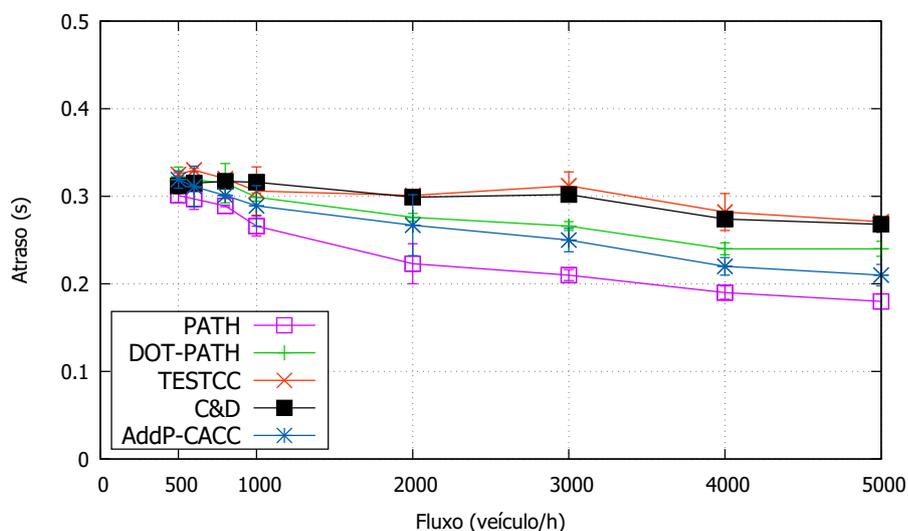


Figura 22 – Atraso

Na Figura 23 pode ser observada a distância média máxima que a mensagem do veículo de origem foi propagada. No gráfico também é possível analisar que o AddP-CACC tem o melhor desempenho quando comparado com as outras abordagens. Em um cenário esparsos, o AddP-CACC funciona melhor do que as outras abordagens devido ao Mecanismo *Disseminated Messages Monitoring*. Como esperado, quando o fluxo de veículos aumenta, a distância é maior para todas as abordagens. Com base nesse resultado, pode-se concluir que o AddP-CACC oferece uma melhor propagação da mensagem na rede.

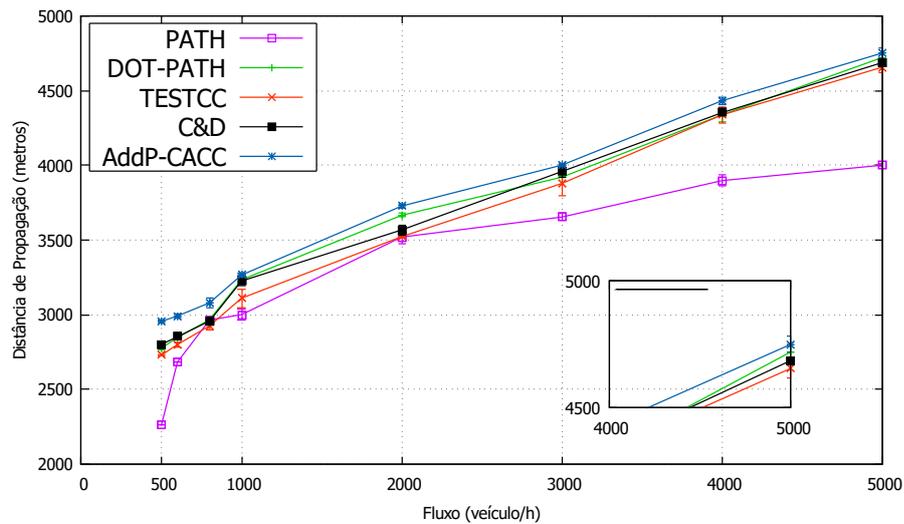


Figura 23 – Distância de Propagação

Finalmente, para avaliar a eficiência de todas as abordagens sob diferentes fluxos de veículos, calculou-se a eficiência de disseminação (ver Equação 69) que considera a sobrecarga do protocolo de comunicação (taxa de redundância, atraso) e a confiabilidade e distância de propagação. Esta métrica consolida os resultados da métrica anterior, e nela, o AddP-CACC obtém resultado superior às abordagens testadas. Quando o fluxo de tráfego aumenta, os valores de ED diminuem, no entanto, estabilizam em cenários densos. Isso ocorre porque, quando a rede se torna mais densa, o número de veículos que selecionarão o mesmo intervalo de tempo para transmissão aumentará. Os resultados da métrica ED mostram que o conjunto de mecanismos propostos no AddP-CACC contribui para a eficiência do protocolo de comunicação e tem um resultado melhor do que os outros protocolos testados.

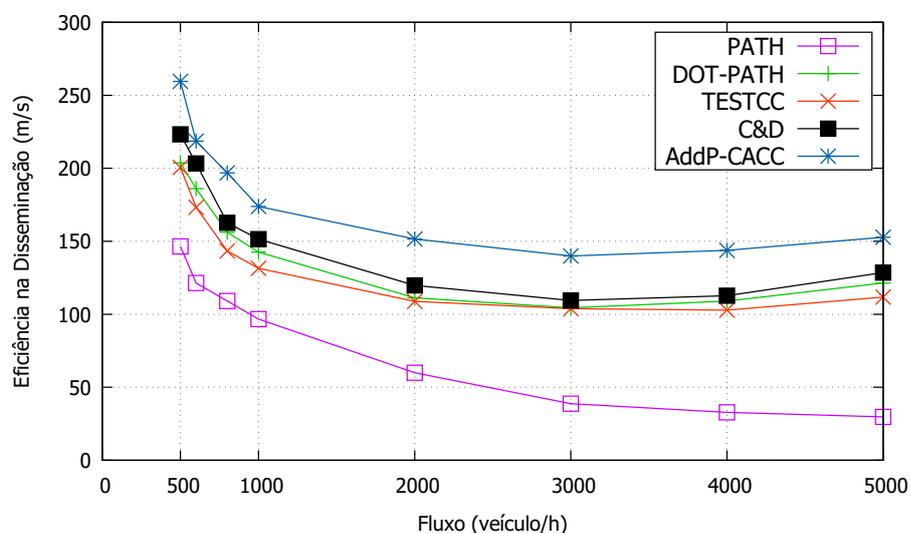


Figura 24 – Eficiência na Disseminação

Com base nestes resultados, pode se concluir que o AddP-CACC é mais eficiente e mais eficaz do que os protocolos de comunicação testados, quando considerados cenários rodoviários, e é uma solução adequada para a aplicações de segurança que requerem entrega confiável de dados e que são sensíveis ao atraso.

5.3.2 Mecanismo de Codificação de Rede

Para verificar o funcionamento do AddP utilizando o mecanismo de codificação de rede, a operação lógica XOR, foi definido um novo cenário, no qual foi utilizada a densidade de 3000 veículos/hora, mas foram mantidas as estruturas das vias e parâmetros de simulação. A principal função deste mecanismo é diminuir a Taxa de Redundância (TR) que é definida pela Equação 64. O mecanismo busca reduzir a quantidade de retransmissões das mensagens de dados existentes na rede veicular, porém sem degradar a confiabilidade da abordagem proposta. Na Tabela 10 são apresentados os cenários simulados. As simulações são iniciadas com um povoamento específico das listas de mensagens dos nós. Por exemplo, no Cenário 1 da Tabela 10, 45 % dos nós foram inicializados com mensagem WM1 em suas listas de mensagens, 45 % dos nós foram inicializados com o WM2 em suas listas, e apenas 10 % dos nós foram inicializados com ambas as mensagens em suas listas.

Tabela 10 – Cenários Simulados (Codificação de Rede)

Cenários	WM1	WM2	WM1 e WM2
Cenário 1	45 %	45 %	10 %
Cenário 2	30 %	30 %	30 %
Cenário 3	20 %	20 %	60 %
Cenário 4	5 %	5 %	90 %

Com as simulações buscou-se obter a quantidade de mensagens geradas durante os 900 segundos, tanto na abordagem com o mecanismo de codificação de rede, quanto sem o mecanismo. Neste cenário, não foi definido um incidente gatilho, desta forma as retransmissões tiveram início no momento que os nós começaram a trocar informações por meio de *beacons*. Na Tabela 11 é demonstrada a quantidade total de retransmissões das mensagens que representam os alertas WM1 e WM2 e o impacto que o mecanismo gera em cada um dos cenários.

Na Tabela 11 pode ser observada a comparação entre o AddP sem e com o mecanismo. Também pode-se observar que o mecanismo de codificação de rede provê menor quantidade de retransmissões de mensagens em comparação a abordagem proposta sem o mecanismo: ao gerar o XOR de duas mensagens, o nó não precisou retransmitir os alertas WM1 e WM2 separadamente ao receber solicitações de ambas as mensagens no mesmo período de tempo. No Cenário 4, o mecanismo obteve melhor

Tabela 11 – Quantidade de retransmissões de Mensagens de Dados (WM) (Sem e Com Codificação de Rede)

Cenários Simulados	Sem Codificação de Rede	Com Codificação de Rede	Redução de Mensagens
Cenário 1	2180	1298	40,4 %
Cenário 2	1409	833	40,8 %
Cenário 3	986	545	44,7 %
Cenário 4	268	121	54,8 %

resultado. Isso acontece porque a porcentagem de nós com as duas mensagens em suas listas é de 90 %, desta forma serão realizadas mais operações lógicas XOR neste cenário, assim diminuindo a quantidade de retransmissões. Fica claro que, quanto maior for o número de nós com as duas mensagens em suas listas, menor será a quantidade de retransmissões no cenário.

Portanto, ao analisar a Tabela 11 pode-se verificar que a abordagem sem o mecanismo realiza mais que o dobro (54,8 %) de retransmissões que a abordagem com o mecanismo. Desta forma, o mecanismo atendeu seu objetivo, que é diminuir a quantidade de retransmissões geradas na rede em cenários que possuem mais de um alerta a serem disseminados.

5.3.3 Desempenho do Controlador Proposto

Buscou-se avaliar o desempenho do controlador proposto em diversos cenários. No primeiro, objetivo foi observar se o controlador provê consenso entre os veículos do pelotão. Neste caso, o líder mantém velocidade constante e os seguidores tentam alcançar o espaçamento desejado entre veículos. No segundo cenário, buscou-se verificar se os veículos seguidores são capazes de rastrear o veículo líder. Nesse cenário, o líder acelera ou desacelera para alterar sua velocidade de cruzeiro e os seguidores devem acompanhar corretamente seu comportamento. Finalmente, foi inserida uma perturbação no pelotão mudando a velocidade do líder com uma tendência senoidal.

Dentre as topologias expostas na Seção 2.4.4, a topologia de controle escolhida nesta etapa de simulações foi a PLF (Figura 25 (a)), na qual o líder se comunica com todos os veículos seguidores, e todos os outros veículos também consideram informações de seu antecessor para computar a ação de controle. Na prática, os veículos do pelotão não conhecem os valores estáveis das variáveis relacionadas ao movimento do líder, mas apenas suas medições atuais que recebem do líder com algum atraso. Portanto, para o cálculo prático em tempo real da política de espaçamento desejada d_{ij} , considerou-se na ferramenta PLEXE a medição atual da velocidade líder $v_0(t)$. Para os experimentos realizados nesta seção, o fluxo veicular foi o normal.

No primeiro cenário, objetivo foi observar se o controlador provê consenso entre

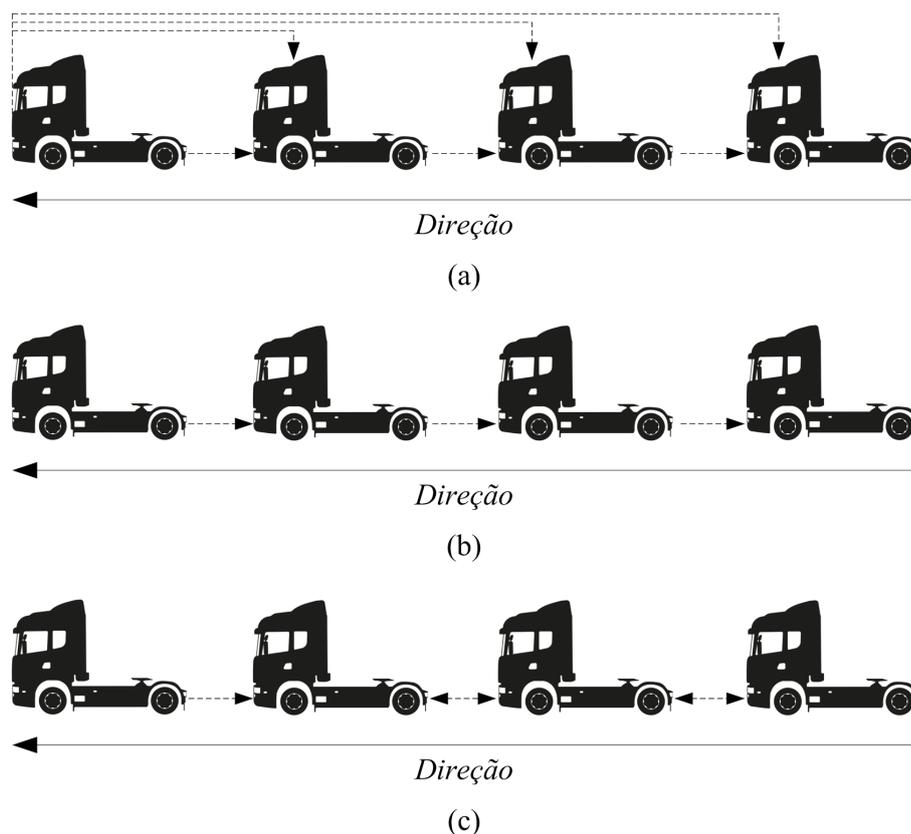


Figura 25 – Topologias selecionadas para as simulações. (a) *Predecessor-Leader Following (PLF)*; (b) *Predecessor Following (PF)*; e (c) *Bidirectional-Leader (BDL)*

os veículos do pelotão. Neste caso, o líder mantém velocidade constante e os seguidores tentam alcançar o espaçamento desejado entre veículos. Nas Figuras 26 e 27 pode-se observar os resultados para este cenário. Diante dos resultados obtidos, pode-se confirmar a capacidade do controlador em prover consenso e manter o pelotão estável. Apesar da presença de atrasos durante a comunicação, todos os veículos chegam ao consenso no que diz respeito ao espaçamento e velocidade do líder.

No segundo cenário, buscou-se verificar se os veículos seguidores são capazes de acompanhar corretamente o comportamento do veículo líder. Na Figura 28 pode-se verificar que o líder acelera de 0 m/s até 30,6 m/s com uma aceleração constante de 3 m/s² e todos os outros veículos seguem corretamente seu comportamento, atingindo a velocidade de consenso.

O terceiro cenário testado força o veículo líder desacelerar de 30,6 m/s para 0 m/s (parada completa) para simular a manobra de frenagem. Os veículos iniciam a simulação com uma distância entre para-choques de 35 metros. Após o veículo líder realizar a frenagem, os veículos seguidores devem manter uma distância de 10 metros. Os resultados apresentados na Figura 29, indicam que todos os veículos pararam de forma segura, e convergiram para a distância de 10 m.

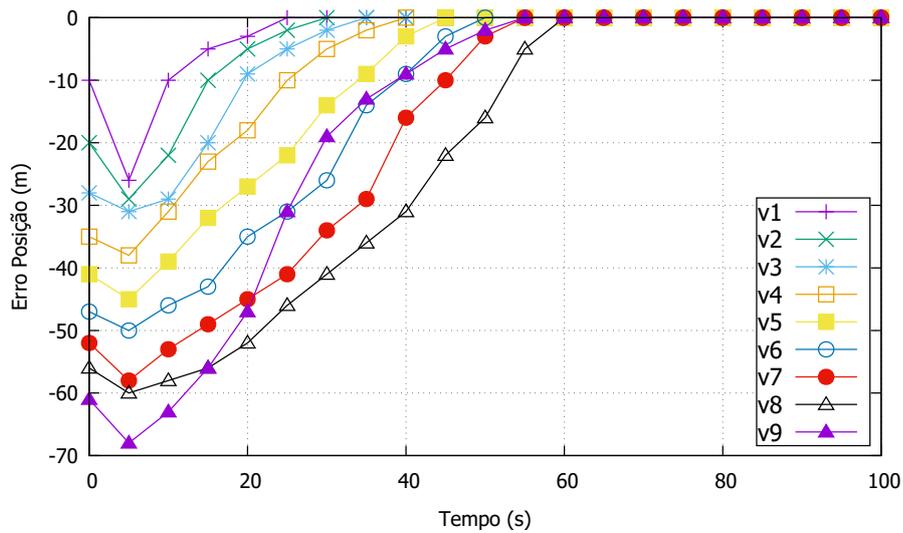


Figura 26 – Erros de posicionamento dos veículos do pelotão - (fluxo: 3000 veículos/hora)

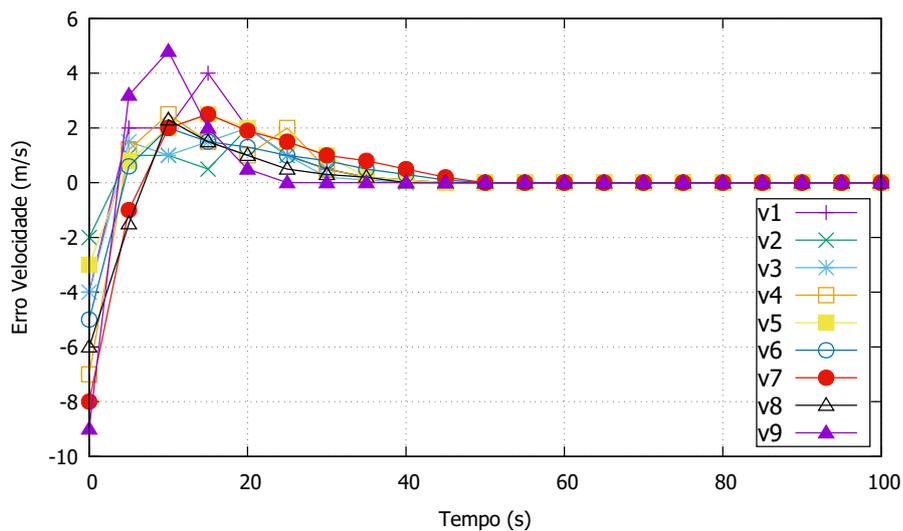


Figura 27 – Erros na velocidade dos veículos do pelotão em relação ao líder - (fluxo: 3000 veículos/hora)

Diante do exposto por Feng *et al.* (2019), buscou-se verificar se flutuações de velocidade e aceleração são atenuadas a jusante do pelotão quando uma perturbação periódica está atuando na velocidade do líder. A perturbação senoidal é definida pela Equação 70 (SANTINI *et al.*, 2015):

$$\delta(t) = A \cos\left(\frac{6}{100}\pi t\right), A = 2,7 \text{ m/s.} \quad (70)$$

Os resultados são apresentados na Figura 30 e confirmam o desempenho do pelotão. A distância em relação ao veículo anterior mostra que a perturbação senoidal é atenuada a jusante do pelotão veicular.

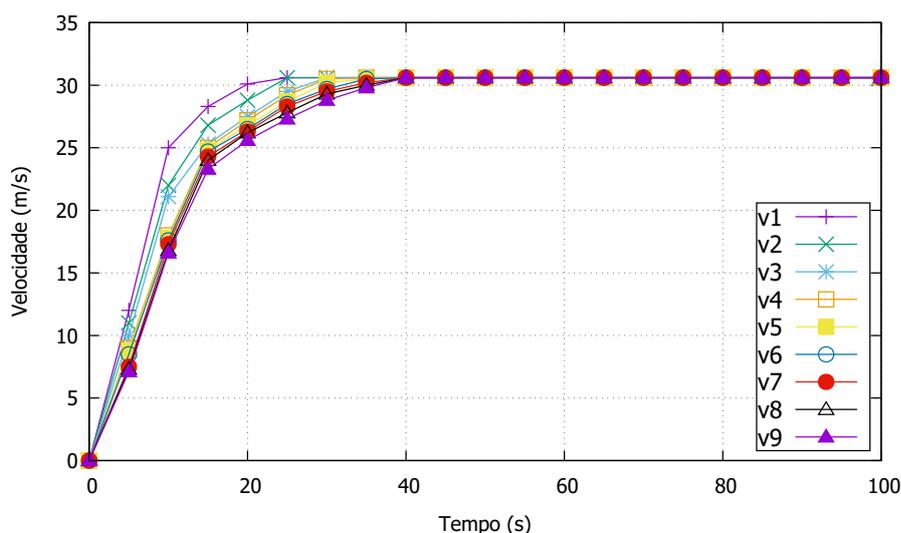


Figura 28 – Velocidades ao rastrear o veículo líder - (fluxo: 3000 veículos/hora)

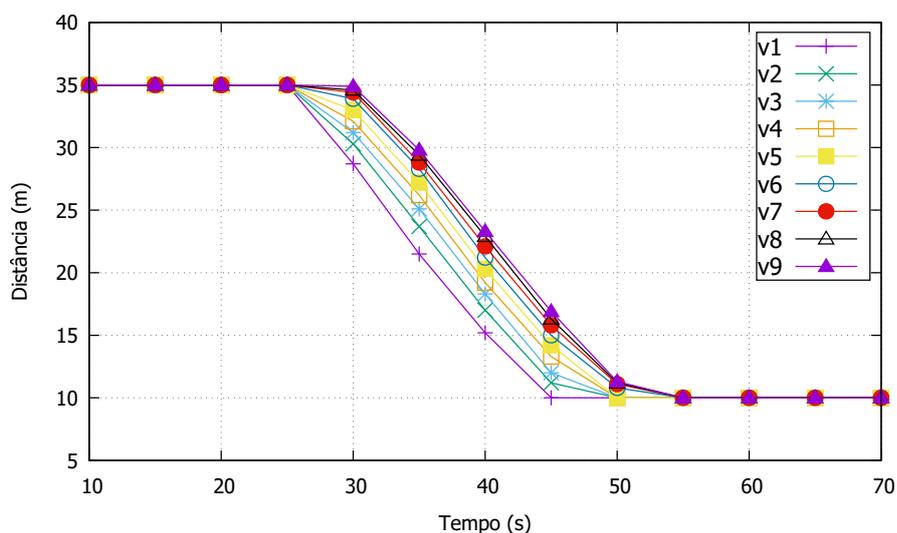


Figura 29 – Distância entre para-choques (distância de paragem: 10 m) - (fluxo: 3000 veículos/hora)

5.3.4 Comportamento Sob Diferentes Topologias

Para verificar a flexibilidade do controlador proposto, o AddP-CACC foi testado em três topologias diferentes: (i) *Predecessor-Leader Following* (PLF) (Figura 25 (a)); (ii) *Predecessor Following* (PF) (Figura 25 (b)); e (iii) *Bidirectional-Leader* (BDL) (Figura 25 (c)). Para os experimentos realizados nesta seção o fluxo veicular foi o normal.

Por meio das simulações, buscou-se testar a convergência (isto é, capacidade de manter velocidade constante) e o comportamento sob uma perturbação senoidal. Na Figura 31 é apresentado o desempenho em termos do erro de velocidade em relação ao veículo líder. Na Figura 31 pode-se perceber que independentemente da topologia escolhida, o AddP-CACC converge para o valor de velocidade desejado com,

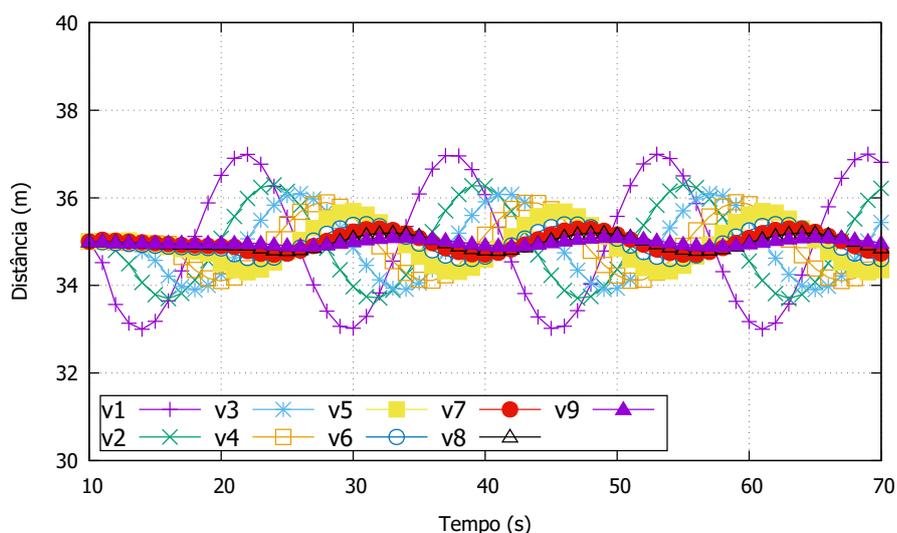


Figura 30 – Desempenho em relação ao distúrbio senoidal (Equação 70) sobre a velocidade do líder (Distância entre para-choques) - (fluxo: 3000 veículos/hora)

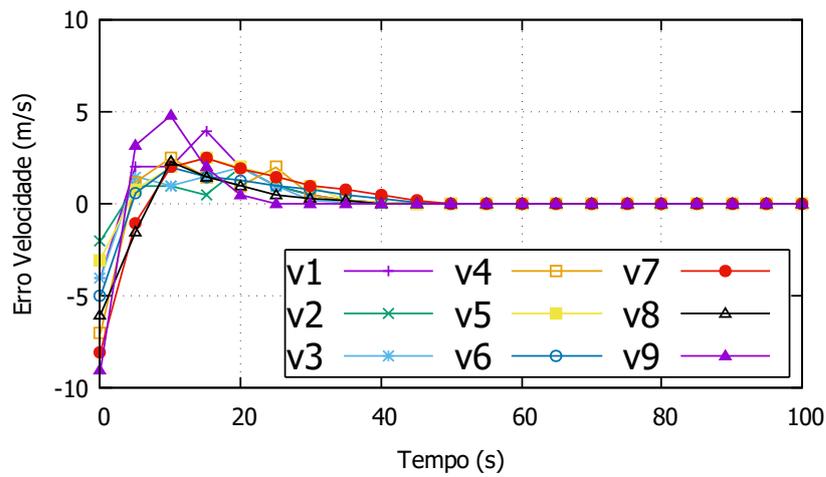
no entanto, comportamentos diferentes.

Ao comparar a topologia *Bidirectional-Leader* (Figura 31 (c)) com a seguinte, *Predecessor-Leader Following* (Figura 31 (a)), pode-se observar um erro de velocidade menor, mas um tempo de convergência maior. Ou seja, a topologia *Bidirectional-Leader* mostra melhor desempenho durante a simulação enquanto revela um erro de estado estacionário residual muito pequeno em relação ao consenso.

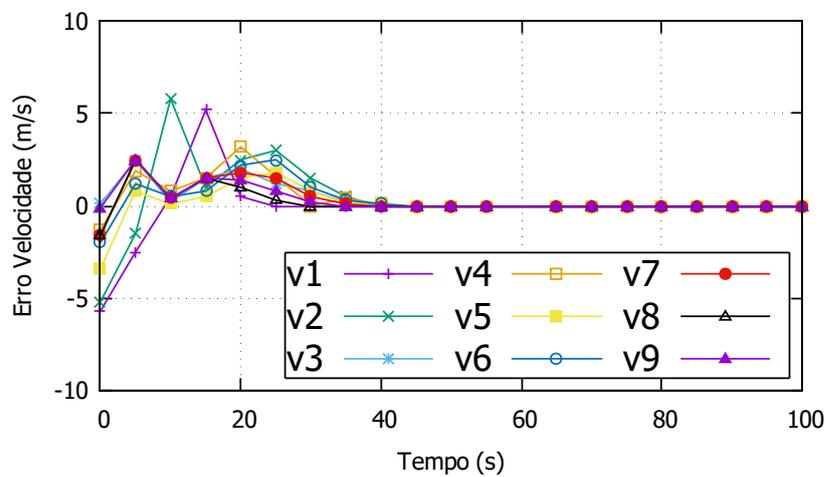
Essa diferença ocorre devido ao comportamento egoísta da topologia PLF. Com uma topologia BDL, cada ação do veículo também considera o erro de distância para o veículo a seguir. Por outro lado, a topologia PF (Figura 31 (b)) se comporta de maneira semelhante à PLF, com apenas pequenas diferenças.

Já para o cenário de perturbação senoidal, pode-se observar na Figura 32 a velocidade como uma função do tempo para as três topologias simuladas. Independentemente da topologia, o AddP-CACC mostra um comportamento estável.

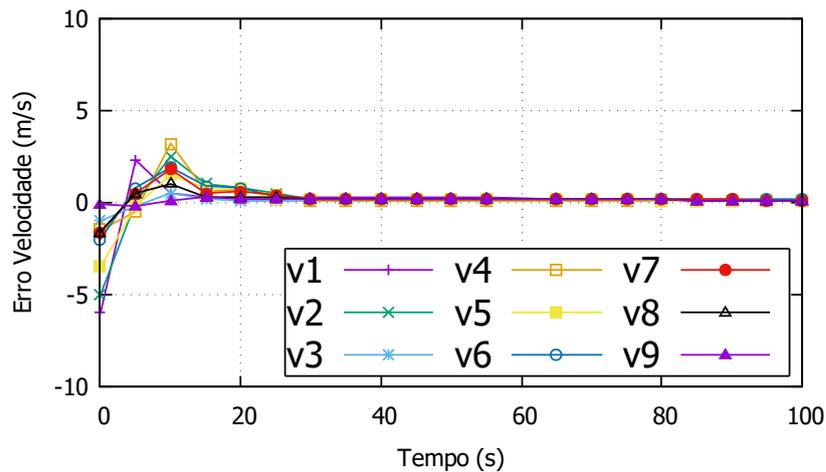
Diante do exposto na Figura 32, a topologia *Bidirectional-Leader* faz com que o AddP-CACC considere as informações provenientes tanto do veículo anterior, quanto seguidor, desta forma gera melhores resultados para o controle. O AddP-CACC faz com que todos os veículos se comportem de maneira semelhante em termos de velocidade. Diante dos resultados, mesmo com as mudanças na topologia, o AddP-CACC se adapta ao cenário.



(a)

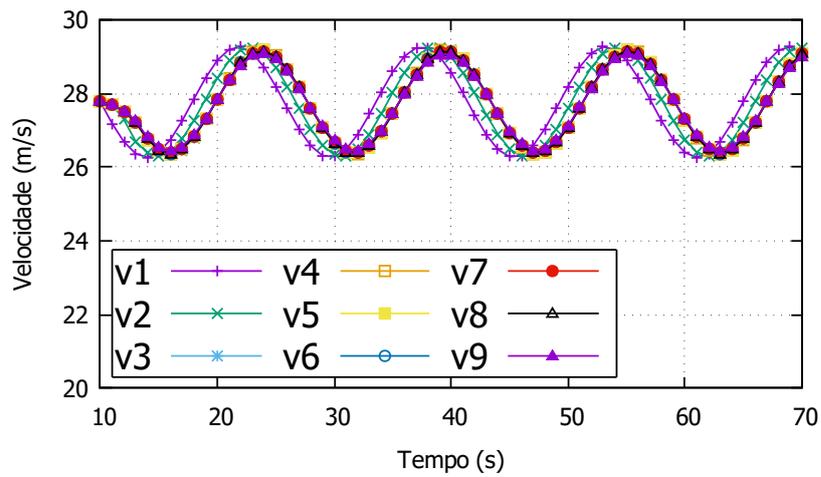


(b)

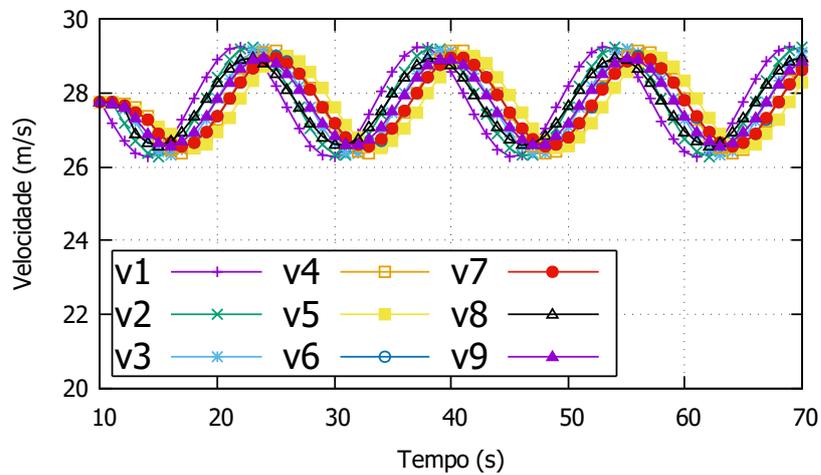


(c)

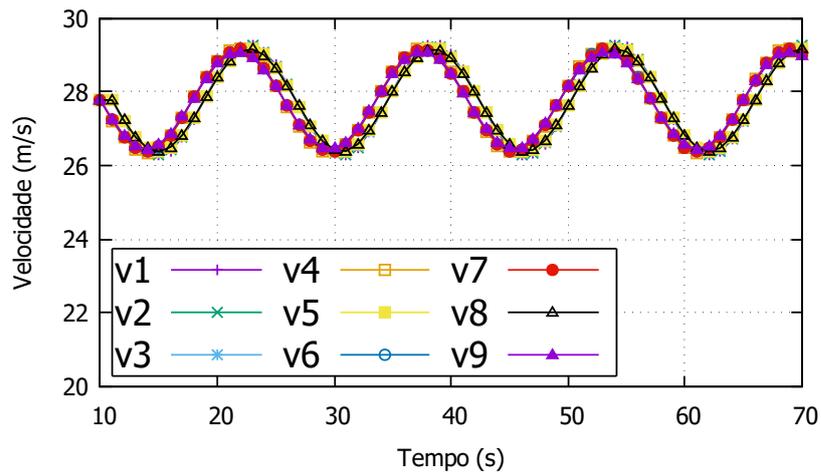
Figura 31 – Desempenho do AddP-CACC referente ao consenso em termos de erro de velocidade. (a) *Predecessor-Leader Following* (PLF); (b) *Predecessor Following* (PF); e (c) *Bidirectional-Leader* (BDL) - (fluxo: 3000 veículos/hora)



(a)



(b)



(c)

Figura 32 – Desempenho do AddP-CACC referente ao consenso em termos de velocidade para o cenário de perturbação. (a) *Predecessor-Leader Following* (PLF); (b) *Predecessor Following* (PF); e *Bidirectional-Leader* (BDL) - (fluxo: 3000 veículos/hora)

5.3.5 Comportamento Sob Alto Fluxo de Veículos

No cenário rodoviário descrito na Seção 5.1.5.1, com fluxo de veículos definido em 5000 veículos/hora e com a topologia *Predecessor-Leader Following*⁶, buscou-se verificar o consenso, o rastreamento do líder e o desempenho da abordagem proposta por meio de uma perturbação senoidal.

No primeiro cenário, objetivo foi observar se o AddP-CACC provê consenso entre os veículos do pelotão em um cenário com alto fluxo de veículos. Neste caso, o líder mantém velocidade constante e os seguidores tentam alcançar o espaçamento desejado entre veículos. Na Figura 33 pode-se observar os resultados para este cenário, nos quais a abordagem proposta tem desempenho semelhante ao apresentado na Figura 26. Diante dos resultados obtidos, pode-se confirmar a capacidade do AddP-CACC em prover consenso e manter o pelotão estável em um cenário com alto fluxo de veículos. Importante ressaltar que o AddP-CACC controla a carga na rede em alta densidade local, com isso a comunicação no pelotão se mantém estável.

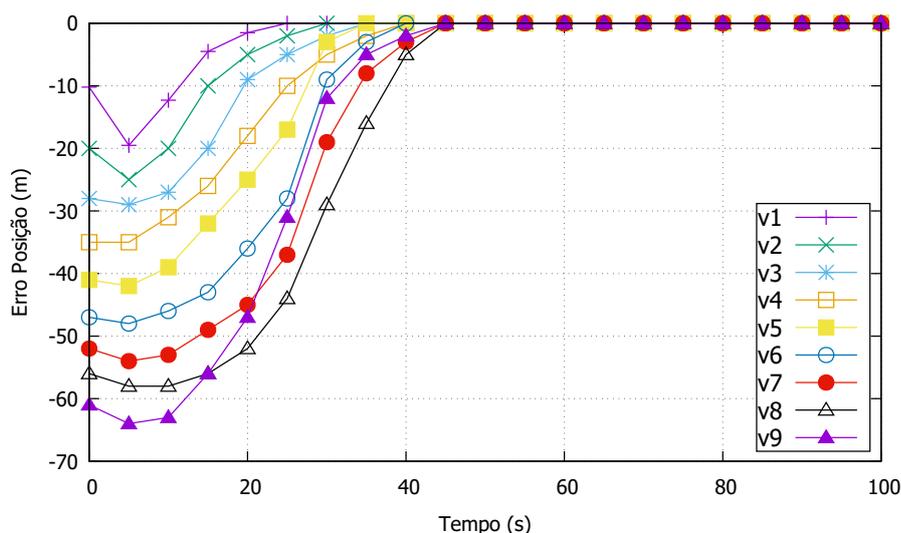


Figura 33 – Erros de posicionamento dos veículos do pelotão (fluxo: 5000 veículos/hora)

No segundo cenário definido nesta seção, buscou-se verificar se os veículos seguidores são capazes de rastrear o veículo líder, ou seja, o líder acelera ou desacelera para alterar sua velocidade de cruzeiro e os demais veículos devem acompanhar corretamente seu comportamento. Na Figura 34 pode-se verificar que o líder acelera de 22,2 m/s até 30,6 m/s com uma aceleração constante de 3 m/s². Apesar das interferências causadas por outros veículos, todos os veículos seguidores rastreiam corretamente seu comportamento, atingindo a velocidade de consenso. O desempenho apresentado na Figura 34 é próximo ao apresentado na Figura 28.

⁶ A escolha da topologia PLF tem como objetivo a comparação com o resultados obtidos na Seção 5.3.3.

No terceiro cenário, o líder acelera e desacelera com o objetivo de formar uma perturbação senoidal (Equação 70) em torno da velocidade média de 30,6 m/s. Os resultados são apresentados na Figura 35. Como apresentado na Figura 30, a distância em relação ao veículo anterior mostra que a perturbação senoidal é atenuada a jusante do pelotão veicular. De fato, a oscilação já é pouco perceptível no veículo (V4). No entanto, existem imperfeições causadas por perdas de *beacons* transmitidos durante a simulação. Ainda sim, o sistema ainda pode ser considerado seguro.

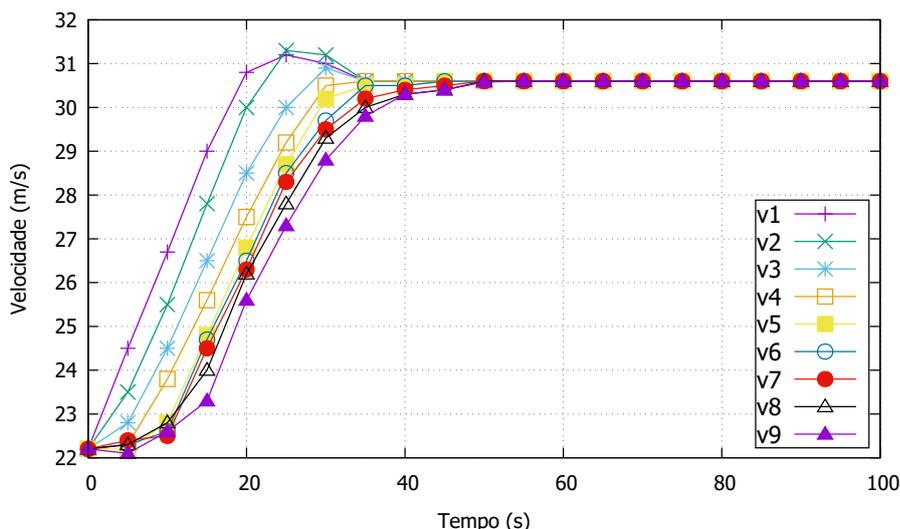


Figura 34 – Velocidades ao rastrear o veículo líder

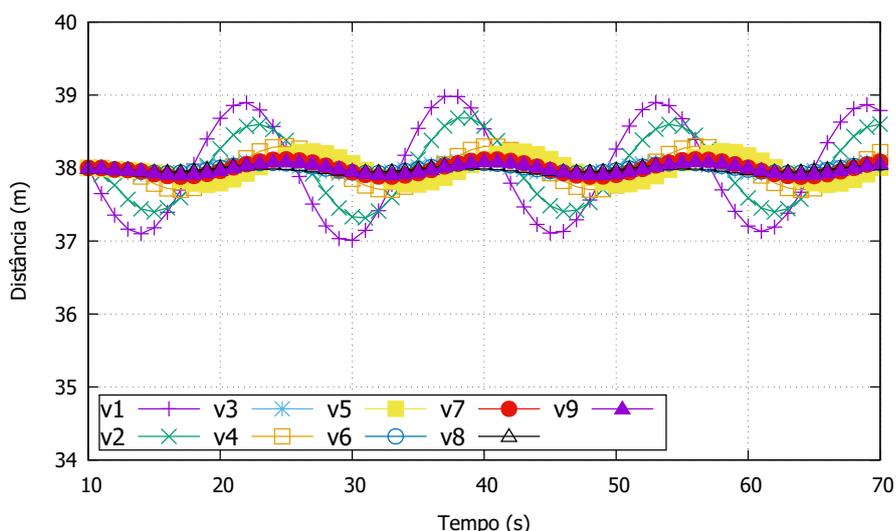


Figura 35 – Desempenho do AddP-CACC em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)

5.3.6 Comparativo Entre Abordagens de Controle

Nesta seção buscou-se avaliar o desempenho da abordagem proposta AddP-CACC diante das abordagens PATH, Connect & Drive, DOT-PATH e TESTCC. As abordagens foram comparadas experimentalmente em termos de estabilidade em cadeia sob o modelo de propagação Two-Ray Interference que captura tanto a atenuação do sinal, quanto os efeitos de reflexão do solo. Também foi levado em consideração o desvanecimento distribuído Nakagami- m .

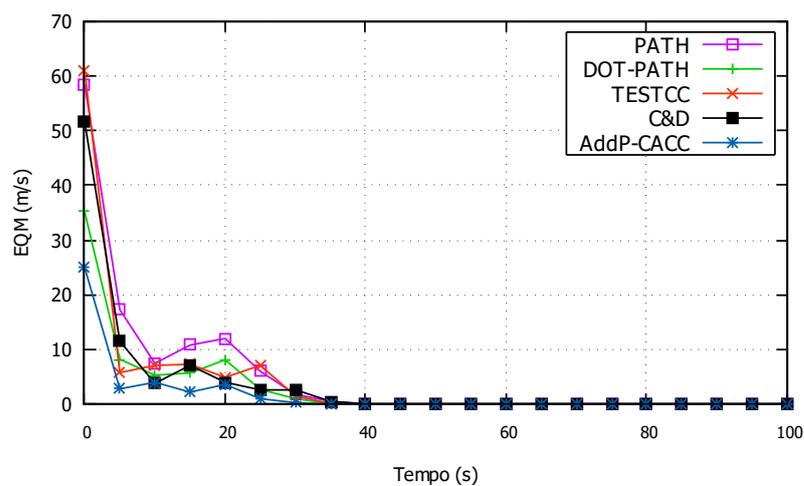
A princípio, buscou-se comparar as abordagens por meio de uma medida frequentemente usada na verificação da acurácia de modelos numéricos que é o Erro Quadrático Médio (EQM). O EQM é mais sensível aos grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado, assim busca evitar o cancelamento de erros com sinais diferentes (FARZAMNIA *et al.*, 2017). Nesta fase, por meio dos dados obtidos na Seção 5.3.4, o EQM foi calculado para cada abordagem (e topologias de comunicação) e por fim, um comparativo entre as abordagens é apresentado na Figura 36. A abordagem proposta AddP-CACC apresenta menor erro quadrático médio relacionado à velocidade nos pontos observados e nas três topologias de comunicação implementadas.

Por fim, buscou-se verificar se flutuações de velocidade e aceleração são atenuadas a jusante do pelotão quando uma perturbação periódica está atuando na velocidade do líder. A perturbação senoidal é definida pela Equação 70. Os resultados apresentados têm como fluxo veicular 5000 veículos/hora para efeito comparativo com a Figura 35 (os resultados para fluxos inferiores mostraram o mesmo comportamento apresentado em fluxo denso) e o cenário simulado é detalhado na Seção 5.1.5.1.

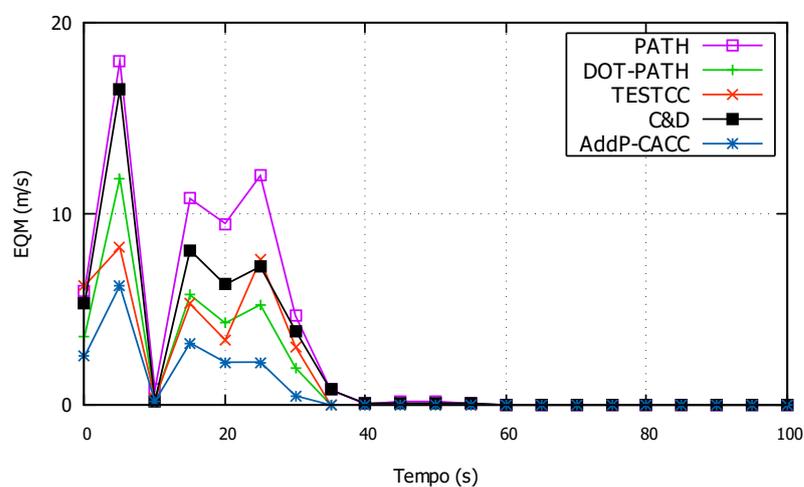
Ao comparar a abordagem PATH (Figura 37) com as outras abordagens simuladas, percebe-se que por conta de não ter um protocolo voltado à confiabilidade na transmissão, o desempenho do controlador é prejudicado. Isso fica ainda mais nítido ao comparar a abordagem PATH diretamente com a abordagem DOT-PATH (Figura 40) que é exatamente a integração entre um protocolo de comunicação confiável e o controlador proposto por R. Rajamani *et al.* (2000). Vale destacar que abordagem CACC PATH mostrou menor degradação em cenários com fluxos inferiores que 5000 veículos/hora, porém continuou a sofrer com a falta de confiabilidade na transmissão.

As abordagens que buscam prover confiabilidade na comunicação (AddP-CACC, DOT-PATH e TESTCC) se mostram mais estáveis em um cenário com fluxo denso de veículos. A variação na distância interveicular é menor na abordagem AddP-CACC (Figura 35), seguida por DOT-PATH (Figura 37) e TESTCC (Figura 39).

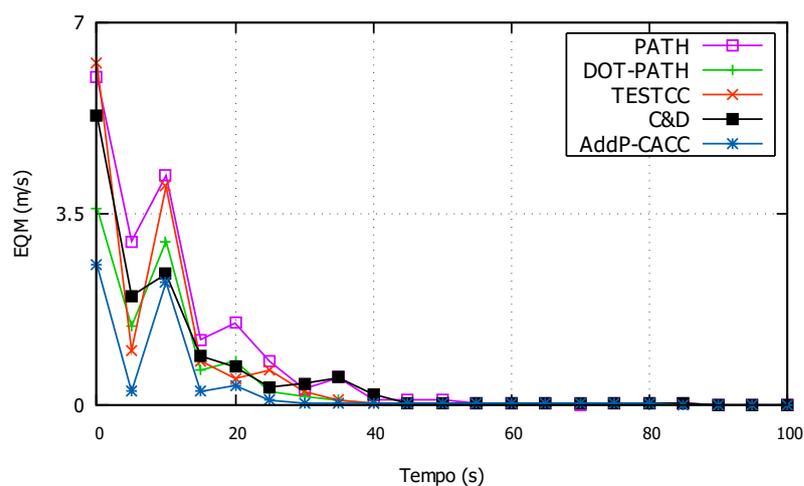
A abordagem Connect & Drive (Figura 38) não implementa qualquer tipo de controle de carga. Diante disso, a abordagem sofre com sobrecarga na rede, o que acarreta em atrasos na comunicação que por fim, geram maior variação na distância interveicular.



(a)



(b)



(c)

Figura 36 – Comparativo entre abordagens por meio do EQM. (a) *Predecessor-Leader Following* (PLF); (b) *Predecessor Following* (PF); e *Bidirectional-Leader* (BDL) - (fluxo: 3000 veículos/hora)

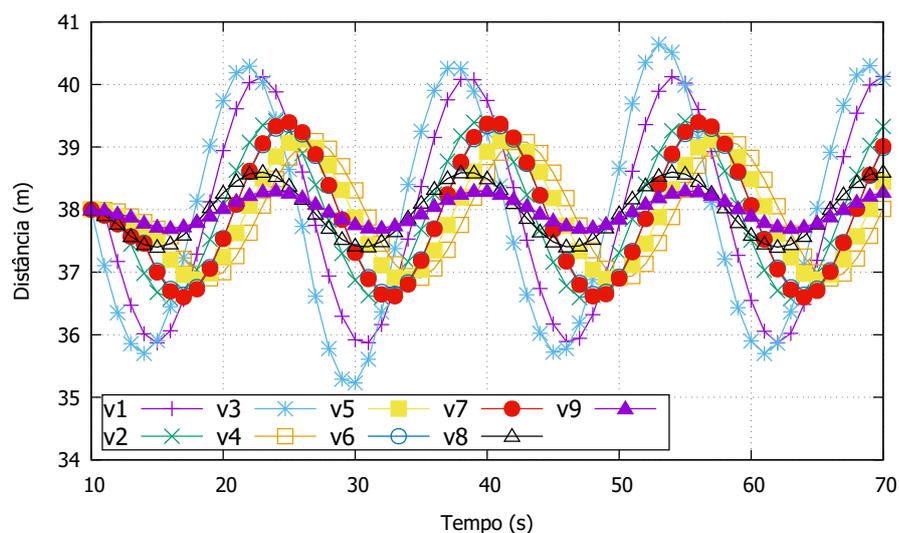


Figura 37 – Desempenho da abordagem PATH (R. RAJAMANI *et al.*, 2000) em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)

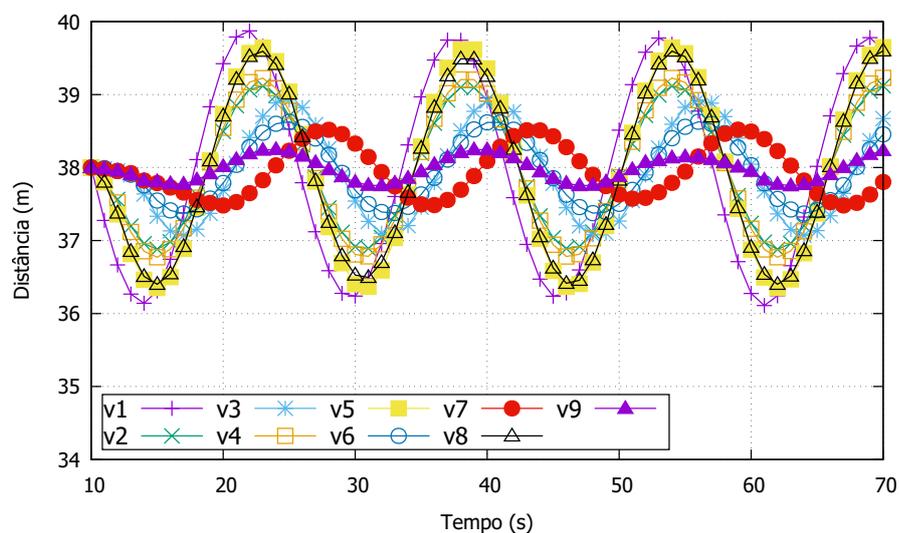


Figura 38 – Desempenho da abordagem Connect & Drive (ÖNCÜ *et al.*, 2014) em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)

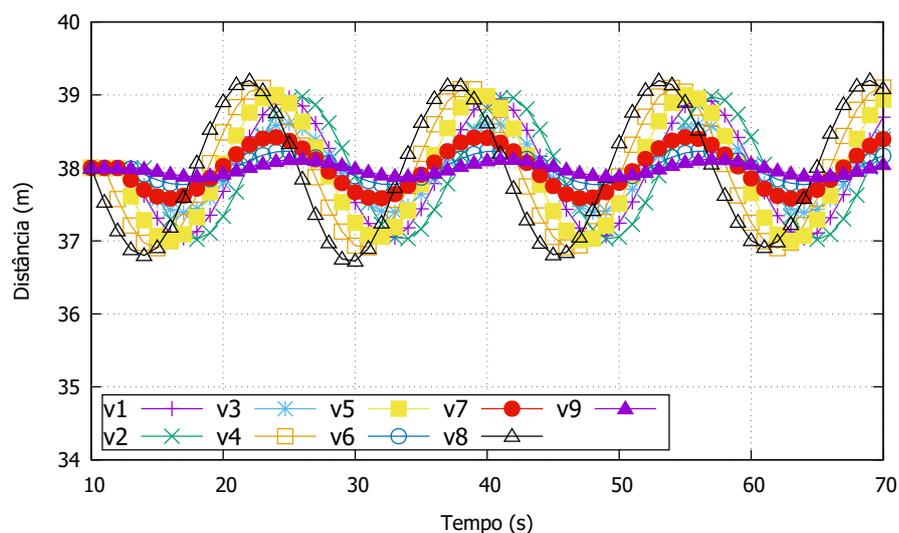


Figura 39 – Desempenho da abordagem TESTCC (SANTINI *et al.*, 2017) em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)

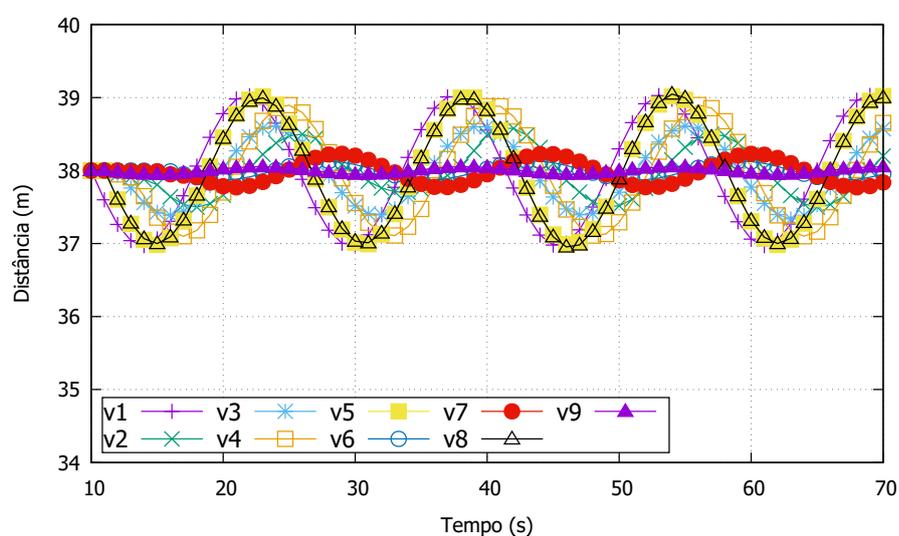


Figura 40 – Desempenho da abordagem DOT-PATH (CHITRA; SATHYA, 2016) em relação ao distúrbio senoidal sobre a velocidade do líder em cenário com 5000 veículos/hora (Distância entre para-choques)

Após analisar a confiabilidade e o desempenho da abordagem AddP-CACC, buscou-se avaliar a abordagem proposta integrada a uma aplicação EEBL com veículos que se movimentam em pelotões, por meio de comparativo com as abordagens estudadas até o momento. Por um acidente ou qualquer outro impedimento, alguns veículos freiam bruscamente até pararem completamente, forçando todos os veículos seguintes a parar completamente também. O líder freia com uma desaceleração constante de 4 m/s^2 . Nos experimentos, optou-se por variar as velocidades máximas dos veículos (50, 70, 90, 110⁷ e 150 km/h) para observar o impacto desta variação na quantidade de acidentes decorrentes da frenagem.

Contudo, nesta seção são apresentados os resultados mais relevantes e críticos (velocidades de 110 e 150 km/h). Os experimentos foram conduzidos com o objetivo de analisar o comportamento de uma aplicação EEBL usando diferentes abordagens e qual a contribuição do AddP-CACC para a aplicação de segurança que visa minimizar acidentes em rodovias. Nesse sentido, os resultados foram analisados com objetivo de determinar quais são os benefícios obtidos quando alguns veículos estão equipados com o par: abordagem de controle e aplicação EEBL.

Nos experimentos, assumiu-se que parte dos veículos não participam dos pelotões ou seja, não utilizam a aplicação EEBL e uma abordagem CACC. O primeiro experimento teve como objetivo avaliar a eficácia da aplicação EEBL em relação aos acidentes (colisões veiculares) decorrentes da frenagem brusca. Pode-se observar na Figura 41 a fração de veículos envolvidos em colisões em função da quantidade de veículos equipados ou não com a aplicação EEBL e CACC (da taxa de utilização da aplicação EEBL) em um cenário que considera a velocidade máxima de 110 km/h e fluxo 3000 veículos/hora. Nas simulações com velocidades menores que 110 km/h, foram produzidos resultados semelhantes aos apresentados, com uma nítida redução das colisões, mesmo com taxas de utilização de (10-20 %).

De acordo com os resultados obtidos, a vantagem da utilização do par aplicação EEBL e CACC é evidente. A porcentagem de veículos envolvidos em acidentes com a abordagem AddP-CACC é significativamente menor do que nas abordagens testadas, porém a abordagem DOT-PATH também mitiga os acidentes com uma taxa de utilização de 50 %. Independente da abordagem utilizada, a aplicação EEBL obtém sucesso na diminuição de acidentes.

Após constatar os benefícios da utilização da aplicação EEBL com a abordagem AddP-CACC em pelotões veiculares, em um cenário com velocidade máxima de 110 km/h, buscou-se aumentar este valor (150 km/h) para analisar os efeitos na frenagem dos veículos em uma velocidade maior que a permitida pela legislação de trânsito. Na Figura 42, pode-se constatar o aumento de colisões, porém, o comportamento das abordagens se mantém o mesmo. Há redução das colisões, mesmo em cenários com

⁷ Velocidade máxima permitida na BR-101.

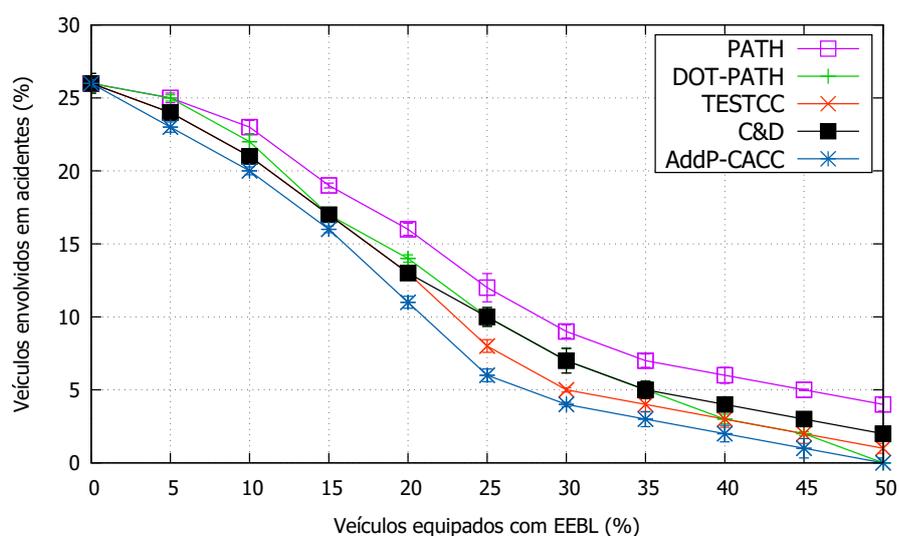


Figura 41 – Porcentagem de veículos envolvidos em colisões assumindo diferentes taxas de veículos equipados com EEBL (velocidade máxima de 110 km/h)

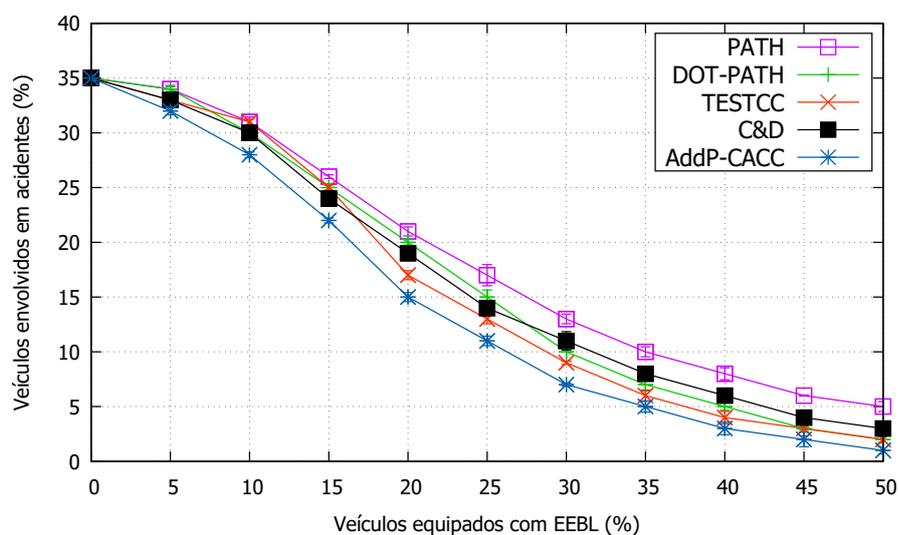


Figura 42 – Porcentagem de veículos envolvidos em acidentes assumindo diferentes taxas de veículos equipados com EEBL (velocidade máxima de 150 km/h)

taxas pequenas de veículos utilizando a aplicação EEBL. Isso se dá pelo fato de que o alerta é recebido de forma precoce pelos veículos que utilizam a aplicação. Dessa forma, o veículo equipado realiza a frenagem de forma gradual e eficiente. Este efeito é amplificado pelo fato de que os veículos não equipados com a aplicação reagem a essa lenta desaceleração gerando uma onda de redução de velocidade, em vez da frenagem brusca típica de situações de emergência.

5.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou os resultados obtidos nos experimentos, os quais serviram para avaliar o desempenho da abordagem proposta. Diante dos resultados, pode-se concluir que o AddP-CACC é eficiente e eficaz, quando considerados cenários rodoviários, e é uma solução adequada para as aplicações de segurança que requerem entrega confiável de dados e que são sensíveis ao atraso.

Além disso, por meio dos resultados e análises apresentados neste capítulo, confirmam-se que essa abordagem provê um comportamento estável ao pelotão, pois a perturbação senoidal é atenuada a jusante do pelotão veicular. O AddP-CACC faz com que todos os veículos se comportem de maneira semelhante em termos de velocidade. Diante dos resultados, mesmo com as mudanças na topologia, o AddP-CACC se adapta ao cenário.

A confiabilidade na comunicação é atingida, a eficácia do sistema pôde ser comprovada pelas simulações, uma vez que a abordagem proposta atendeu a todos os nós da rede, desta maneira, é possível comprovar sua confiabilidade. A abordagem se mostrou mais estável em um cenário com fluxo denso de veículos e a variação na distância interveicular é menor ao comparar os resultados com as abordagens simuladas.

6 CONCLUSÕES

Este capítulo conclui esta tese apresentando, primeiramente, uma visão geral sobre o desenvolvimento deste trabalho. As motivações e objetivos traçados são também revisados. Por fim, as contribuições e alguns trabalhos futuros são discutidos.

6.1 VISÃO GERAL DO TRABALHO E MOTIVAÇÕES

Um dos desafios em redes veiculares é a inserção de novos mecanismos que possam torná-las mais seguras e confiáveis, sem comprometer seu desempenho. Com a necessidade de prover confiabilidade às redes veiculares surgem abordagens confiáveis que buscam oferecer um serviço de entrega garantida de mensagens, através de implementações de mecanismos de controle para que seu comportamento possa dinamicamente adaptar-se às condições observadas na rede. Na presença de redes veiculares confiáveis, espera-se que o emprego de pelotões de veículos tenha um impacto enorme na futura infraestrutura de trânsito, reduzindo congestionamentos, poluição, acidentes e a quantidade de tempo de viagem desperdiçado. Como o contexto de pelotões veiculares envolve diferentes áreas científicas, sua implementação é desafiadora, e alguns problemas ainda estão em aberto.

A comunidade científica claramente precisa abordar tais questões antes da massificação dos pelotões em rodovias reais, já que erros de projeto podem levar à perda de vidas humanas. Esta tese teve, como um dos pontos estudados, os *Networked Control Systems*. Diante do exposto por Gupta e Chow (2010), NCSs são categorizados em duas partes: (i) controle de rede, que trata, por exemplo, do controle de roteamento, redução de carga, comunicação eficiente de dados, protocolo de rede, etc; e (ii) controle sobre a rede, que lida com estratégias de controle para minimizar o efeito de parâmetros adversos oriundos da comunicação no desempenho do NCS, como atrasos e perdas. Nesta tese, ambas as categorias de NCSs foram desenvolvidas.

A comunicação em VANETs, e os problemas existentes na comunicação que podem inviabilizar o controle longitudinal de um pelotão também foram estudados. Com o objetivo de entender os requisitos do sistema de controle longitudinal, diante dos estudos realizados, foi proposta uma abordagem que adapta o intervalo entre mensagens de controle de acordo com o fluxo veicular. Os resultados obtidos mostraram que pode-se fazer melhor do que aderir à regra comumente assumida de intervalo fixo (10 Hz), mesmo para um sistema de controle automatizado. Esta abordagem de comunicação teve por objetivo aumentar a confiabilidade nas transmissões, mitigar problemas encontrados em abordagens que buscaram gerar confiabilidade para este cenário, a fim de proporcionar uma melhora no desempenho para as aplicações que têm como requisito crítico a entrega das mensagens em um cenário veicular.

Finalmente, nesta tese foi proposta uma abordagem de controle cooperativo

descentralizado baseado em consenso que, ao contrário das abordagens da literatura, suporta diferentes topologias de comunicação. Um dos benefícios é a capacidade de se adaptar o padrão de comunicação às características da rede. A abordagem foi exaustivamente analisada em cenários desafiadores, incluindo distúrbios de rede e modelagem detalhada do mecanismo proposto, mostrando desempenho e convergência satisfatórios no escopo das simulações.

Os métodos de pesquisa utilizados foram distribuídos em três fases. Na primeira fase, foi executada uma pesquisa bibliográfica sistemática para realizar a fundamentação teórica e levantar trabalhos correlatos que abordam a área de redes veiculares, transmissão confiável, aplicações que utilizam redes veiculares, sistemas de transporte inteligentes, pelotões veiculares, consenso e controle de pelotões veiculares. Na segunda fase, a abordagem proposta foi definida e seus algoritmos, equações e mensagens foram detalhadamente descritos. Na terceira fase, a abordagem proposta foi implementada, utilizando dois simuladores (rede e de tráfego) bidirecionalmente acoplados. Diferentes experimentos simulados foram realizados com o objetivo de avaliar a abordagem. A análise dos resultados obtidos nas simulações, juntamente com a comparação entre a abordagem proposta e outras abordagens, foram realizadas nesta fase.

Com a identificação das principais características presentes nas abordagens de comunicação confiável e controle de pelotões, com a definição da abordagem proposta e pela análise feita dos impactos da abordagem e da sua eficácia, pode-se afirmar que os objetivos específicos desse trabalho foram atingidos. A abordagem proposta nesta tese inova em relação aos trabalhos relacionados por ser uma abordagem adaptativa que busca diminuir a quantidade de mensagens desnecessárias na rede e atrasos na entrega de mensagens. Além disso, a abordagem desenvolvida obteve resultados superiores quando comparada as existentes na literatura.

Com os resultados obtidos nas simulações foi possível comprovar a eficácia da abordagem proposta. A métrica utilizada para avaliar a eficácia do uso da abordagem por uma aplicação foi a taxa de mensagens entregues aos nós pertencentes a rede em diversos cenários. Confirmou-se que a abordagem proposta permite um comportamento estável ao pelotão: uma perturbação senoidal introduzida no sistema é atenuada a jusante do pelotão veicular. Os atrasos existentes no recebimento das mensagens não prejudicaram os condutores e nem o CACC proposto. A abordagem proposta fez com que todos os veículos se comportassem de maneira semelhante em termos de velocidade. Mesmo em cenários com diferentes topologias de rede. Apesar dos impactos e degradações provocadas pelo uso das mensagens de controle, os resultados foram superiores as abordagens correlatas estudadas e simuladas neste trabalho. Entretanto, cabe ressaltar que, como em qualquer simulação, as análises da eficiência e eficácia devem ser interpretadas de maneira cuidadosa, pois na prática po-

dem haver fatores externos como interferência eletromagnética, clima, sombreamento que podem ocasionar problemas na rede veicular.

Por fim, os resultados obtidos permitiram confirmar as hipóteses de pesquisa, dado que a abordagem mantém os veículos de um pelotão na formação desejada e com isso aumenta a taxa de utilização da via, provê flexibilidade ao controlador diante de topologias variáveis, provê confiabilidade na comunicação entre veículos, mas aumenta o tempo de processamento das mensagens e, por fim, aumenta o atraso na comunicação, porém sem prejudicar a estratégia de controle. Também foi possível verificar que a abordagem adiciona sobrecarga de mensagens de controle em cenários com alta densidade veicular. Contudo, mesmo com esta degradação, todos os veículos receberam as mensagens de controle/alerta e que os atrasos para o recebimento do alerta (impacto sobre o tempo) identificados não prejudicaram a ação do controlador. De forma geral, a atuação da abordagem proposta nesta tese contribui para o aumento da robustez e da eficácia dos pelotões veiculares. Estas contribuições fornecidas pela utilização dos mecanismos podem ser úteis a aplicações voltadas a segurança no trânsito.

6.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Dentre as principais contribuições desta tese podem ser destacadas as seguintes:

- Análise de mecanismos utilizados para prover confiabilidade na entrega de mensagens de dados em redes veiculares.
- Análise de mecanismos de controle utilizados para manter os veículos de um pelotão veicular na formação desejada.
- Uma estratégia de controle cooperativo descentralizada baseada em consenso que, comparada a abordagens utilizadas na literatura, é reconfigurável em tempo de execução e que pode ser adaptada às condições da rede. Tal estratégia foi implementada para resolver o controle longitudinal de um pelotão de veículos na presença de atrasos de comunicação heterogêneos e variáveis no tempo. A abordagem foi testada exaustivamente em cenários que incluem uma configuração de rede realista, em que a rodovia é compartilhada por veículos movidos por seres humanos e automatizados. Veículos movidos por condutores humanos interferem na comunicação e controle dos veículos com certo nível de automação, enviando pacotes de dados no mesmo canal. Além disso, a abordagem foi desenvolvida para ser robusta frente a perturbações na rede e para ter uma convergência rápida.

- Análise de desempenho da abordagem de consenso em relação às perturbações na dinâmica do veículo líder e falhas de comunicação.
- Um protocolo de comunicação confiável que leva em consideração os requisitos da aplicação. A abordagem de comunicação proposta melhora ainda mais o desempenho da aplicação (aumentando a segurança) e a camada de rede (reduzindo o uso de recursos). A abordagem diminui a quantidade de retransmissões das mensagens de dados, tanto em cenários com apenas uma mensagem de sinalização, quanto em cenários com mais de uma mensagem de sinalização e adapta o período entre transmissões de mensagens de controle de acordo com a densidade da rede. O protocolo de comunicação desenvolvido suporta, atrasos na comunicação, a dinâmica dos veículos e topologias variáveis em um ambiente veicular. A abordagem foi comparada com abordagens existentes na literatura e os resultados mostraram que a abordagem proposta é capaz de manter a confiabilidade mesmo em cenários com fluxos veiculares variados.
- Aprimoramento da aplicação desenvolvida que visa disseminar alertas em rodovias e que foi integrada à abordagem proposta.

6.3 PERSPECTIVAS DE ATIVIDADES FUTURAS

Esta tese focou no controle de pelotões inteligentes em rodovias sob o ponto de vista da integração e co-projeto de um protocolo de comunicação confiável com teoria de controle longitudinal de veículos. Ao se delimitar o contexto desta tese, abre-se a oportunidade de estendê-la em diferentes direções.

6.3.1 Questões Abertas de Pesquisa

Algumas questões abertas de pesquisa podem ser tratadas em atividades futuras. Questões, como o emprego da Inteligência Artificial e Comunicação Resiliente em um ambiente veicular, são discutidas a seguir.

Os sensores veiculares estão se tornando mais inteligentes com o tempo, resultando na capacidade dos veículos de avaliar melhor o ambiente. Esse avanço possibilitou certo nível de condução automatizada, baseada na ideia de imitar o comportamento da condução humana e atenuar as falhas humanas. Uma infinidade de aplicações pode ser desenvolvida a partir da segurança rodoviária ativa e passiva até o tráfego otimizado, variando de veículos automatizados à redes veiculares (LIANG *et al.*, 2017).

No âmbito das redes veiculares, a troca de informação é definida pelo paradigma V2X, que baseia-se essencialmente no compartilhamento de informações na forma de veículo para infraestrutura (V2I) e veículo para veículo (V2V). Um caso de uso importante do V2X são as informações do fluxo de tráfego. O conjunto de dados do

fluxo de tráfego pode ser adquirido de várias fontes, como câmeras de circuito fechado, *loops* de indução, serviços de informações e veículos com base em multidões. As aplicações veiculares podem usar essas informações para executar tarefas de forma inteligente, como retificação de congestionamento de tráfego, melhor utilização da carga de veículo elétrico, minimizando o consumo de combustível e melhorando os serviços baseados em localização. Projetar algoritmos de previsão de fluxo de tráfego altamente precisos usando técnicas convencionais de estimativa de fluxo de tráfego é um grande desafio (YE *et al.*, 2018). Além disso, devido a muito poucos dados de tráfego e sua acessibilidade, a pesquisa e a experimentação também se limitam a esses conjuntos de dados. Há relativamente poucos conjuntos de dados disponíveis publicamente para os pesquisadores projetarem e executarem seus algoritmos de previsão de fluxo de tráfego e comparar seus resultados.

Os recentes avanços na tecnologia de computação levaram a inteligência artificial a ser parte integrante em quase todas as áreas de pesquisa relacionadas à engenharia. A condução automatizada é um desses tópicos em que a inteligência artificial desempenha um papel crucial na habilitação de recursos básicos da condução humana. Algumas das técnicas de inteligência artificial mais usadas são: Técnicas Heurísticas, Robótica, Inteligência de Exame, Sistemas Especialistas, Teste de Torneamento, Inteligência Artificial Lógica, Planejamento, Programação e Otimização, Processamento de Linguagem Natural, Aprendizagem Teórica dos Jogos, Algoritmos Evolutivos, Inferência, Lógica Fuzzy e Machine Learning, etc. Técnicas inteligência artificial, juntamente com o conceito V2X, podem permitir a implementação de aplicações, como previsão e gerenciamento de fluxo de tráfego em tempo real, baseadas em localização, instalações de transporte autônomo, pelotões veiculares, armazenamento de dados em veículos e controle de congestionamento. No entanto, a exploração e adaptação de ferramentas de desenvolvimento de inteligência artificial para enfrentar os desafios relacionados às redes veiculares ainda é uma área de pesquisa relativamente nova.

Em pesquisas realizadas por, Fermi *et al.* (2018), Mongelli *et al.* (2019) e Ho *et al.* (2019), a técnica de Machine Learning mostrou que pode ser empregada em pelotões veiculares. Nas redes sociais veiculares, técnicas de regressão em aprendizado supervisionado podem ser usadas para prever parâmetros como taxa de transferência da rede. Nas redes veiculares, os algoritmos de classificação podem ser usados para detecção de intrusão ou mau funcionamento. Além disso, os algoritmos de classificação também são benéficos nas aplicações de segurança no trânsito, como: AR-HUD (Augmented Reality Head-Up Display), sistemas ativos de informações para o condutor, detecção de obstáculos e previsão de tipos de tráfego complexos (HO *et al.*, 2019).

O Processo de Decisão de Markov (MDP) é um exemplo de aprendizado por reforço. Ações e suas recompensas geram políticas para a escolha de uma ação ade-

quada. A inclinação do reforço é um candidato perfeito para enfrentar vários desafios de pesquisa em redes veiculares. Essa técnica por ser usada, por exemplo, para otimização cooperativa do consumo de combustível, lidando com as variações espaciais e temporais das comunicações V2V, previsão ideal de trajetos para veículos elétricos e redução nos congestionamentos de tráfego (MONGELLI *et al.*, 2019).

Em um ambiente veicular, outra técnica de inteligência artificial que pode ser usada, é a Teoria dos Jogos, a qual fornece um conjunto de ferramentas matemáticas e técnicas para modelar situações envolvendo conflitos de interesse entre os nós (TONG *et al.*, 2019). Por exemplo, a Teoria dos Jogos pode resolver conflitos entre dois ou mais pelotões pelo mesmo veículo, ou pode incentivar usuários autônomos a cooperar pagando um preço justo. As abordagens da teoria dos jogos são divididas em jogos cooperativos e não cooperativos (TONG *et al.*, 2019). No primeiro, os jogadores não podem assumir compromissos antes de iniciar o jogo. Neste último, os jogadores podem estabelecer relacionamentos anteriores antes de iniciar o jogo. Nos jogos simultâneos, a interação do jogo acontece em uma única etapa, enquanto nos jogos sequenciais, a interação acontece em uma sequência de etapas. Em uma condução baseada em pelotões, considerando a teoria dos jogos, espera-se que cada veículo selecione sua estratégia sem ter acesso à estratégia e sem aguardar a decisão de outros veículos; ou seja, é um jogo não cooperativo e simultâneo.

O rápido crescimento do tráfego de dados móveis já começou a provocar mudanças na arquitetura da rede sem fio geral. Outra questão aberta de pesquisa é a comunicação resiliente em redes veiculares, na qual busca-se a utilização de diversos sistemas e padrões para permitir a comunicação V2X. Espera-se que o futuro sistema 5G suporte 1000 vezes maior volume de dados móveis e 10 a 100 vezes maior número de dispositivos conectados (HO *et al.*, 2019). A entrega de conteúdo veicular é uma tarefa importante e desafiadora no paradigma V2X. A difusão de dados por meio do padrão IEEE 802.11 pode não ser capaz de garantir o nível de desempenho necessário devido ao alcance limitado e à mobilidade altamente variável dos veículos. Uma quantidade relativamente pequena de dados pode ser entregue a um veículo para cada ponto ativo em movimento, e o desempenho da transferência pode melhorar se o serviço de dados tolerar atrasos, porque o veículo em movimento passará por mais pontos ativos. O termo *Game-theoretic Learning* naturalmente combina teoria dos jogos e Machine Learning e foi discutido em (EKSIN *et al.*, 2018). O *Game-theoretic Learning* recebeu recentemente uma atenção considerável da comunidade de pesquisa V2X.

Existem duas tecnologias de comunicação em potencial que habilitam o V2X. O primeiro é conhecido como DSRC (Dedicated Short Range Communication), baseado no IEEE 802.11p e padronizado em 2012. O segundo é baseado nas comunicações celulares LTE (Long Term Evolution) e conhecido como Celular-V2X (C-V2X) (Y. HU *et al.*, 2018), lançado pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP) em 2016. Tanto

o DSRC quanto o C-V2X suportam as comunicações V2V e V2I. No entanto, o C-V2X também suporta comunicações de área ampla denominadas Vehicle-to Network (V2N), habilitadas pelos serviços de 5ª geração (5G). Os desafios e várias soluções para veículos conectados são discutidos em detalhes em (N. LU *et al.*, 2014).

O DSRC habilita a VANET. A VANET não exige nenhuma infraestrutura para a comunicação dos veículos, o que é essencial para garantir a segurança nas áreas remotas e pouco desenvolvidas, especialmente para a prevenção de acidentes em estradas com nevoeiro. No DSRC, os veículos transmitem mensagens CAM e mensagens de segurança básica com uma latência inferior a 100 ms. O DSRC é uma pequena modificação do protocolo IEEE 802.11 e pode ser facilmente usado para implantar VANETs. Embora os dispositivos VANET possam acessar a rede rapidamente, o protocolo de controle de acesso ao meio do DSRC é baseado no acesso múltiplo por detecção de portadora com prevenção de colisão (CSMA/CA), que pode causar latência e confiabilidade ilimitadas (J. LI *et al.*, 2018).

Por outro lado, o LTE é altamente confiável, possui maior largura de banda e requer modificações antes de sua implantação no sistema V2X (J. LI *et al.*, 2018). De acordo com as especificações técnicas 3GPP mais recentes do LTE V2X, é introduzido o link físico do LTE (Sidelink), que é diferente do tráfego de rede tradicional de *uplink* e *downlink* de LTE. No Sidelink, o LTE V2X pode funcionar em dois modos: (i) modo LTE-V-Cell; e (ii) modo LTE-V-Direct, no qual o Sidelink será usado como um link físico (N. LU *et al.*, 2014).

No modo LTE-V-Direct, um Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA) auto-organizado é usado como um protocolo MAC, no qual o recurso de tempo é dividido em *slots*. Os nós de comunicação primeiro precisam ouvir o canal por um período de tempo para adquirir as informações do quadro, enquanto acessam o canal, e então selecionam aleatoriamente um *slot* ocioso para acessar o canal. No entanto, as colisões não podem ser completamente evitadas devido à seleção simultânea de canais. No LTE-V-Direct, os dispositivos se comunicam no modo half-duplex, portanto, colisões não podem ser detectadas imediatamente. Essas colisões continuarão se os dispositivos continuarem usando o mesmo *slot*. Assim, em um TDMA auto-organizado, os dispositivos alteram o *slot* várias vezes após o envio de pacotes (J. LI *et al.*, 2018).

A taxa de perda de informações de quadros no LTE-V-Direct é uma probabilidade de que os dois veículos dentro do alcance do rádio falhem em obter as informações de quadros um do outro. O intervalo entre recepções é a interrupção entre a transmissão de dados bem-sucedida. A taxa de perda de informações e o intervalo entre recepções são fatores importantes que indicam a confiabilidade do sistema LTE-V-Direct. Um modelo de processo de acesso a mídia baseado em cadeia de Markov de comunicação LTE-V-Direct é introduzido em (Y. HU *et al.*, 2018), no qual os modelos para a taxa de perda de informações e o intervalo entre recepções são derivados e verificados. No

C-V2X, quando o link sem fio não é necessário a partir da estação base celular, um modo alternativo chamado interface PC5 (J. LI *et al.*, 2018) pode ser usado. PC5 é um canal de comunicação direta entre dois veículos na ausência de cobertura da estação base.

Além da comunicação V2V baseada em PC5, o C-V2X também permite uma interface lógica chamada Uu (J. LI *et al.*, 2018) entre o veículo e a estação base. Os recursos de comunicação celular foram adicionados a milhões de veículos e essa quantidade está crescendo. A especificação ITS do ETSI descreveu vários casos de uso para a integração dos recursos de comunicação nos veículos. Muitos desses casos de uso já foram implementados usando as conexões de rede celular existentes. Portanto, a Versão 14 do padrão LTE oferece suporte aos serviços V2X de acordo com os parâmetros definidos pelo ETSI ITS, pela SAE International (SAE) e outras organizações similares em todo o mundo.

6.3.2 Extensões Imediatas da Proposta nesta Tese

Além dessas questões abertas de pesquisa elencadas na Seção 6.3.1, existem diversas outras extensões que podem ser aplicadas diretamente sobre a proposta deste trabalho. Como extensões imediatas desta tese, pode-se considerar os seguintes pontos:

- Estender a abordagem proposta para que este possa ser adaptado (configurável) para outros tipos de aplicações de segurança no trânsito e cenários (urbano, por exemplo), através de uma interface, e com isso poder avaliar a sua integração a outras aplicações.
- A análise de desempenho da abordagem desenvolvida foi investigada com relação a perturbação repentina na dinâmica do veículo líder com topologias variadas e na presença de atrasos variáveis no tempo definidos para o valor máximo admissível τ_{max} . No entanto, é necessário um estudo mais aprofundado para estender todos os resultados apresentados nesta tese. Além disso, um tópico interessante sob investigação é a análise de distúrbios que atuam em cada veículo do pelotão.
- Implantação de mecanismos de segurança para garantir a integridade e autenticidade das mensagens trocadas entre os nós que compõem a rede.
- Os resultados das simulações ilustram a eficácia da abordagem e confirmam o desempenho satisfatório da estratégia proposta na presença de perturbações. A validação experimental dessa propriedade é um trabalho contínuo com a colaboração de outros pesquisadores.
- As análises realizadas nesta tese mostram que a abordagem proposta garante o consenso controlado da rede veicular, mesmo com atrasos na comunicação

e na presença de topologias variadas, se o líder for alcançável globalmente, ferramentas para demonstrar estabilidade assintótica na presença de topologias de comutação estão sob investigação.

- Prover uma análise matemática para provar a estabilidade do controlador, inclusive durante a troca dos ganhos escalonados.
- Buscar técnicas de otimização para calcular os ganhos do controle proposto.
- Buscar novos mecanismos que possam ser empregados para que a abordagem proposta melhore seu desempenho nos cenários estudados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AHLWEDE, R. *et al.* Network information flow. English. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 46, n. 4, p. 1204–1216, 2000. DOI: 10.1007/s11235-010-9400-5.
- AHMED-ZAID, F. *et al.* Vehicle safety communications Applications (VSC-A) final report. *In: NAT. Highway Traffic Safety Admin.* [S.l.: s.n.], set. 2011.
- ALAM, A. A.; GATTAMI, A.; JOHANSSON, K. H. An experimental study on the fuel reduction potential of heavy duty vehicle platooning. *In: 13TH International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.* [S.l.: s.n.], set. 2010. p. 306–311. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625054.
- ALI, A.; GARCIA, G.; MARTINET, P. The Flatbed Platoon Towing Model for Safe and Dense Platooning on Highways. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 7, n. 1, p. 58–68, ago. 2015. ISSN 1939-1390. DOI: 10.1109/MITS.2014.2328670.
- ALSHAER, H.; HORLAIT, E. An optimized adaptive broadcast scheme for inter-vehicle communication. *In: VEHICULAR Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st.* [S.l.: s.n.], maio 2005. 2840–2844 vol. 5. DOI: 10.1109/VETECS.2005.1543865.
- AREM, B. van; DRIEL, C. J.G. van; VISSER, R. The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics. **Trans. Intell. Transport. Sys.**, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 7, n. 4, p. 429–436, dez. 2006. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2006.884615. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2006.884615>.
- ARNE, Kesting; MARTIN, Treiber; DIRK, Helbing. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 368, n. 1928, p. 4585–4605, 2010. DOI: 10.1098/rsta.2010.0084. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.2010.0084>.
- ASTROM, Karl Johan; WITTENMARK, Bjorn. **Adaptive Control**. 2nd. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1994. ISBN 0201558661.
- BANSAL, G.; KENNEY, J. B.; ROHRS, C. E. LIMERIC: A Linear Adaptive Message Rate Algorithm for DSRC Congestion Control. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 62, n. 9, p. 4182–4197, nov. 2013. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2013.2275014.
- BANSAL, Gaurav *et al.* EMBARC: Error Model Based Adaptive Rate Control for Vehicle-to-vehicle Communications. *In: PROCEEDING of the Tenth ACM International Workshop on Vehicular Inter-networking, Systems, and Applications.* Taipei, Taiwan:

ACM, 2013. (VANET '13), p. 41–50. DOI: 10.1145/2482967.2482972. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2482967.2482972>.

BAYINDIR, Kamil Çağatay; GÖZÜKÜÇÜK, Mehmet Ali; TEKE, Ahmet. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 2, p. 1305–1313, 2011. ISSN 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.028>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410004309>.

BECHLER, M. *et al.* Efficient discovery of Internet gateways in future vehicular communication systems. *In: VEHICULAR Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual.* [S.l.: s.n.], abr. 2003. 965–969 vol.2. DOI: 10.1109/VETECS.2003.1207769.

BENSLIMANE, A. Localization in Vehicular Ad Hoc Networks. *In: SYSTEMS Communications, 2005. Proceedings.* [S.l.: s.n.], ago. 2005. p. 19–25. DOI: 10.1109/ICW.2005.54.

BERGENHEM, C. *et al.* Challenges of Platooning on Public Motorways. *In: 17TH World Congress on Intelligent Transport Systems.* [S.l.: s.n.], out. 2010.

BERNARDO, M. di; SALVI, A.; SANTINI, S. Distributed Consensus Strategy for Platooning of Vehicles in the Presence of Time-Varying Heterogeneous Communication Delays. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n. 1, p. 102–112, fev. 2015. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2014.2328439.

BERNARDO, M. di *et al.* Design, Analysis, and Experimental Validation of a Distributed Protocol for Platooning in the Presence of Time-Varying Heterogeneous Delays. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 24, n. 2, p. 413–427, mar. 2016. ISSN 1063-6536. DOI: 10.1109/TCST.2015.2437336.

BERNSEN, James; MANIVANNAN, D. Review: Unicast routing protocols for vehicular ad hoc networks: A critical comparison and classification. **Pervasive Mob. Comput.**, v. 5, n. 1, p. 1–18, fev. 2009. ISSN 1574-1192. DOI: 10.1016/j.pmcj.2008.09.001.

BÖHM, Annette; JONSSON, Magnus; UHLEMANN, Elisabeth. Co-existing Periodic Beacons and Hazard Warnings in IEEE 802.11P-based Platooning Applications. *In: PROCEEDING of the Tenth ACM International Workshop on Vehicular Inter-networking, Systems, and Applications.* Taipei, Taiwan: ACM, 2013. (VANET '13), p. 99–102. DOI: 10.1145/2482967.2482973. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2482967.2482973>.

CARLSON, R. C.; PAPAMICHAIL, I.; PAPAGEORGIOU, M. Local Feedback-Based Mainstream Traffic Flow Control on Motorways Using Variable Speed Limits. **IEEE**

Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 12, n. 4, p. 1261–1276, dez. 2011. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2011.2156792.

CHANG, Jo-Mei; MAXEMCHUK, N. F. Reliable broadcast protocols. **ACM Trans. Comput. Syst.**, ACM, New York, NY, USA, v. 2, n. 3, p. 251–273, ago. 1984. ISSN 0734-2071. DOI: 10.1145/989.357400. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/989.357400>.

CHANG, Y. H.; CHANG, C. W.; CHAN, W. C. Fuzzy sliding-mode consensus control for multi-agent systems. *In*: PROCEEDINGS of the 2011 American Control Conference. [S.l.: s.n.], jun. 2011. p. 1636–1641. DOI: 10.1109/ACC.2011.5991103.

CHATTERJEE, S.; SENETA, E. Towards consensus: some convergence theorems on repeated averaging. **Journal of Applied Probability**, Cambridge University Press, v. 14, n. 1, p. 89–97, 1977. DOI: 10.2307/3213262.

CHEBOTAREV, P. Comments on "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems". **Proceedings of the IEEE**, v. 98, n. 7, p. 1353–1354, jul. 2010. ISSN 0018-9219. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2049911.

CHEN, Chao; JIA, Zhanfeng; VARAIYA, P. Causes and cures of highway congestion. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 21, n. 6, p. 26–32, dez. 2001. ISSN 1066-033X. DOI: 10.1109/37.969132.

CHEN, Yen-Da; SHIH, Yi-Ping; SHIH, Kuei-Ping. An emergency message dissemination protocol using N-way search with power control for VANETs. *In*: COMMUNICATIONS (ICC), 2015 IEEE International Conference on. [S.l.: s.n.], jun. 2015. p. 3653–3658.

CHISALITA, L.; SHAHMEHRI, N. A peer-to-peer approach to vehicular communication for the support of traffic safety applications. *In*: INTELLIGENT Transportation Systems, 2002. Proceedings. The IEEE 5th International Conference on. [S.l.: s.n.], jun. 2002. p. 336–341. DOI: 10.1109/ITSC.2002.1041239.

CHITRA, M.; SATHYA, S. Siva. Bidirectional Data Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks Using Epidemic Spreading Model. *In*: PROCEEDINGS of the International Conference on Informatics and Analytics. Pondicherry, India: ACM, 2016. (ICIA-16), 57:1–57:8. DOI: 10.1145/2980258.2980382. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2980258.2980382>.

CNI. RETRATOS DA SOCIEDADE BRASILEIRA - Mobilidade urbana. **Indicadores CNI**, v. 5, n. 27, set. 2015. ISSN 2317-7012.

CONSORTIUM, Crash Avoidance Metrics Partnership. Vehicle Safety Communications. **Vehicle Safety Communications Project: Task 3 Final Report: Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC**. [S.l.]: National Highway Traffic Safety

Administration, Office of Research e Development, Washington, D.C., 2005. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=BwmMNwAACAAJ>.

CRUZ, E.P.F. *et al.* Performance analysis of XOR-based routing in urban vehicular ad hoc networks. *In: WIRELESS Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*. [S.l.: s.n.], abr. 2012. p. 2521–2525. DOI: 10.1109/WCNC.2012.6214223.

DELIS, A. I.; NIKOLOS, I. K.; PAPAGEORGIOU, M. Simulation of the penetration rate effects of ACC and CACC on macroscopic traffic dynamics. *In: 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. [S.l.: s.n.], nov. 2016. p. 336–341. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795576.

DEY, K. C. *et al.* A Review of Communication, Driver Characteristics, and Controls Aspects of Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC). **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 2, p. 491–509, fev. 2016. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2015.2483063.

DIETZEL, S. *et al.* In-Network Aggregation for Vehicular Ad Hoc Networks. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, v. 16, n. 4, p. 1909–1932, abr. 2014. ISSN 1553-877X.

DJOUADI, S. *et al.* Optimal Distributed Control of Spatially Invariant Time Varying Linear Systems. *In: 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. [S.l.: s.n.], dez. 2018. p. 2920–2925. DOI: 10.1109/CDC.2018.8618865.

DOTZER, F.; FISCHER, L.; MAGIERA, P. VARS: a vehicle ad-hoc network reputation system. *In: WORLD of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM 2005. Sixth IEEE International Symposium on a*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 454–456. DOI: 10.1109/WOWMOM.2005.109.

DRESSLER, F. *et al.* Requirements and objectives for secure Traffic Information Systems. *In: MOBILE Ad Hoc and Sensor Systems, 2008. MASS 2008. 5th IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], out. 2008. p. 808–814. DOI: 10.1109/MAHSS.2008.4660135.

DURRESI, M.; DURRESI, A.; BAROLLI, L. Emergency Broadcast Protocol for Inter-Vehicle Communications. *In: PARALLEL and Distributed Systems, 2005. Proceedings. 11th International Conference on*. [S.l.: s.n.], jul. 2005. p. 402–406. DOI: 10.1109/ICPADS.2005.147.

E. ANAGNOSTOPOULOS, C. n. Intelligent Transportation Systems: Smart and Green Infrastructure Design (Ghosh, S. and Lee. T.S.; 2010) [Book Review]. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 3, n. 1, p. 42–46, abr. 2011. ISSN 1939-1390. DOI: 10.1109/MITS.2011.940476.

ECKHOFF, David; SOMMER, Christoph; DRESSLER, Falko. On the Necessity of Accurate IEEE 802.11p Models for IVC Protocol Simulation. *In: 75TH IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*. Yokohama, Japan: IEEE, maio 2012. p. 1–5.

EESC. Intelligent transport systems in action: Action plan and legal framework for the deployment of intelligent transport systems (ITS) in Europe. **MOBILITY AND TRANSPORT**, jul. 2011.

EESC. Roadmap to a single European transport area – Progress and challenges. **Official Journal**, abr. 2015. ISSN 1977-091X.

EKSIN, Ceyhun *et al.* Chapter 7 - Game Theoretic Learning. *In: DJURIĆ, Petar M.; RICHARD, Cédric (Ed.). Cooperative and Graph Signal Processing*. [S.l.]: Academic Press, 2018. p. 209–235. ISBN 978-0-12-813677-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813677-5.00007-9>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128136775000079>.

ELEFTERIADOU, L. **An Introduction to Traffic Flow Theory**. [S.l.]: Springer New York, 2013. (Springer Optimization and Its Applications). ISBN 9781461484356. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=VOK5BAAAQBAJ>.

ERCAN, Z.; GOKASAN, M.; BORRELLI, F. An adaptive and predictive controller design for lateral control of an autonomous vehicle. *In: 2017 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*. [S.l.: s.n.], jun. 2017. p. 13–18. DOI: 10.1109/ICVES.2017.7991894.

ETSI. **Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service**. [S.l.]: ETSI, 2013. ETSI TS 102 637-2 V1.2.1.

ETSI. **Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service**. [S.l.], set. 2014.

FAEZOPOUR, Miad *et al.* Progress and Challenges in Intelligent Vehicle Area Networks. **Communications of the ACM**, ACM, New York, NY, USA, v. 55, n. 2, p. 90–100, fev. 2012. ISSN 0001-0782.

FAN, Li; YU, Wang. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. **Vehicular Technology Magazine, IEEE**, v. 2, n. 2, p. 12–22, jun. 2007. ISSN 1556-6072. DOI: 10.1109/MVT.2007.912927.

FARZAMNIA, A. *et al.* Channel estimation for sparse channel OFDM systems using least square and minimum mean square error techniques. *In: 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*. [S.l.: s.n.], ago. 2017. p. 1–5. DOI: 10.1109/ICEngTechnol.2017.8308193.

FENG, Shuo *et al.* String stability for vehicular platoon control: Definitions and analysis methods. **Annual Reviews in Control**, v. 47, p. 81–97, 2019. ISSN 1367-5788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.03.001>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578819300240>.

FENTON, R. E. Automated highway system technology. *In: 30TH IEEE Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], set. 1980. p. 457–460. DOI: 10.1109/VTC.1980.1622851.

FERMI, A. *et al.* Identification of safety regions in vehicle platooning via machine learning. *In: 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.

FERNANDES, P.; NUNES, U. Platooning of autonomous vehicles with intervehicle communications in SUMO traffic simulator. *In: 13TH International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. [S.l.: s.n.], set. 2010. p. 1313–1318. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625277.

FERNANDES, P.; NUNES, U. Platooning With IVC-Enabled Autonomous Vehicles: Strategies to Mitigate Communication Delays, Improve Safety and Traffic Flow. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 13, n. 1, p. 91–106, mar. 2012. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2011.2179936.

FRAGOULI, C.; SOLJANIN, E. Network Coding Fundamentals. Foundations and Trends. **Networking**, Now Publishers Inc, 2007.

GALAVIZ-MOSQUEDA, Alejandro *et al.* Reliable Multihop Broadcast Protocol with a Low-Overhead Link Quality Assessment for ITS Based on VANETs in Highway Scenarios. *In: THESCIENTIFICWORLDJOURNAL*. [S.l.: s.n.], 2014.

GALLER, B. A.; ASHER, H. Vehicle-to-vehicle communication for collision avoidance and improved traffic flow. *In: TRANSP. Res. Board*. [S.l.: s.n.], maio 1995.

GAO, W. *et al.* Cooperative optimal output regulation of multi-agent systems using adaptive dynamic programming. *In: 2017 American Control Conference (ACC)*. [S.l.: s.n.], maio 2017. p. 2674–2679. DOI: 10.23919/ACC.2017.7963356.

GHASEMI, A.; KAZEMI, R. Stable Decentralized Control of a Platoon of Vehicles With Heterogeneous Information Feedback. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 62, n. 9, p. 4299–4308, nov. 2013. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2013.2253500.

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

GOLUB, G. H.; LOAN, C. F. Van. **Matrix computations**. [S.l.]: Baltimore, MD, USA: The Johns Hopkins Univ. Press, 2012. v. 3.

GUO, G.; YUE, W. Autonomous Platoon Control Allowing Range-Limited Sensors. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 61, n. 7, p. 2901–2912, set. 2012. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2012.2203362.

GUPTA, R. A.; CHOW, M. Networked Control System: Overview and Research Trends. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 7, p. 2527–2535, jul. 2010. ISSN 1557-9948. DOI: 10.1109/TIE.2009.2035462.

HAFNER, M. R. *et al.* Cooperative Collision Avoidance at Intersections: Algorithms and Experiments. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 3, p. 1162–1175, set. 2013. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2013.2252901.

HALLÉ, Simon; CHAIB-DRAA, Brahim. A collaborative driving system based on multi-agent modelling and simulations. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 13, n. 4, p. 320–345, 2005. Agents in Traffic and Transportation: Exploring Autonomy in Logistics, Management, Simulation, and Cooperative Driving. ISSN 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2005.07.004>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X05000343>.

HAO, He; BAROOAH, Prabir. Stability and robustness of large platoons of vehicles with double-integrator models and nearest neighbor interaction. **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, v. 23, n. 18, p. 2097–2122, 2013. ISSN 1099-1239. DOI: 10.1002/rnc.2872. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/rnc.2872>.

HARRI, J.; FILALI, F.; BONNET, C. Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, v. 11, n. 4, p. 19–41, abr. 2009. ISSN 1553-877X. DOI: 10.1109/SURV.2009.090403.

HARTENSTEIN, H.; LABERTEAUX, K. **Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies**. United Kingdom: Ed. Wiley, 2010. p. 466. ISBN 978-0-470-74056-9.

HERMAN, I. *et al.* Nonzero Bound on Fiedler Eigenvalue Causes Exponential Growth of H-Infinity Norm of Vehicular Platoon. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 60, n. 8, p. 2248–2253, ago. 2015. ISSN 0018-9286. DOI: 10.1109/TAC.2014.2366980.

HICKS, D. J. The Safety of Autonomous Vehicles: Lessons from Philosophy of Science. **IEEE Technology and Society Magazine**, v. 37, n. 1, p. 62–69, mar. 2018. ISSN 0278-0097. DOI: 10.1109/MTS.2018.2795123.

HO, C. *et al.* Optimized Base Station Allocation for Platooning Vehicles Underway by Using Deep Learning Algorithm Based on 5G-V2X. *In: 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–2.

HOUGHIN, A. *et al.* Measurement and Analysis of Heterogenous Vehicle Following Behavior on Urban Freeways: Time Headways and Standstill Distances. *In: 2015 IEEE*

- 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. [S.l.: s.n.], set. 2015. p. 888–893. DOI: 10.1109/ITSC.2015.149.
- HU, H. *et al.* REPLACE: A Reliable Trust-Based Platoon Service Recommendation Scheme in VANET. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 66, n. 2, p. 1786–1797, fev. 2017. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2016.2565001.
- HU, Y.; FENG, J.; CHEN, W. A LTE-Cellular-Based V2X Solution to Future Vehicular Network. *In*: 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). [S.l.: s.n.], 2018. p. 2658–2662.
- HUANG, C. L. *et al.* Adaptive intervehicle communication control for cooperative safety systems. **IEEE Network**, v. 24, n. 1, p. 6–13, jan. 2010. ISSN 0890-8044.
- HUANG, H. *et al.* Nonlinear moving horizon control for following vehicles in truck platooning. *In*: 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). [S.l.: s.n.], jun. 2018. p. 1732–1737. DOI: 10.1109/CCDC.2018.8407407.
- HUANG, J. *et al.* Toward Robust Vehicle Platooning With Bounded Spacing Error. **IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems**, v. 36, n. 4, p. 562–572, abr. 2017. ISSN 0278-0070. DOI: 10.1109/TCAD.2016.2570431.
- IEEE. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**. [S.l.]: IEEE, 2009. Disponível em: <http://sites.ieee.org/itss/>.
- IPEA. Estimativa dos Custos dos Acidentes de Trânsito no Brasil com Base na Atualização Simplificada das Pesquisas Anteriores do Ipea. **Relatório de Pesquisa**, jul. 2015.
- JAKUBIAK, J.; KOUCHERYAVY, Y. State of the Art and Research Challenges for VANETs. *In*: CONSUMER Communications and Networking Conference, 2008. CCNC 2008. 5th IEEE. [S.l.: s.n.], jan. 2008. p. 912–916. DOI: 10.1109/ccnc08.2007.212.
- JIA, D. *et al.* A Survey on Platoon-Based Vehicular Cyber-Physical Systems. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 18, n. 1, p. 263–284, abr. 2016. ISSN 1553-877X. DOI: 10.1109/COMST.2015.2410831.
- JING, Zhao; GUOHONG, Cao. VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, v. 57, n. 3, p. 1910–1922, maio 2008. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2007.901869.
- JOERER, S. *et al.* A Vehicular Networking Perspective on Estimating Vehicle Collision Probability at Intersections. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 63, n. 4, p. 1802–1812, maio 2014. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2013.2287343.

JOOTEL, P. S. SAfe Road TRains for the Environment. **SARTRE Project, Final Project Report**, out. 2012.

KAIXIN, Xu; GERLA, M. A heterogeneous routing protocol based on a new stable clustering scheme. *In: MILCOM 2002. Proceedings.* [S.l.: s.n.], out. 2002. 838–843 vol.2. DOI: 10.1109/MILCOM.2002.1179583.

KARAGIANNIS, G. *et al.* Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 13, n. 4, p. 584–616, abr. 2011. ISSN 1553-877X.

KHATIR, M. E.; DAVISON, E. J. Decentralized control of a large platoon of vehicles using non-identical controllers. *In: PROCEEDINGS of the 2004 American Control Conference.* [S.l.: s.n.], jun. 2004. 2769–2776 vol.3.

KHEIRANDISH, F.; EKRAMIAN, M.; ATAEI, M. Stability analysis of networked control systems with time varying delays. *In: 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE).* [S.l.: s.n.], maio 2017. p. 633–638. DOI: 10.1109/IranianCEE.2017.7985116.

KITCHENHAM, Barbara; CHARTERS, Stuart. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering.** [S.l.], 2007. Disponível em: <http://www.dur.ac.uk/ebse/resources/Systematic-reviews-5-8.pdf>.

KOSCH, T. Local danger warning based on vehicle ad-hoc networks: Prototype and simulation. *In: PROCEEDINGS of 1st International Workshop on Intelligent Transportation (WIT),2004.* [S.l.: s.n.], 2004.

KOUBEK, M.; REA, S.; PESCH, D. Reliable Broadcasting for Active Safety Applications in Vehicular Highway Networks. *In: VEHICULAR Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st.* [S.l.: s.n.], maio 2010. p. 1–5. DOI: 10.1109/VETECS.2010.5494194.

KRAUSS, Stefan. **Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics.** 1998. Tese (Doutorado).

LE, Long *et al.* Performance Evaluation of Beacon Congestion Control Algorithms for VANETs. *In: GLOBAL Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), IEEE.* [S.l.: s.n.], dez. 2011. p. 1–6.

LEI, C. *et al.* Impact of packet loss on CACC string stability performance. *In: 2011 11th International Conference on ITS Telecommunications.* [S.l.: s.n.], ago. 2011. p. 381–386. DOI: 10.1109/ITST.2011.6060086.

LEI, C. *et al.* **Impact of packet loss on CACC string stability performance.** [S.l.: s.n.], 2011. DOI: 10.1109/ITST.2011.6060086.

LEITH, Douglas; LEITHEAD, W.E. Survey of gain-scheduling analysis and design. **Int. J. Control**, v. 73, p. 1001–1025, jan. 2000. DOI: 10.1080/002071700411304.

LI, F.; ZHANG, Y.; CHEN, Y. Convergence analysis of leader-follower consensus Kalman filtering in sensor networks. *In*: 2017 13th IEEE International Conference on Control Automation (ICCA). [S.l.: s.n.], jul. 2017. p. 970–975. DOI: 10.1109/ICCA.2017.8003192.

LI, J. *et al.* Media Access Process Modeling of LTE-V-Direct Communication Based on Markov Chain. *In*: 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). [S.l.: s.n.], 2018. p. 61–66.

LI, Li; CHEN, Xiqun. Vehicle headway modeling and its inferences in macroscopic/microscopic traffic flow theory: A survey. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 76, p. 170–188, 2017. ISSN 0968-090X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.007>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X17300141>.

LI, S. E. *et al.* An overview of vehicular platoon control under the four-component framework. *In*: 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). [S.l.: s.n.], jun. 2015. p. 286–291. DOI: 10.1109/IVS.2015.7225700.

LIANG, L. *et al.* Vehicular Communications: A Physical Layer Perspective. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 66, n. 12, p. 10647–10659, 2017.

LIDSTROM, K. *et al.* A Modular CACC System Integration and Design. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 13, n. 3, p. 1050–1061, set. 2012. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2012.2204877.

LIU, K.; JI, Z.; REN, W. Necessary and Sufficient Conditions for Consensus of Second-Order Multiagent Systems Under Directed Topologies Without Global Gain Dependency. **IEEE Transactions on Cybernetics**, v. 47, n. 8, p. 2089–2098, ago. 2017. ISSN 2168-2267. DOI: 10.1109/TCYB.2016.2616020.

LIU, Xiangheng *et al.* Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons. *In*: ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585). [S.l.: s.n.], mar. 2001. p. 625–630. DOI: 10.1109/ITSC.2001.948732.

LU, N. *et al.* Connected Vehicles: Solutions and Challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 4, p. 289–299, 2014.

LU, X.; SHLADOVER, S. Integrated ACC and CACC development for Heavy-Duty Truck partial automation. *In*: 2017 American Control Conference (ACC). [S.l.: s.n.], maio 2017. p. 4938–4945. DOI: 10.23919/ACC.2017.7963720.

LU, Xiao-Yun; HEDRICK, J. K.; DREW, M. ACC/CACC-control design, stability and robust performance. *In*: PROCEEDINGS of the 2002 American Control Conference

(IEEE Cat. No.CH37301). [S.l.: s.n.], maio 2002. 4327–4332 vol.6. DOI: 10.1109/ACC.2002.1025325.

LV, C. *et al.* Analysis of autopilot disengagements occurring during autonomous vehicle testing. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, v. 5, n. 1, p. 58–68, jan. 2018. ISSN 2329-9266. DOI: 10.1109/JAS.2017.7510745.

LYAMIN, N. *et al.* Cooperative Awareness in VANETs: On ETSI EN 302 637-2 Performance. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 67, n. 1, p. 17–28, jan. 2018. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2017.2754584.

MARZOUK, F. *et al.* Enhanced Reachability and Low Latency DENM Dissemination Protocol for Platoon Based VANETs. *In: 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], dez. 2018. p. 1–7. DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647647.

MCAREE, O.; VERES, S. M. Lateral control of vehicle platoons with on-board sensing and inter-vehicle communication. *In: 2016 European Control Conference (ECC)*. [S.l.: s.n.], jun. 2016. p. 2465–2470. DOI: 10.1109/ECC.2016.7810660.

MILANÉS, V. *et al.* Cooperative Adaptive Cruise Control in Real Traffic Situations. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 15, n. 1, p. 296–305, fev. 2014. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2013.2278494.

MITROPOULOS, G.K. *et al.* Wireless Local Danger Warning: Cooperative Foresighted Driving Using Intervehicle Communication. **Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on**, v. 11, n. 3, p. 539–553, set. 2010. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2009.2034839.

MOHSENI, F. *et al.* Fuel and comfort efficient cooperative control for autonomous vehicles. *In: 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. [S.l.: s.n.], jun. 2017. p. 1631–1636. DOI: 10.1109/IVS.2017.7995943.

MONGELLI, M.; MUSELLI, M.; FERRARI, E. Achieving Zero Collision Probability in Vehicle Platooning under Cyber Attacks via Machine Learning. *In: 2019 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 41–45.

MORBIDI, Fabio. The deformed consensus protocol. **Automatica**, v. 49, n. 10, p. 3049–3055, 2013. ISSN 0005-1098. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2013.07.006>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109813003543>.

NA NAKORN, K.; ROJVIBOONCHAI, K. Comparison of reliable broadcasting protocols for vehicular ad-hoc networks. *In: COMMUNICATION Technology (ICCT), 2010 12th IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], nov. 2010. p. 1168–1171. DOI: 10.1109/ICCT.2010.5689136.

- NAUMOV, V.; GROSS, T.R. Connectivity-Aware Routing (CAR) in Vehicular Ad-hoc Networks. *In: INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE. [S.l.: s.n.], maio 2007. p. 1919–1927. DOI: 10.1109/INFCOM.2007.223.
- NAUS, G. J. L. *et al.* String-Stable CACC Design and Experimental Validation: A Frequency-Domain Approach. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 59, n. 9, p. 4268–4279, nov. 2010. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2010.2076320.
- NI, Sze-Yao *et al.* The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *In: PROCEEDINGS of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. Seattle, Washington, United States: ACM, 1999. (MobiCom '99), p. 151–162. DOI: 10.1145/313451.313525. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/313451.313525>.
- NUNEN, E. *et al.* String Stable Model Predictive Cooperative Adaptive Cruise Control for Heterogeneous Platoons. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, v. 4, n. 2, p. 186–196, jun. 2019. ISSN 2379-8904. DOI: 10.1109/TIV.2019.2904418.
- OHTA, T.; INOUE, S.; KAKUDA, Y. An adaptive multihop clustering scheme for highly mobile ad hoc networks. *In: AUTONOMOUS Decentralized Systems, 2003. ISADS 2003. The Sixth International Symposium on*. [S.l.: s.n.], abr. 2003. p. 293–300. DOI: 10.1109/ISADS.2003.1193960.
- OLIVEIRA, R. R.; WANGHAM, M. S. Desenvolvimento de uma aplicação distribuída utilizando redes veiculares para sinalizar problemas em rodovias. *In: COMPUTER on the Beach, 2011. COTB 2011*. [S.l.: s.n.], maio 2011. p. 159–168.
- OLIVEIRA, R.; MONTEZ, C.; WANGHAM, M. S. Protocolo Adaptativo de Disseminação de Dados para Aplicações de Segurança no Trânsito em Rodovias. *In: XIX Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS). In XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Florianópolis, Brasil: [s.n.], dez. 2014.
- OLIVEIRA, R. *et al.* Reliable data dissemination protocol for VANET traffic safety applications. **Ad Hoc Networks**, v. 63, p. 30–44, 2017. ISSN 1570-8705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.05.002>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870517300835>.
- OLIVEIRA, R. *et al.* Towards the Use of XOR-Based Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks. *In: VEHICULAR Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*. [S.l.: s.n.], maio 2011. p. 1–6. DOI: 10.1109/VETECS.2011.5956193.
- ÖNCÜ, S. *et al.* Cooperative Adaptive Cruise Control: Network-Aware Analysis of String Stability. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 15, n. 4, p. 1527–1537, ago. 2014. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2014.2302816.

OSTERMAIER, Benedikt; DOTZER, Florian; STRASSBERGER, Markus. Enhancing the Security of Local DangerWarnings in VANETs - A Simulative Analysis of Voting Schemes. *In: PROCEEDINGS of the The Second International Conference on Availability, Reliability and Security*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007. (ARES '07), p. 422–431. DOI: 10.1109/ARES.2007.79. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ARES.2007.79>.

PANICHPAPIBOON, S.; PATTARA-ATIKOM, W. A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, v. 14, n. 3, p. 784–798, mar. 2012. ISSN 1553-877X.

PAPADIMITRATOS, Panos *et al.* Vehicular communication systems: Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 47, n. 11, p. 84–95, 2009.

PARKA, B.; MALAKORN, K.; LEE, J. Quantifying Benefits of Cooperative Adaptive Cruise Control Toward Sustainable Transportation System. *In: CENTER Transp. Stud., Univ. Virginia, Charlottesville, VA, USA*. [S.l.: s.n.], 2011.

PETERS, Andrés A.; MIDDLETON, Richard H.; MASON, Oliver. Leader tracking in homogeneous vehicle platoons with broadcast delays. **Automatica**, v. 50, n. 1, p. 64–74, 2014. ISSN 0005-1098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.09.034>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109813004676>.

PLOEG, Jeroen; SERRARENS, Alex F. A.; HEIJENK, Geert J. Connect & Drive: design and evaluation of cooperative adaptive cruise control for congestion reduction. **Journal of Modern Transportation**, v. 19, n. 3, p. 207–213, set. 2011. ISSN 2196-0577. DOI: 10.1007/BF03325760. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03325760>.

PLOEG, J. *et al.* Design and experimental evaluation of cooperative adaptive cruise control. *In: 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. [S.l.: s.n.], out. 2011. p. 260–265. DOI: 10.1109/ITSC.2011.6082981.

PLÖGER, D.; KRÜGER, L.; TIMM-GIEL, A. Analysis of Communication Demands of Networked Control Systems for Autonomous Platooning. *In: 2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)*. [S.l.: s.n.], jun. 2018. p. 14–19. DOI: 10.1109/WoWMoM.2018.8449782.

PUNZO, V.; CIUFFO, B. Integration of Driving and Traffic Simulation: Issues and First Solutions. **Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on**, v. 12, n. 2, p. 354–363, jun. 2011. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2010.2095846.

QIN, W. B.; GOMEZ, M. M.; OROSZ, G. Stability analysis of connected cruise control with stochastic delays. *In: 2014 American Control Conference*. [S.l.: s.n.], jun. 2014. p. 4624–4629. DOI: 10.1109/ACC.2014.6859490.

RAJAMANI, R. **Vehicle Dynamics and Control**. [S.l.]: Springer US, 2011. (Mechanical Engineering Series). ISBN 9781461414339. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=cZJFDox4KuUC>.

RAJAMANI, Rajesh. Longitudinal Control for Vehicle Platoons. *In: VEHICLE Dynamics and Control*. Boston, MA: Springer US, 2012. p. 171–200. ISBN 978-1-4614-1433-9. DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9_7. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9_7.

RAJAMANI, R. *et al.* **Demonstration of Integrated Longitudinal and Lateral Control for the Operation of Automated Vehicles in Platoons**. [S.l.: s.n.], 2000. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=mf2ZngEACAAJ>.

RAYA, Maxim; HUBAUX, Jean-Pierre. The security of vehicular ad hoc networks. *In: PROCEEDINGS of the 3rd ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks*. Alexandria, VA, USA: ACM, 2005. (SASN '05), p. 11–21. DOI: 10.1145/1102219.1102223. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1102219.1102223>.

REN, Wei; BEARD, Randal W. **Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control: Theory and Applications**. 1. ed. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2007.

REUMERMAN, H.J.; ROGGERO, M.; RUFFINI, M. The application-based clustering concept and requirements for intervehicle networks. **Communications Magazine, IEEE**, v. 43, n. 4, p. 108–113, abr. 2005. ISSN 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2005.1421913.

REZAEI, H.; ABDOLLAHI, F. Stationary Consensus Control of a Class of High-Order Uncertain Nonlinear Agents With Communication Delays. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, PP, n. 99, p. 1–6, abr. 2017. ISSN 2168-2216. DOI: 10.1109/TSMC.2017.2703146.

SABER, R. O.; MURRAY, R. M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 49, n. 9, p. 1520–1533, set. 2004. ISSN 0018-9286. DOI: 10.1109/TAC.2004.834113.

SANTHANAKRISHNAN, K.; RAJAMANI, R. On spacing policies for highway vehicle automation. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 4, n. 4, p. 198–204, dez. 2003. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2003.821341.

SANTINI, S. *et al.* A consensus-based approach for platooning with inter-vehicular communications. *In: 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. [S.l.: s.n.], abr. 2015. p. 1158–1166. DOI: 10.1109/INFOCOM.2015.7218490.

SANTINI, S. *et al.* A Consensus-Based Approach for Platooning with Intervehicular Communications and Its Validation in Realistic Scenarios. **IEEE Transactions on**

Vehicular Technology, v. 66, n. 3, p. 1985–1999, mar. 2017. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2016.2585018.

SCHAEUFELE, B. *et al.* 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.: s.n.], out. 2017. p. 1–6. DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317842.

SCHRANK, D. *et al.* 2015 Urban Mobility Scorecard. **Official Journal**, ago. 2015. ISSN 1977-091X.

SCHWARTZ, Ramon S. *et al.* Exploiting Beacons for Scalable Broadcast Data Dissemination in VANETs. *In: PROCEEDINGS of the Ninth ACM International Workshop on Vehicular Inter-networking, Systems, and Applications*. Low Wood Bay, Lake District, UK: ACM, 2012. (VANET '12), p. 53–62.

SEGATA, M.; DRESSLER, F.; CIGNO, R. Lo. Jerk Beaconing: A dynamic approach to platooning. *In: 2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. [S.l.: s.n.], dez. 2015. p. 135–142. DOI: 10.1109/VNC.2015.7385560.

SEGATA, Michele. **Safe and Efficient Communication Protocols for Platooning Control**. 2016. Tese (Doutorado) – University of Trento.

SEGATA, Michele *et al.* PLEXE: A Platooning Extension for Veins. *In: 6TH IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2014)*. Paderborn, Germany: IEEE, dez. 2014. p. 53–60. DOI: 10.1109/VNC.2014.7013309.

SEGATA, Michele *et al.* Towards Inter-Vehicle Communication Strategies for Platooning Support. *In:*

SEPULCRE, M. *et al.* Adaptive beaconing for congestion and awareness control in vehicular networks. *In: 2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. [S.l.: s.n.], dez. 2014. p. 81–88. DOI: 10.1109/VNC.2014.7013313.

SHEIKHOESLAM, S.; DESOER, C. A. Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information: a system level study. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 42, n. 4, p. 546–554, nov. 1993. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/25.260756.

SHI, P.; DONG, Y.; SU, Y. Multi-agent rendezvous with nonlinear leader. *In: 2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. [S.l.: s.n.], out. 2017. p. 2982–2986. DOI: 10.1109/CAC.2017.8243286.

SHLADOVER, S. E. PATH at 20 - History and Major Milestones. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 8, n. 4, p. 584–592, dez. 2007. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2007.903052.

SILVA, E.; MENEZES, E. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis, Brazil: Ed. Record, 2005. p. 428.

SOMMER, C.; DRESSLER, F. Progressing toward realistic mobility models in VANET simulations. **Communications Magazine, IEEE**, v. 46, n. 11, p. 132–137, nov. 2008. ISSN 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4689256.

SOMMER, Christoph; ECKHOFF, David; DRESSLER, Falko. IVC in Cities: Signal Attenuation by Buildings and How Parked Cars Can Improve the Situation. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, IEEE, v. 13, n. 8, p. 1733–1745, ago. 2014.

SOMMER, Christoph; GERMAN, Reinhard; DRESSLER, Falko. Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, IEEE, v. 10, n. 1, p. 3–15, jan. 2011.

SOMMER, C. *et al.* How Shadowing Hurts Vehicular Communications and How Dynamic Beaconing Can Help. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 14, n. 7, p. 1411–1421, jul. 2015. ISSN 1536-1233. DOI: 10.1109/TMC.2014.2362752.

SWAROOP, D.; HEDRICK, J. K. String stability of interconnected systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 41, n. 3, p. 349–357, mar. 1996. ISSN 0018-9286. DOI: 10.1109/9.486636.

SZALAI, Robert; OROSZ, Gabor. Decomposing the dynamics of heterogeneous delayed networks with applications to connected vehicle systems. v. 88, p. 040902, out. 2013.

SZCZUREK, P. *et al.* Estimating Relevance for the Emergency Electronic Brake Light Application. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 13, n. 4, p. 1638–1656, dez. 2012. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2012.2201257.

TAMPERE, C.; AREM, B. van. Traffic flow theory and its applications in automated vehicle control: a review. *In: INTELLIGENT Transportation Systems*, 2001. Proceedings. 2001 IEEE. [S.l.: s.n.], abr. 2001. p. 391–397. DOI: 10.1109/ITSC.2001.948689.

TIMO, Kosch. Local danger warning based on vehicle ad-hoc networks: Prototype and simulation. *In: PROCEEDINGS of 1st International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2004)*. [S.l.: s.n.], 2004.

TONG, W. *et al.* Artificial Intelligence for Vehicle-to-Everything: A Survey. **IEEE Access**, v. 7, p. 10823–10843, 2019.

- TORRENT-MORENO, M. *et al.* Vehicle-to-Vehicle Communication: Fair Transmit Power Control for Safety-Critical Information. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 58, n. 7, p. 3684–3703, set. 2009. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2009.2017545.
- TREIBER, M; HENNECKE, A; HELBING, D. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. **Phys. Rev. E**, v. 62, cond-mat/0002177, p. 1805–1824, 2000. Disponível em: <http://cds.cern.ch/record/426608>.
- TURAN, M. C.; HARTAVI, A. E.; ALTUĞ, E. Development of a rule based upper level control algorithm for a co-operative vehicle in automated highway system. *In*: 2012 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2012). [S.l.: s.n.], jul. 2012. p. 454–459. DOI: 10.1109/ICVES.2012.6294263.
- VARGA, A. The OMNeT++ discrete event simulation system, jun. 2013. Disponível em: <http://www.omnetpp.org>.
- WAI, Chen; SHENGWEI, Cai. Ad hoc peer-to-peer network architecture for vehicle safety communications. **Communications Magazine, IEEE**, v. 43, n. 4, p. 100–107, abr. 2005. ISSN 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2005.1421912.
- WANG, C.D.; THOMPSON, J.P. **Apparatus and method for motion detection and tracking of objects in a region for collision avoidance utilizing a real-time adaptive probabilistic neural network**. [S.l.]: Google Patents, mar. 1997. US Patent 5,613,039.
- WANG, Le Yi *et al.* Control of vehicle platoons for highway safety and efficient utility: Consensus with communications and vehicle dynamics. **Journal of Systems Science and Complexity**, v. 27, n. 4, p. 605–631, ago. 2014. ISSN 1559-7067. DOI: 10.1007/s11424-014-2115-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11424-014-2115-z>.
- WANG, Yunpeng *et al.* Throughput and Delay Limits of 802.11p and Its Influence on Highway Capacity. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 96, p. 2096–2104, nov. 2013. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.08.236.
- WEIL, T. Service Management for ITS Using WAVE (1609.3) Networking. *In*: GLOBE-COM Workshops, 2009 IEEE. [S.l.: s.n.], dez. 2009. p. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2009.5360714.
- WILLKE, T.L.; TIENRAKOOL, P.; MAXEMCHUK, N.F. A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, v. 11, n. 2, p. 3–20, abr. 2009. ISSN 1553-877X. DOI: 10.1109/SURV.2009.090202.
- XIAODONG, Lin *et al.* GSIS: A Secure and Privacy-Preserving Protocol for Vehicular Communications. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, v. 56, n. 6, p. 3442–3456, nov. 2007. ISSN 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2007.906878.

- XIONG, Z. *et al.* Numerical study of turbulent drag reduction over non-smooth surfaces of rotating-stationary disk system. *In: 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*. [S.l.: s.n.], ago. 2015. p. 1343–1348. DOI: 10.1109/FPM.2015.7337330.
- XU, Qing; SENGUPTA, R. Simulation, analysis, and comparison of ACC and CACC in highway merging control. *In: IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings (Cat. No.03TH8683)*. [S.l.: s.n.], jun. 2003. p. 237–242. DOI: 10.1109/IVS.2003.1212915.
- XU, Qing *et al.* Vehicle-to-vehicle safety messaging in DSRC. *In: PROCEEDINGS of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*. Philadelphia, PA, USA: ACM, 2004. (VANET '04), p. 19–28. DOI: 10.1145/1023875.1023879. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1023875.1023879>.
- YANG, C. *et al.* Fast consensus tracking of multi-agent systems with diverse communication delays. *In: PROCEEDINGS of the 32nd Chinese Control Conference*. [S.l.: s.n.], jul. 2013. p. 7105–7110.
- YE, H. *et al.* Machine Learning for Vehicular Networks: Recent Advances and Application Examples. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 13, n. 2, p. 94–101, 2018.
- YEUNG, R. W.; CAI, N. Network error correction, part I: Basic concepts and upper bounds. English. **Commun. in Inf. and Systems**, v. 6, n. 1, 19?36, 2006. ISSN 1018-4864. DOI: 10.1007/s11235-010-9400-5.
- YU, W. *et al.* Second-Order Consensus in Multiagent Systems via Distributed Sliding Mode Control. **IEEE Transactions on Cybernetics**, v. 47, n. 8, p. 1872–1881, ago. 2017. ISSN 2168-2267. DOI: 10.1109/TCYB.2016.2623901.
- ZEGERS, J. C. *et al.* Consensus-based bi-directional CACC for vehicular platooning. *In: 2016 American Control Conference (ACC)*. [S.l.: s.n.], jul. 2016. p. 2578–2584. DOI: 10.1109/ACC.2016.7525305.
- ZEMOURI, S.; DJAHEL, S.; MURPHY, J. Smart adaptation of beacons transmission rate and power for enhanced vehicular awareness in VANETs. *In: 17TH International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. [S.l.: s.n.], out. 2014. p. 739–746. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6957777.
- ZHANG, L.; OROSZ, G. Motif-Based Design for Connected Vehicle Systems in Presence of Heterogeneous Connectivity Structures and Time Delays. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 6, p. 1638–1651, jun. 2016. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2015.2509782.
- ZHANG, L.; VALAEE, S. Safety context-aware congestion control for vehicular broadcast networks. *In: 2014 IEEE 15th International Workshop on Signal Processing*

Advances in Wireless Communications (SPAWC). [S.l.: s.n.], jun. 2014. p. 399–403. DOI: 10.1109/SPAWC.2014.6941803.

ZHANG, Zhang *et al.* Dual XOR in the Air: A Network Coding Based Retransmission Scheme for Wireless Broadcasting. *In: COMMUNICATIONS (ICC), 2011 IEEE International Conference on.* [S.l.: s.n.], jun. 2011. p. 1–6. DOI: 10.1109/icc.2011.5963121.

ZHAO, Dongbin *et al.* Full-range adaptive cruise control based on supervised adaptive dynamic programming. **Neurocomputing**, v. 125, p. 57–67, 2014. Advances in Neural Network Research and Applications Advances in Bio-Inspired Computing: Techniques and Applications. ISSN 0925-2312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.09.034>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231213001422>.

ZHAO, Li; SUN, Jian. Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-following Behaviors Under Connected-vehicle Environment. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 96, p. 914–924, 2013. Intelligent and Integrated Sustainable Multimodal Transportation Systems Proceedings from the 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP2013). ISSN 1877-0428. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.105>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042813022313>.

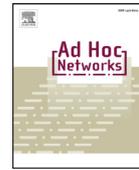
ZHENG, Y. *et al.* Influence of information flow topology on closed-loop stability of vehicle platoon with rigid formation. *In: 17TH International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).* [S.l.: s.n.], out. 2014. p. 2094–2100. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6958012.

ZHENG, Y. *et al.* Stability and Scalability of Homogeneous Vehicular Platoon: Study on the Influence of Information Flow Topologies. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 1, p. 14–26, jan. 2016. ISSN 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2015.2402153.

ZHU, S.; GOSWAMI, D.; LI, H. Evaluation Platform of Platoon Control Algorithms in Complex Communication Scenarios. *In: 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring).* [S.l.: s.n.], abr. 2019. p. 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2019.8746477.

ZHU, Y.; ZHAO, D.; ZHONG, Z. Adaptive Optimal Control of Heterogeneous CACC System With Uncertain Dynamics. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, PP, n. 99, p. 1–8, abr. 2018. ISSN 1063-6536. DOI: 10.1109/TCST.2018.2811376.

APÊNDICE A – ARTIGOS PUBLICADOS



Reliable data dissemination protocol for VANET traffic safety applications



Renê Oliveira^a, Carlos Montez^a, Azzedine Boukerche^b, Michelle S. Wangham^{b,c,*}

^a Department of Automation and Systems, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brazil

^b School of Electrical Engineering and Computer Science, University of Ottawa, ON, Canada

^c Center for Technological Earth and Sea Sciences, University of Vale do Itajaí, São José, SC, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 July 2016
Revised 28 December 2016
Accepted 12 May 2017
Available online 19 May 2017

Keywords:

VANET
Safety applications
Reliable data dissemination
Selective broadcast
Adaptive congestion control

ABSTRACT

In vehicular ad hoc networks (VANETs), cooperation between nodes is needed for proper performance of safety and traffic efficiency applications. A non-trivial scientific challenge in VANETs is the design of an adaptive broadcast protocol, which can provide efficient and end-to-end reliable warning messages dissemination. Usually, broadcast protocols for VANETs use beacon messages, disseminated among the vehicles, in order to get neighborhood information. When the vehicles are next to each other trying to broadcast at the same time, this may lead to frequent contention, and broadcast storms. On the other hand, in sparse density scenarios, vehicles have to face with failures in the message delivery. In this paper, we propose a novel protocol, Adaptive Data Dissemination Protocol (AddP), which aims at providing reliability to message dissemination in an efficient way. The protocol uses different mechanisms to dynamically adjust the beacon periodicity and to reduce the number of messages and beacons in the network. The effectiveness of our proposed protocol and the impacts of the use of the protocol by a VANET safety application were evaluated through experiments with network and traffic simulators.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The daily news shows accidents and traffic jams that could be avoided with the use of Intelligent Transportation Systems (ITS). Recent technological developments, notably in mobile computing, wireless communication, and remote sensing, are now accelerating ITSs towards a major leap forward in assisting driver safety [1,2]. Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) form the backbone of future intelligent transportation systems [2]. Vehicle-to-vehicle communications are becoming increasingly popular and have attracted the attention of the auto industry and academia [3–5]. VANETs have significant potential to enable diverse applications associated with traffic safety, traffic efficiency and infotainment [4,6].

Safety applications can decrease significantly the number of accidents [6,7]. Sixty percent of roadway collisions could be avoided if a driver was provided with a warning, at least, one-half second before a collision [8]. An envisaged scenario for these applications consists of vehicles acting as mobile routers for the purpose of sending, receiving, storing and forwarding hazard warning mes-

sages over the network informing the driver of the risk situations on the roads [9–12]. This sharing of information enables drivers to adapt their driving style, thus allowing them to avoid any hazards before they come into the drivers visual range [12].

Local Danger Warning (LDW) applications are an important example of VANET safety application, where a warning message is created for every detected hazard, informing the driver of its condition [9]. Each vehicle evaluates the content of the incoming alert message. When there is sufficient evidence of a hazard, such as the presence of an oil spill on the road, the vehicle driver will be alerted by some particular interface of a driver assistance system [7]. Vehicles, act as a relay, disseminating warning messages on the road, thus increasing the coverage range of these warnings [6,11].

In LDW applications, information dissemination protocol has to implement strategies that provide reliable communication and which do not disrupt communication [12,13]. Reliability refers to assuring that a broadcast message should be delivered to the highest possible number of intended receivers in an area of interest [14,15]. Besides that, safety message broadcasting is considered delay sensitive to overcome the complexity and constraints of driver reaction time for taking proper actions towards potential incidents ahead [16]. A broadcast message should be delivered to all vehicles as fast as possible [14]. However, the broadcasting mechanism in dense networks may lead to frequent contention and col-

* Corresponding author.

E-mail addresses: rene.oliveira@posgrad.ufsc.br (R. Oliveira), carlos.montez@ufsc.br (C. Montez), boukerche@site.uottawa.ca (A. Boukerche), wangham@univali.br, wangham@gmail.com (M.S. Wangham).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.05.002>

1570-8705/© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

lisions in transmission among neighboring vehicles [13,17]. This problem usually referred to as a broadcast storm problem [18]. On the other hand, in sparse scenarios, such as those found in highways at night, there may be not enough neighbors for the message to be disseminated [19].

In this paper, we are going to focus on the VANET safety applications. Given the requirements of these applications (i.e., sensitive delay and effective reliability), and the limitations of vehicular communications (i.e., variable network densities, short-lived connectivity links, and wireless medium characteristics), selective broadcast or multicast strategies seem more applicable than either unicast routing or “pure” flooding [13,15,20].

However, in the most general case, where reliable selective broadcast strategies to VANET safety applications must guarantee simultaneously real-time and reliability requirements, not enough progress has been made. This shortage may be due to the broadcast storm problem, in a dense network, frequent disconnection problem, in a sparse network, and wireless communication problems (hidden node problem).

In this paper, we propose a reliable multi-hop broadcasting protocol, called AddP – Adaptive Data Dissemination Protocol – that provides a candidate selection mechanism for message rebroadcast based on the local density and distance from neighboring nodes. AddP is a periodic beacon-based approach that uses an adaptive beacon congestion control algorithm to reduce the beacon load in high-density scenarios. The proposed protocol aims to maximize reliability and meet real-time constraints while keeping the overhead low (efficient data dissemination).

The most significant contributions of this paper can be itemized as follows:

- A *candidate selection mechanism* based on the local density and distance from neighboring nodes is proposed to determine which most appropriate nodes will relay a warning message in VANET safety applications.
- A reliable multi-hop broadcast protocol, called AddP, is proposed to disseminate hazard messages in VANETs. Using the proposed candidate selection mechanism, the AddP aims to reduce the number of redundant rebroadcast message and channel conflict. Moreover, to decrease the amount of warning messages retransmitted, AddP uses a *data aggregation mechanism* based on network coding theory to aggregate warning messages.
- To address the hidden node problem, and to increase the reliability of message dissemination, we proposed a *Disseminated Messages Monitoring Mechanism* to detect if a selected relay node did not rebroadcast a message. In this case, one of its neighbors should do it. Using this monitoring mechanism, Road Side Units (RSUs) can also check the last received message by a vehicle. If this vehicle does not have the last message, the RSU can relay this message.
- An *adaptive beacon congestion control mechanism* is proposed to adjust the time between beacon retransmissions based on the node density. This mechanism has the purpose of reducing the beacon load in high-density scenarios and then to address the broadcast storm problem.
- Finally, a set of simulations were designed, implemented and executed to evaluate the effectiveness and efficiency of AddP, by changing the network density, and comparing the proposed protocol with beaconless ETSI protocol and other beacon-assisted broadcast protocols. Simulation results demonstrate that the use of AddP mechanisms improves the performance of message dissemination.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2 summarizes a selection of reliable broadcast protocols as well as some pre-existing solutions for the broadcast storm problem in

VANETs. Then, a comprehensive description of the proposed reliable multi-hop broadcasting protocol (AddP) is presented in Section 3. Section 4 contains the simulation-based evaluation of proposed model considering different density network and comparing with the traditional broadcast approach and other protocols. Finally, Section 5 concludes the paper and introduces some future work.

2. Related work

The primary approach for data dissemination in ad hoc networks is through the use of flooding protocols in which, after receiving a message, a node rebroadcasts it immediately. This simple approach provides rapid data dissemination. However, it does not perform properly in dense or sparse networks. In high-density areas, there may be excessive packet collisions (broadcast storm problem) and it makes pure flooding not scalable with the network density [21]. On the other hand, in sparse scenarios, there may be not enough neighbors for the message to be disseminated [19]. To address these issues, several techniques and protocols have emerged, which try to provide high coverage, regardless of the network density, link failures, and different vehicle speeds. A common solution employed to solve the scalability and collision problems is reducing the number of redundant rebroadcast packets. This is typically done by selecting only some of the vehicles to relay the packet [13].

In this section, we briefly review the protocols which are directly related to our proposed solution. To select and to analyze the related work we consider protocols that are classified as Delay-Based Multi-hop Broadcasting as described in [13]. In this class of protocol, there are beaconless and beacon-assisted approaches. In this work, we have mainly focused on beacon-assisted protocols. In essence, these protocols differ in how the relays are selected, how to treat problems as hidden node and broadcast storm, and on which scenarios the protocol can be applied.

PGB [22] is not a reliable broadcasting protocol, but it is a possible solution to prevent broadcast storms and hidden node problems during the dissemination of messages. PGB addresses these problems by allowing only specific nodes to rebroadcast a message. The PGB algorithm makes receiver-based decisions to select relay nodes, and it classifies each node that receives a packet into one of the three groups based on the sensed signal level: PG (Preferred) group that is composed of pre-defined nodes, such as, ambulance, police vehicles, etc.; IN group composed of nodes with a signal stronger than PG nodes; and, OUT group composed of nodes with a signal weaker than PG nodes. Nodes from PG have the highest priority to be chosen as relays, then nodes from the OUT group, and finally from the IN group. PGB uses signal strength to calculate waiting-timeouts. Highest priority nodes will set shorter waiting-timeouts. Only nodes with the shortest timeouts will rebroadcast the message. One of the flaws of this protocol is that it lacks a mechanism to avoid message duplications. Another disadvantage is that, in low-density scenarios, the message rebroadcasting can be discontinued in case of a vehicle group is found to be empty (network partition).

The R-OB-VAN [23] is a reliable extension to OB-VAN [24] that introduces a mechanism to address the shadowing problem, which may be caused by vehicles like big trucks. One of the goals is to reduce the impact that may cause by delay on the performance of a receiver-oriented opportunistic broadcast algorithm. However, the lack of a beacon congestion control mechanism is a major drawback of this protocol. In dense areas, this characteristic may overload the network with excessive beacon messages. Moreover, R-OB-VAN may have higher delays in low-density scenarios.

In the POCA protocol [25] beacons are used to get neighbor's positions and velocities. When nodes want to disseminate a mes-

sage, they select the neighbors in preferred distances to rebroadcast the message. The preferred distance is based on the distance between nodes and the sender node. The selected node will rebroadcast the message immediately. In case the selected nodes do not rebroadcast the message, a timeout will be triggered and other nodes will do this task instead. The timer value is calculated at each node and depends on the distance, in a way that the node that is closest to the selected node will rebroadcast the message. POCA, like other approaches without beacon congestion control, also suffers from beacon overload in dense scenarios. This drawback causes losses and delays in warning dissemination.

DV-CAST protocol [26] incorporates mechanisms to deal with both the broadcast storm and the disconnected network problems. A neighbor detection mechanism estimates the local topology by tracking periodic beacons that are sent by the direct neighbors. DV-CAST applies two different approaches according to the network connectivity, and it uses the broadcast suppression technique to reduce the overhead in case of a dense network, while a store-carry and forward method is used in a sparse network. The network density level is determined based on the size of the neighbor list. Though this protocol seeks to reduce unnecessary retransmissions, it still suffers from the use of static intervals for sending beacons, regardless of the density.

In Adaptive Traffic Beaconing (ATB) protocol [27], the beacon interval is adapted dynamically according to the channel quality and message priority. The basic idea is to implement a network load control in order to address scalability issues of data dissemination in VANETs. The ATB is a pioneering approach to the issue of beacon control in VANETs, nevertheless, this protocol does not have mechanisms that address the problem of prioritizing messages, when vehicles try to transmit at the same time.

DECA [28] makes use of periodic beacons. This protocol relies only on density. A source node makes a decision by selecting its neighbor with the highest number of one-hop neighbor nodes. Upon receiving the packet, the selected node will immediately rebroadcast it to reduce delays. This method can maximize the number of neighbors who receive the message through a single transmission. According to the authors, the DECA protocol achieves its goal of providing reliability and efficiency in data transmission. However, it is worth mentioning that this protocol has a disadvantage of not having any beacon congestion control mechanism.

RB-GP [29] uses periodic beacons and has the goal of maximizing the coverage area and reducing the delivery delays of messages. In scenarios with low and medium density, the protocol ensures that the selected node can receive the packets successfully and thereby reduce redundant relays and channel contention. The results show that the RB-GP achieves high packet delivery ratio and has a lower delay. However, it suffers from an excess of periodic beacons in high-density scenarios. The authors make this problem clear and define it as an issue to be resolved in future work.

In RCDCS [30], a beacon rate control approach based on transmission power was proposed to achieve fairness among beacon messages and, simultaneously, reserve the channel resources for emergency messages. The proposed scheme for safety message dissemination consists of three important features: (i) a priority assignment to beacon messages according to the content type, (ii) collision detection, and (iii) transmission power control update based on the collision rate. The proposed method considerably improves the emergency messages reception ratio. However, there is a consequent increase in the delivery time and network overhead.

DOT [31] addresses the problem of scalability in dense networks in the presence of periodic beacons by proposing a time slot suppression scheme. To make the time slot assignment, the authors exploit the positioning information of one-hop neighbors to control the time slots density. The suppression of rebroadcasts

is done separately for each possible direction, trying to guarantee a proper dissemination to all directions and prevent situations where the dissemination is hindered due to an early broadcast suppression. It is worth noting that the broadcast storm problem is only mitigated, but not solved because vehicles that share a similar distance to the sender will be assigned to the same time slot and they may attempt to rebroadcast simultaneously. Another problem is due to the fact that this proposed scheme is receiver-oriented, and therefore the hidden terminal problem is inevitable.

U-HyDi [32] combines sender-based and receiver-based broadcast suppression techniques to tackle the broadcast storm problem under dense networks and employs store-carry-forward techniques for sparse networks. This approach uses just one-hop neighbor information, which is propagated through periodic beacon messages. As U-HyDi does not use a beacon control mechanism, the overhead in dense scenarios may be high.

ADDHV [33] is a protocol that seeks to provide a coverage and a low delay in the data dissemination. It uses regions of interest called “sweet spots” in which vehicles is more likely to rebroadcast received packets. Vehicles inside those regions are assigned with lower timers to disseminate a packet. Based on the propagation efficiency concept and the geographic localization of vehicles, the protocol decides whether the vehicle should disseminate a message or not. One of the flaws in this protocol is that it does not prevent the excessive appropriation of the communication channel by the vehicles inside the regions of interest.

The objective of PREDAT [34] is to provide a broadcast storm mitigation solution without using beacons. This approach also adopts the sweet spot concept. A circle-shaped communication area is divided into four quadrants. For each quadrant, one sub-area is defined as a sweet spot. PREDAT can achieve a high delivery ratio. However, due to the sweet spot geographic distribution, its transmission overhead is still high.

In BBBR [35], the authors proposed a multi-hop broadcasting protocol that uses network coding theory aiming to minimize the number of message transmissions. This mechanism obtains a significant decrease of data packet broadcasts and could also reduce the end-to-end delay in the communication. However, the usage of a single forwarder node to transmit bidirectional packets may induce additional delays, jeopardizing the delivery of emergency messages.

In CC-Degree [36], a message-centric strategy is proposed that uses a geographical information service to propagate messages within a defined geographical range. The message selection process is responsibility of the receivers. The message-centric strategy broadcasts the updated location every Δ_t . In some situations, this protocol may not be efficient, as the Δ_t value is fixed, regardless of the density of vehicles.

In DPS [37], at each hop dissemination, a relay node is selected to rebroadcast the message forward. To reduce the transmission delay and packet collisions, DPS uses both the neighborhood density and inter-vehicle distance information in this selection. The objective is to select the relay vehicle farthest from the sender. The information is exchanged through beacons, but there is no any beacon congestion control in this proposal.

Fast-OB-VAN [38] is an opportunistic protocol. The protocol aims to reduce the delay and to increase the percentage of vehicles that receives correctly the broadcasted packet. Distances are represented by a 10-bit sequence. Vehicles having the most significant bit in this sequence set to one may contend to transmit the packet. This method allows the packet transmission by the farthest candidate relay. Similarly to the protocol in [23], Fast-OB-VAN may also suffer from excessive overhead caused by broadcast storms.

The goal of the TURBO [39] protocol is to broadcast messages to a group of vehicles, within an area of interest, over diverse traffic conditions with low delay, low overhead and a high deliv-

Table 1
Comparison of related research (in chronological order).

Selected work	Rebroadcast decision	Candidate selection	Beacon congestion control	Warning message aggregation	Simulated scenarios
PGB [22]	Receiver	Distance and signal power	Yes	No	U, H
R-OB-VAN [23]	Receiver	Density	No	No	H
POCA [25]	Sender	Distance	No	No	U, H
DV-CAST [26]	Receiver	Direction	No	No	U, H
ATB [27]	Sender	Priority	Yes	No	U, H
DECA [28]	Sender	Density	No	No	U, H
RB-GP [29]	Sender	Distance and density	No	No	H
RCDCS [30]	Receiver	Distance	Yes	No	H
DOT [31]	Sender	Distance	Yes	No	H
U-HyDi [32]	Receiver	Distance	No	No	U
ADDHV [33]	Receiver	Distance and Propagation efficiency	No	No	H
PREDAT [34]	Receiver	Probability and position	No	No	U, H
BBBR [35]	Sender	Density, velocity and direction	No	Yes	U
CC-Degree [36]	Receiver	Density and position	No	No	U
DPS [37]	Sender	Density	No	No	U, H
Fast-OB-VAN [38]	Receiver	Distance	No	No	H
TURBO [39]	Receiver	Distance and density	No	No	U
Jerk Beaconing [[40]	Receiver	Timer-based	Yes	No	H
TBN [41]	Receiver	Timer-based	No	No	H
AddP	Sender	Distance and density	Yes	Yes	U, H

H: Highway, U: Urban.

ery ratio. This protocol employs two mechanisms: a store-carry-forward and a broadcast suppression mechanism. The store-carry-forward mechanism aims to improve the coverage in sparse networks, whereby each vehicle can carry the message for a determined time and retransmit it when intermittently connected network problems occur. In the broadcast suppression mechanism, specific vehicles inside the area of interest are selected to rebroadcast the messages. Despite being a beacon-oriented approach, it does not implement any beacon congestion control.

The jerk is a measure of the acceleration variation over time. By using this concept, the Jerk Beaconing [[40] was proposed as a beaconing strategy for platooning applications. The major idea is – through a continuous estimation of the vehicle jerk – a beaconing controller mechanism dynamically decides whether to send a new beacon or not. The obtained results showed that, associated with a transmit power control and a reliable delivery mechanism, the Jerk Beaconing improves the overall system safety and reduces the resources consumption when compared with a static beaconing approach.

Differently from the above-described beacon-assisted approaches, in [41], the authors present an analytical model to evaluate the performance of beaconless dissemination protocols in highways. They also implemented and assessed two beaconless protocols compliant with ETSI [42] standards: DBF (Distance-Based Forwarding) and TBN (Timer-Based Backbone Network) protocols. According to the authors, the use of a timer-based protocol is an effective alternative for the implementation of vehicular applications using beaconless approaches. In this sense, the TBN protocol has been chosen to be compared with the AddP in the Section 4 of this paper.

Table 1 presents a comparison of reliable protocols, considering the following characteristics: (1) rebroadcast decision; (2) method used to select the relay node at each hop; (3) usage of beacon congestion control mechanisms; (4) usage of warning message aggregation

mechanisms to mitigate the broadcast storm; (5) and which scenarios were simulated.

Nineteen works were analyzed and compared to AddP protocol, of those, only one being beaconless approach. Considering the rebroadcast decision, these protocols can be classified either as sender or receiver oriented, and AddP protocol is considered as sender oriented. All protocols use a candidate selection mechanism, nevertheless, they select the relay node differently. In our protocol, the metrics used are density and distance. Only three related works propose a beacon congestion control to address the broadcast storm problem. Only one protocol use data aggregation to improve the performance of the protocol. Finally, five protocols consider both urban and highway scenarios the same way they are considered in AddP.

In Table 1, the most relevant protocols are highlighted (PGB [22], DOT [31] and TBN [41] and were considered either by their characteristics or because they are the most cited in the literature. These protocols have their results compared to those of AddP in Section 4.

3. AddP: Adaptive Data Dissemination Protocol

In this paper, a novel reliable multi-hop broadcasting protocol, called AddP – Adaptive Data Dissemination Protocol – is proposed for VANET safety applications. In a Local Danger Warning, the vehicles exchange information among themselves, generate warning messages, transmit and relay the messages in the network. The aim of AddP is twofold: (1) to disseminate warning messages to the highest possible number of nodes and with minimum delay; and (2) to address the broadcast storm, frequent disconnection, and hidden node problems.

The proposed protocol uses the density and distance from neighbor nodes for selecting the vehicles that will relay the warning messages. The AddP also uses periodic beacons, adaptive con-

gestion control and message aggregation mechanisms to achieve these goals as described in details in this section.

The vehicular network model is comprised of vehicles equipped with on-board units (OBUs) and roadside units (RSUs) in a hybrid VANET architecture. RSUs are stationary units that serve as intermediate nodes to exchange information with the vehicles.

In the network, the following assumptions are taken into account: (1) the identity of each vehicle is unique in the network (based on MAC address); (2) vehicles are equipped with components that enable communication and execution of applications such as sensors, storage units, wireless communication system, positioning system (GPS) and a user interface to show the driver both the warning messages and the location of the reported events; (3) events (hazard) can always be detected by the sensors of the vehicles; and that (4) GPS has sufficient accuracy to detect the location of the vehicle on the road and to synchronize its clock.

AddP is based on a *periodic beacon-based* approach, so-called cooperative awareness messages (CAMs) [43]. The exchange of beacon messages allows nodes (vehicles and RSUs) to notify other nodes, which are located within a single hop distance, of its presence and its status. These beacons contain vehicle identification, local density, speed, position and other pertinent information to its neighbors. However, when congestion on the wireless channel occurs (e.g. in a dense network), it is necessary to reduce the beacon load to keep a certain amount of the available bandwidth for the warning messages because they carry time-critical information of high importance. Therefore, the AddP uses an *adaptive beacon congestion control mechanism* to address the broadcast problem based on the density of vehicle in the interest area to adjust the period between beacon retransmission.

While processing beacon messages, each vehicle is aware of other vehicles and the disseminated warning messages in the VANET. When a vehicle receives a beacon message, it updates its knowledge base (KB) that contains the received message list and pertinent information of its neighbors.

Candidate selection to rebroadcasting messages is considered as one of the most important phases in an efficient multi-hop broadcast protocols. To reduce the number of redundant rebroadcast messages and channel conflict, in the proposed protocol, vehicles use the *candidate selection mechanism* based on local density information and distance from neighboring nodes to determine which one will relay the alert. Moreover, in AddP, all nodes monitor the relay node. If the relay does not rebroadcast the message in a particular period of time, one of its neighbors should do it.

To reduce the number of warning messages retransmitted in the network, AddP uses a *Warning Message Aggregation* mechanism that implements a simple network coding technique based on logical operation (XOR) to provide message aggregation. In scenarios with more than one warning message to be disseminated in the network, the proposed protocol performs XOR operation and makes use of only one retransmission for both messages.

In the proposed protocol, RSUs act as data collection points sent by vehicles. These RSUs can check the last received message by a vehicle in the current network through *Disseminated Messages Monitoring* Mechanism. If a vehicle does not have the last message, the RSU can relay the message to this vehicle. In a similar way, all vehicles use *Disseminated Messages Monitoring* to check if a selected relay node retransmitted the current warning. If not, the neighbor relays the warning message. This mechanism is used to address the hidden node problem and to increase the reliability of dissemination in sparse density scenarios.

AddP consists of three operational modules called *Beacon Control and Sending*, *Determination of Neighborhood* and *Efficient Reliable Data Dissemination* modules as depicted in Fig. 1. The following sections discuss these modules and its mechanisms.

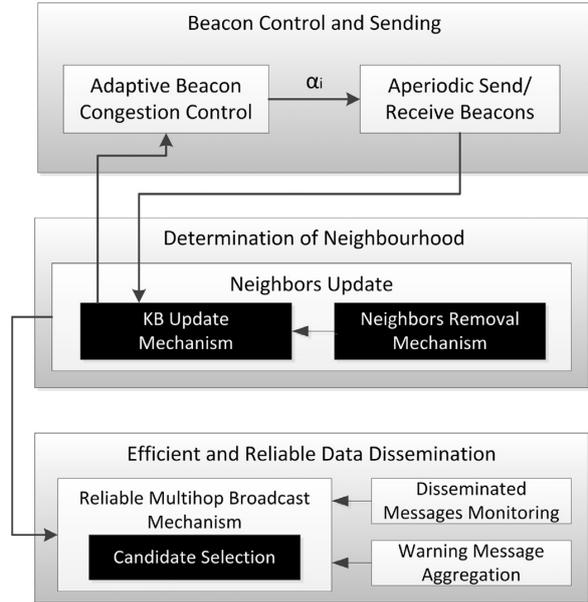


Fig. 1. Operational modules of AddP.

3.1. Beacon control and sending module

The communication radius of node i is called r_i and defines a transmission range, described by a circle in which i lies in the center, and all nodes that are within this circle are called neighbors or members of the neighborhood. Neighbors within transmission range of the node are called 1-hop neighbors. In AddP, only the information of 1-hop neighbors is used to obtain information about the neighborhood.

The *Beacon control and sending* module is responsible for broadcasting beacons to 1-hop neighbors. Beacons are the most important solution for selective broadcast protocols to discover and exchange local information. As described in Section 2, most related work uses periodic beacons in its protocols. In certain scenarios, e.g., in high-density scenarios, the exchange of beacons periodically can cause a high amount of packet collisions [44]. AddP uses periodic beacon messages (BM) and, to decrease the amount of beacon collisions in dense networks, it implements an adaptive beacon congestion control mechanism. This mechanism adjusts the time between beacon according to the local node density. In a dense scenario, this time interval will be longer than in sparse scenarios, leaving the communication channel more free to be used by warning messages.

The time between beacon retransmissions (α_i) from a node i is computed according to Eq. (1) where Pf represents a fixed minimum period, which is equal for all nodes (e.g. 150 ms), D_i determines the density of node i , which is the number of 1-hop neighbors, TpV defines the time each vehicle adds to the scenario (e.g. 20 ms). Finally, $\text{Rand}[0,0.002]$ represents a time offset that is randomly generated between 0 and 2 ms. The offset is used to minimize the probability of two or more nodes having the same time between retransmissions. The time α_i is calculated whenever the density of the node i is changed (neighbor insertion or removal).

$$\alpha_i = (Pf + (D_i \cdot TpV)) - \text{Rand}[0, 0.002] \quad (1)$$

The fields of a BM are listed in Table 2. Beacon messages are used by nodes to build its local KB, which contains the received

Table 2
Beacon message BM.

Field	Description
Id_i	Node identifier (MAC address)
D_i	Node local density
pP_i	Previous position in the instant t^k
aP_i	Actual position in the instant t^k
V_i	Speed of node i in the instant t^k
IdW_i	Identifier of the last received warning message
CM_i	Type of control message (BM)

Table 3
Message WR.

Field	Description
IdW_i	Warning message identifier
Tr_i	Time stamp (when the message was revoked).
CM_i	Type of control message (WR)

message base and pertinent information of their neighbors (neighborhood base) as described in the next section. The fields related to node positions and speed (pP_i , aP_i and V_i) are used in *Neighbor Removal Mechanism* also describe in Section 3.2 and the identifier of the last received warning message (IdW_i) is used in the *Disseminated Messages Monitoring* mechanism described in Section 3.3.

3.2. Determination of neighborhood module

As depicted in Fig. 1, *Determination of neighborhood* module is responsible for updating the local KB. When node i receives a BM, it updates its *neighborhood base* that contains neighbor identifiers and all other fields of the received BM. *KB Update* mechanism also has the task of update the received warning messages by a node. The *received message base* is updated when a new warning message is created or received or when a message has had its time to live expired. In this last case, the warning message is removed from the base. Then, the node needs to broadcast a control message, called *Warning Revoke* message (WR), so its neighbors can update its received message base too. The fields of a WR are listed in Table 3.

Due to the high mobility of the nodes, the proposed protocol needs to determine which neighbors are still active within the communication range of a node. For this purpose, each vehicle uses *Neighbor Removal Mechanism* to keep its *neighborhood base* updated. This mechanism, besides contributing to the AddP performance by reducing the size of the KB, contributes to the selection of the legitimate candidate to be the relay node of the warning message.

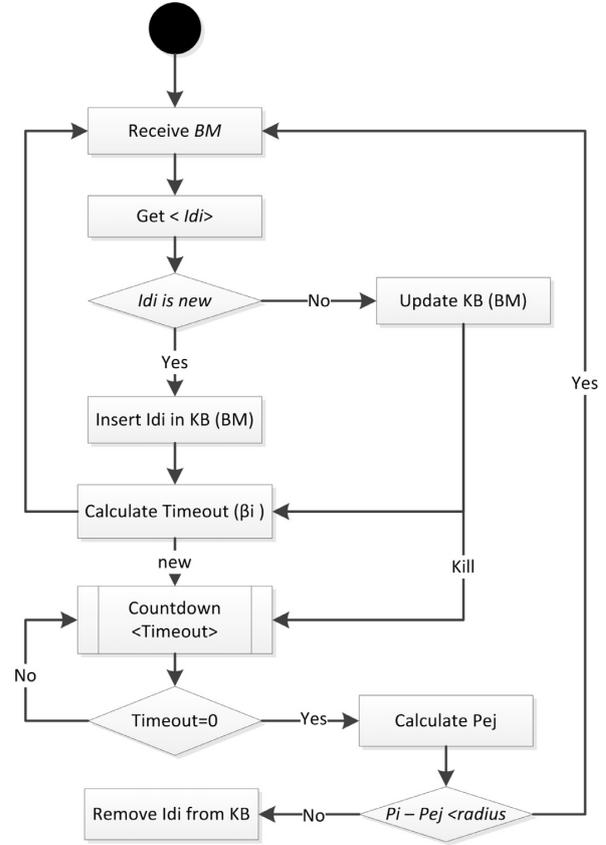
Neighbor Removal Mechanism has two procedures: *Timeout Adaptation* and *Connectivity Detector*. *Timeout Adaptation* aims to determine an appropriated time to wait for beacon messages from the neighbors. Each node, for instance, node i , when receiving a BM from j , it needs to determine the timeout (β_j) to wait for the next BM from j . The timeout value is computed according to Eq. (2).

$$\beta_j = Pf + (D_j \cdot TpV) \quad (2)$$

Eq. (2) is similar to Eq. (1) to determine the time between beacons messages, where Pf represents a fixed minimum period, D_j determines the density of node j ,¹ TpV defines the time that each vehicle adds to the scenario.

The flowchart illustrated in Fig. 2 shows the steps of Neighbor removal mechanism. When a node receives a BM, it needs to know if the node that sent the beacon is in the neighborhood base. If it is a new neighbor, the KB Update inserts the node in its information

¹ The node i obtain this information in the BM received from j .

**Fig. 2.** Neighbor removal mechanism.

(BM) in the base. Then the Neighbor Removal mechanism calculates the timeout (β_j) to wait for the next BM from the same node. After that, the mechanism creates a new subprocess to countdown the timeout.

When timeout (β_j) is expired, the second procedure (*Connectivity Detector*) is executed to confirm if node j , which did not send a BM, it is still within the coverage area of node i . Due to the underlying wireless communication problems, such as packet loss, delays and hidden node problem, this second procedure is necessary to avoid frequent removal and reinsertion of nodes in the neighborhood base.

Detector connectivity procedure aims at to estimate whether a communication link between two neighbors remains valid. So, the node i need to estimate the position of the node j , whose BM has not been received. If the difference between the positions of node i and node j is less than the radius of communication, it considers that the node j is still within the coverage area of node i , then the node j should remain in the *neighborhood base* of the node i . Otherwise, node j should be removed from the base (see Fig. 2).

The estimated position of node j (Pe_j) is computed according to Eq. (3) where the component $dA_{i,j}$ is the distance from node j to node i at the instant the beacon was sent (see Eq. (7)). TDp_j is the traveled distance estimation by node j , after it sends its last beacon message, and M_j indicates if node j is moving in closer to node i (assume the value -1) or if node j is moving away to node i (assume the value $+1$).

$$Pe_j = |dA_{(i,j)} + (TDp_j \cdot M_j)| \quad (3)$$

The traveled distance estimation TDp_j is defined by Eq. (4). In this equation, t_i^k is the current time of node i , t_j^{last} is the last timestamp received from neighbor j and V_j is the last known speed of node j .

$$TDp_j = (t_i^k - t_j^{last}) \cdot V_j \quad (4)$$

Algorithm 1 describes how node i obtains M_j where TD_j is ob-

Algorithm 1: Get proximity to node j

```

1  $TD_j \leftarrow$  Calculates distance of node  $j$ ; (see Eq. (5))
2 if ( $TD_j \geq 0$ ) then
3   | return  $M_j = -1$ ;
4 else
5   | return  $M_j = +1$ ;

```

tained by Eq. (5). In Eq. (5), $dA_{i,j}$ is the distance from node j to node i at the instant the beacon message was sent and $dP_{i,j}$ is the distance from node j to i in a previous position. To calculate these distances, the mechanism uses the Euclidean distance (see Eqs. (6) and (7)).

$$TD_j = dP_{(i,j)} - dA_{(i,j)} \quad (5)$$

$$dP_{(i,j)} = \sqrt{(x_i - xA_j)^2 + (y_i - yA_j)^2} \quad (6)$$

$$dA_{(i,j)} = \sqrt{(x_i - xI_j)^2 + (y_i - yI_j)^2} \quad (7)$$

3.3. Efficient and reliable data dissemination module

As mentioned before, the purpose of AddP is of disseminating warning messages to the highest possible number of nodes in an efficient way. In Section 3.1, it was described how vehicles send and control beacons to get neighborhood information using AddP. Next, in Section 3.2, it was described how AddP mechanism is responsible for updates to the local knowledge base of a vehicle. In this section, we describe other features of the proposed reliable multi-hop broadcast protocol.

3.3.1. Candidate selection mechanism

The selection of a relay node occurs when a node wants to transmit or retransmit a data message on the network. Node i , before it selects a relay node, checks its *neighborhood base* to see how many neighbors are in the base. If node i has insufficient information,² then it sends a control message, called *request beacon (RB)*, to force its neighbors to send new beacons to update its base.

To determine the best suitable node to retransmit the warning message, node i calculates the gain G_j (see Eq. (8)) of each neighbor that is in its *neighborhood base (NB)*. This gain is used to qualify neighbor nodes. The node that has the highest gain will be selected as the relay node.

$$G_j = w \cdot \frac{B_j}{Th_B} + (w - 1) \cdot \frac{D_j}{Th_D} \quad (8)$$

In Eq. (8), D_j indicates the local density of node j . *Candidate Selection Mechanism* assumes that the higher the local density of a node, the more likely that this node will spread the message to a larger number of nodes.

B_j is the distance from vehicle j to vehicle i . The proposed mechanism prioritizes nodes closest to the edges of the communication radius. To calculate the distance B_j , the proposed mechanism uses the Euclidean distance, which takes into account the x

² The number of neighbors is smaller than a parameterizable threshold.

Table 4
Warning message WM.

Field	Description
<i>IdW</i>	Warning message identifier
<i>Id_i</i>	Node i MAC address
<i>ToM</i>	Type of warning message
<i>Desc</i>	Description
x_i, y_i	GPS coordinates that indicates where was the event
<i>TTL</i>	Time to live of WM
<i>timestamp</i>	WM timestamp
<i>Tag</i>	Indicate if is a single message or aggregated message (0-single message)
<i>Relay</i>	Identifier of relay node

and y coordinates of each vehicle, according to Eq. (9).

$$B_j = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (9)$$

where x_i and y_i represent coordinates of vehicle i , x_j and y_j represent coordinates of vehicle j . The largest value of B_j indicates that the vehicle is the closest to the edge of the communication radius. Therefore, the data message will be better widespread to the other nodes. A threshold of distance (Th_B) is defined for B_j . In this case, the threshold is defined by radius coverage of node i . In a similar way, a threshold of density should be defined for different scenarios.

Finally, in Eq. (8), the weight (w) determines the influence of each component (distance and local density) to calculate the gain G_j . In high-density scenarios, it is interesting to prioritize the distance between the transmitter and the relay, and then the message reaches the edges of the communication radius and it is broadcasted the farthest that it is possible.

After determining which node will be the relay node, node i can set the *Warning Message (WM)* with the fields listed in Table 4 and broadcasts the message. It is important to emphasize that a node broadcasts a WM only once. So, before sending a WM, the node checks in its *received warning message base* to see if the node already transmitted the WM.

3.3.2. Disseminated Messages Monitoring

As mentioned before, *Disseminated Messages Monitoring* mechanism aims to provide more reliability to data dissemination and to address the hidden node problem. Vehicles and RSUs monitor disseminated warning messages in the network. Vehicles use this to check if a selected relay node did not rebroadcast a warning message. If not, one neighboring node should do it. RSUs use the mechanism to relay a warning message when it detects that a vehicle does not have the last disseminated warning message in the network.

The flowchart illustrated in Fig. 3 shows the steps performed by the application (AddP) in the OBU when a vehicle receives a WM. After it confirms that the message is a valid warning (*TTL* is not expired) and it is a new message, the application will verify who is the relay node in the received message. If the relay node identifier is different than the vehicle identifier, the application calculates a time to wait for the relay node rebroadcast WM (γ_k) and creates a new process to countdown to this time. This time is calculated according to Eq. (10). When a timeout is triggered, if the node does not receive the WR again, the application relays the message in the network. If the node receives the WR twice, the application stops the countdown.

$$\gamma_k = Ti + \frac{C}{ToM} + Rand[0, 0.002] \quad (10)$$

In Eq. (10), Ti represents a fixed initial time, which is equal for all nodes, ToM is the type of warning message, so indicates the urgency of the message, C is a protocol configuration parameter that

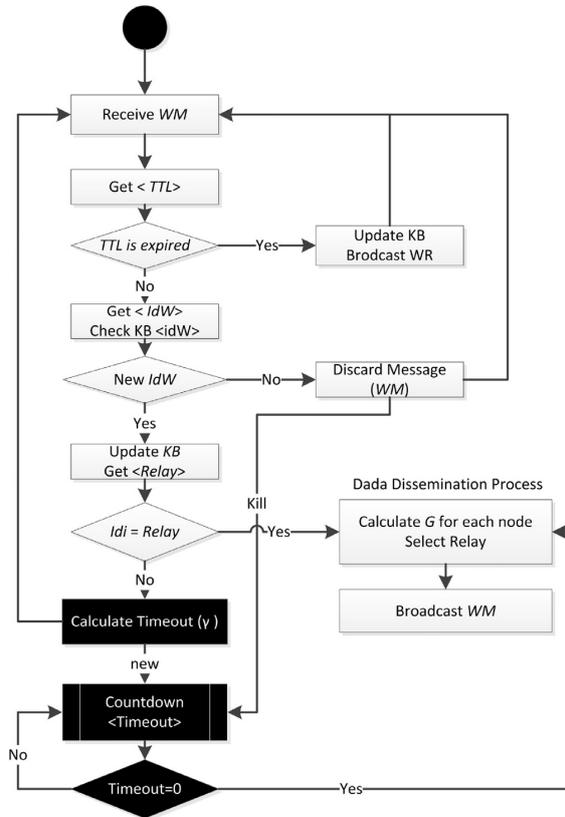


Fig. 3. AddP flowchart when a vehicle receives a warning message.

is used with ToM to determine a time related to the urgency to disseminate the message. A message with high priority (urgency), will have a time for timeout less than a low priority message because this message needs to be broadcasted as soon as possible. The component $Rand[0, 0.002]$ represents a random time offset that is used to minimize the probability of two or more nodes having a timeout simultaneously.

In AddP, the RSUs collect all beacon messages (BM) and WM that the vehicles propagate in the network to build its knowledge base. Consequently, an RSU knows all warning messages that its neighbor vehicles received. If an RSU detects that a vehicle does not have the last WR , it can relay this WR to the vehicle. Moreover, RSUs also monitor the TTL of warning messages that are transmitted. When a TTL is expired, RSUs broadcast a WR control message to indicate to the vehicles that such message needs to be revoked, and their base needs to be updated.

3.3.3. Warning message aggregation

According to [45–47], the use of data aggregation, for example using network coding and other techniques, can improve the data dissemination in vehicular networks. In this work, the XOR operation (bitwise) can be used in scenarios where there are two warning messages to be disseminated on the network. For example, node i has two messages $WM1$ and $WM2$ in its received warning message base. Using Disseminated Messages Monitoring mechanism, node i can know which nodes have not received $WM1$, and have not received $WM2$ during a short period of time (Ta).³ Then node

³ This period of time is the same to all nodes in the network and it is parameterizable.

i , using the Warning Message Aggregation mechanism, can decide if it aggregates the $WM1$ and $WM2$ ($WM1 \oplus WM2$).

In the proposed mechanism, for node i to decide if ($WM1 \oplus WM2$) aggregation should be done, it calculates the percentage of nodes that did not receive $WM1$ in its neighborhood according to Eq. (11).

$$P_{xor} = \frac{TotalWM1}{SizeNB_i} \quad (11)$$

where $TotalWM1$ is the number of nodes that did not receive $WM1$ during the time Ta , and $SizeNB_i$ is the size of the neighborhood base. If P_{xor} is above a threshold ($Thag$), for example, 40%, the aggregation will occur. Otherwise, the messages ($WM1$ and $WM2$) will be disseminated separately.

4. Evaluation of proposed protocol

To evaluate the AddP performance, we executed a set of simulated experiments. The purpose of the experiments was to compare AddP with two well-known beacon-assisted protocols (PGB [22] and DOT [31]), one beaconless protocol (TBN [41]), and a simple flooding approach (Flooding), in light of a realistic simulation environment with regards to safety applications.

PGB and DOT are classified as Delay-Based Multi-hop Broadcasting and have beacon control congestion mechanisms. However, considering the rebroadcast decision, PGB is receiver oriented and DOT is sender oriented such as AddP. AddP and PGP are protocols designed to operate in urban and highway scenarios over different densities, while DOT and TBN were designed for highway scenario. Apart from all these characteristics, these protocols were chosen due to the excellent performance in their simulations and because they aim to minimize the broadcast storm problems, as in the case of our proposed protocol.

In our experiments, we considered two network scenarios with sparse, normal, and dense traffic conditions: (i) a real case of a highway in Santa Catarina, Brazil and (ii) Ottawa's downtown, Ontario, Canada.

In this section, we present details of the simulation environment and parameters, performance parameters, and evaluation results. In particular, Section 4.1 presents the simulation setup. The performance metrics used for AddP assessment are introduced in Section 4.2. Section 4.3 describes and analyzes the results in consideration of a highway environment and Section 4.4 describes and analyzes the results in consideration of an urban environment.

4.1. Simulation setup

In the experiments, an event based network simulator OMNeT++ was used. Aiming to make the most realistic simulations, SUMO (Simulation of Urban Mobility) bidirectionally coupled with OMNeT++ as described in Veins (Vehicles in Network Simulation) framework⁴ [48] was used. Veins implements IEEE 802.11p standard and higher layer models of the IEEE 1609.4 DSRC/WAVE stack. It further includes Wave Short Message (WSM) handling and beaconing for cooperative awareness messages (CAMs). We used the Two-Ray Interference propagation model of Veins which captures both signal attenuation and ground reflection effects [49].

Table 5 summarizes the simulation parameters used to define the modules of the Veins framework in the experiments. The maximum transmission range in urban and highway (hw) environments was different as shown in the table. In SUMO, we defined four vehicle types: cars, trucks, motorcycles, and buses. Each type has characteristics based on real scenarios (e.g., maximum speed, vehicle length, acceleration, etc.).

⁴ <http://veins.car2x.org/>.

Table 5
Simulation parameters.

Parameter	Value
MAC Layer	802.11p
Transmission range (urban)	200 m
Transmission power (urban)	0.98 mW
Transmission range (hw)	256 m
Transmission power (hw)	2 mW
Bit rate	18 Mbps
Beacon size	32 bytes
Data message size	2048 bytes
Propagation model	Two-ray interference
Simulation time	15 min
Number of repetitions	33

Table 6
AddP parameters.

Parameter	Value
P_f	1 s
T_{pV}	20 ms
T_{H_B}	300 m
T_{H_D}	50 vehicles
w	0.5
T_i	150 ms
C	1
ToM	1

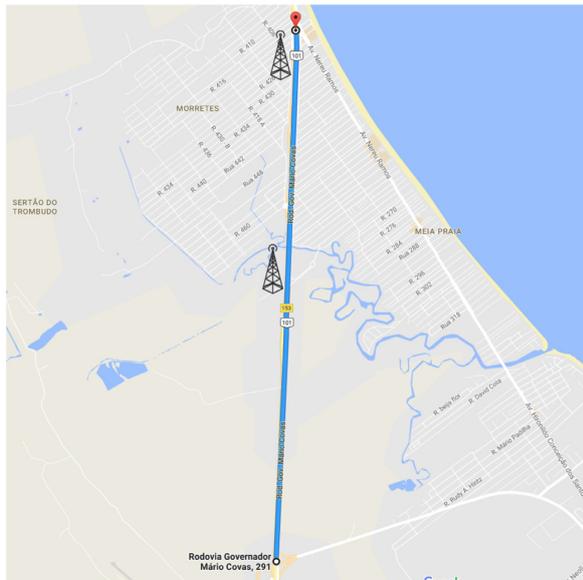


Fig. 4. Simulated highway.

Table 6 shows AddP parameters used in the experiments. These parameters were used to calculate the time between beacon re-transmissions (Eq. (1)), timeout adaptation (Eq. (2)), the gain to qualify the neighbor's nodes (Eq. (8)), and the time to wait for the relay node rebroadcast (Eq. (10)). These parameters were selected experimentally after performing some initial simulations. The selection was made with a well-defined systematic procedure. The parameter values were obtained from several experiments considering different flows on highway and densities in urban scenarios.

Highway environment

In the experiments, a real road segment was considered – the BR-101 highway in the South of Brazil (Fig. 4). The stretch consists

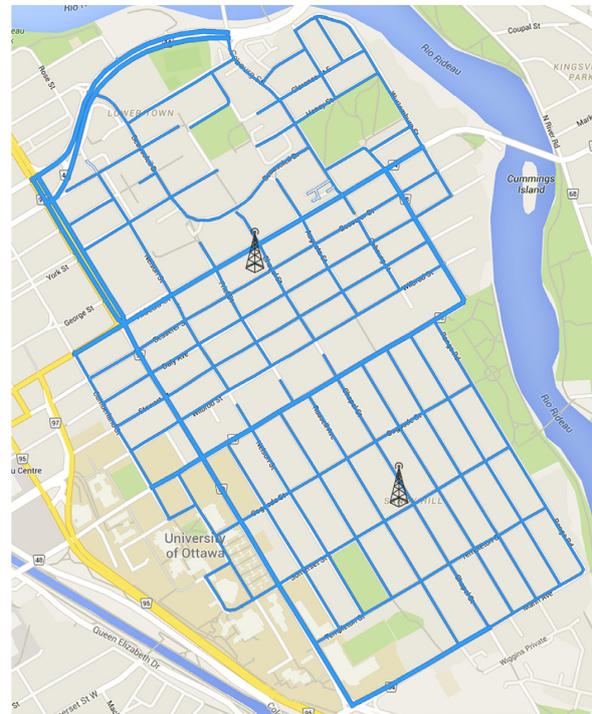


Fig. 5. Ottawa's downtown scenario. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

of a two-way and two lane road for each direction, with four lanes in total, with a maximum speed set at 110 km/h for cars. Eight scenarios with different vehicle flows were defined (500, 600, 800, 1000, 2000, 3000, 4000 and 5000 vehicles/hour). These flows simulate very sparse (500, 600, 800), sparse (1000, 2000), normal (3000, 4000), and dense traffic (5000) flows.⁵ In all experiments, the size of the highway was 5 km.

In all simulated highway scenarios, there were two Road Side Units (RSUs) responsible for the propagation of alerts to vehicles that did not receive signals through the conventional way. One of them was positioned at the beginning of the first kilometer and the other at the beginning of the third kilometer. An accident event on the road located within half of the highway was considered.

Urban environment

In the urban environment, we assumed a cross-section of Ottawa's Downtown area, in Ontario, Canada (Fig. 5), which features a block-like grid commonly found in city centers. As described in [50], this scenario has 25 horizontal and vertical streets. It contains roughly 29 km of roads, length used to calculate vehicle density per kilometer, a factor relevant in estimating road density. Simulation configurations were defined to match daily road section averages, which range from 3.000 to 50.000 vehicles per road segment. The knowledge of local area allowed us to define the traffic flows ranging from sparse (50 vehicles/km²) to dense scenario (600 vehicles/km²). It should be noted that the volume of vehicles on each road segment is primarily correlated to road capacity, fact which is used for simulation setup validation. In our simulations, since we assumed an equal amount of traffic in each direction, the green split value was fixed at 50/50 (i.e., each traffic direction has an equal amount of green time at any intersection). In addition,

⁵ These traffic flows were obtained from the federal highway authority.

the network topology is assumed to be a torus: when a vehicle reaches the network boundary, it reappears on the same street on the opposite side of the network boundary. At a traffic light, the probability of going straight was 50% and taking a left or right turn was 25% each, according to the scheme presented in [34].

The traffic of vehicles was generated randomly. We inserted vehicles into the network topology at a constant rate (50, 100, 150, 300, 450 and 600 vehicles/km²) and the velocity of vehicles may vary in a range from 0 to 13.88 m/s, i.e., vehicles had different accelerations at different time stamps.

In urban scenarios, radio transmissions are heavily impacted by signal shadowing effects. The Veins framework includes a simple obstacle shadowing model [51]. This model will accurately capture the effect that large buildings will have on blocking transmissions, and weak transmissions are blocked by as little as a small wall, while strong transmissions are only slightly hindered by the presence of buildings in the line of sight. We used this model in our experiments in an urban environment.

4.2. Performance metrics

According to Panichpapiboon and Pattara-Atikom [13], what most researchers are interested to know about the broadcasting protocols in VANETs are: (i) how frequently the messages are duplicated, (ii) how far the message can propagate, and (iii) how fast the message can be spread. Besides that, to have reliable protocols, it is important to know if the broadcast messages are delivered to all nodes [14]. The following seven metrics were used to evaluate the effectiveness and the efficiency of the proposed protocol:

- *Success Ratio or Delivery Ratio (SR)*: it is the percentage of vehicles that receive messages successfully (*NumVehRecMsg*) out of all intended vehicles (*NumVehNetwork*), which is the coverage of the protocol. Reliable data dissemination protocols must achieve a delivery ratio percentage close to 100%.

$$SR = \frac{NumVehRecMsg}{NumVehNetwork} \quad (12)$$

- *Redundancy Rate (RR)*: it is the percentage of duplicate messages used in disseminating one source message⁶ (*NumDuplicateMsgs*) out of all source messages (*NumSourceMsgs*). An efficient protocol should be able to disseminate information with the least amount of redundancy or overhead [13].

$$RR = \frac{NumDuplicateMsgs}{NumSourceMsgs} \quad (13)$$

- *Total number of beacons (TB)*: it is the total number of beacons (*NumBeacons*) per broadcasted messages (*NumSendPkts*). In a dense scenario, the beacon load can reduce the efficiency of the protocol.⁷

$$TB = \frac{NumBeacons}{NumSendPkts} \quad (14)$$

- *Collision Ratio (CR) or Packet loss ratio*: it is the percentage of MAC collisions during the data dissemination (*NumCollisionPkts*) per the number of broadcasted packets (*NumSendPkts*). Obviously, the failure rate should be kept at a minimal [13].

$$CR = \frac{NumCollisionPkts}{NumSendPkts} \quad (15)$$

- *Propagation Distance (PD)*: it is the average distance that a message can propagate (*LastPos*) from the point where it is originated (*InitialPos*) in a unit of meters.

$$PD = LastPos - InitialPos \quad (16)$$

⁶ We consider only data messages in these results, thereby excluding the transmissions of beacons.

⁷ A high rate of redundancies and a high number of beacons may result in a broadcast storm problem.

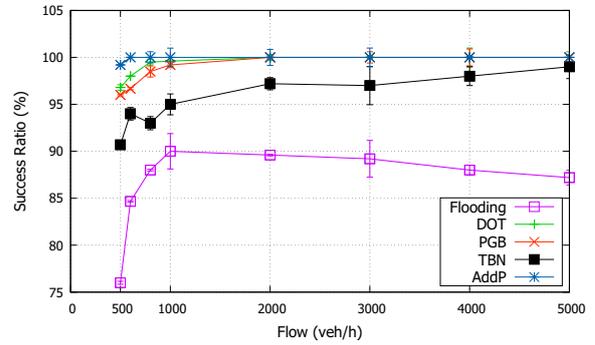


Fig. 6. Success ratio - highway.

- *Propagation Time or average end-to-end delay (Pt)*: it is the average time it takes a message to traverse from a source to the other nodes in the network. This delay is measured as the instant of receiving the message (*RecMsgTime*) minus the initial instant (*InitTime*). A low delay is very important in safety applications.

$$PT = RecMsgTime - InitTime \quad (17)$$

- *Dissemination Efficiency (DE)* [13]: it measures how far a message can propagate through the network per unit of time and per the amount of overhead generated according to the Eq. (18). The *DE* value increases if the message can be distributed farther, faster, with a high success rate, and with less redundancy.

$$DE = \frac{PD \cdot SR}{PT \cdot RR} \quad (18)$$

4.3. Highway scenario simulation results

This subsection consists of several graphs representing the results of performed simulations under various traffic flow scenarios for each metric described in the previous subsection. Each figure was depicted and extracted as the average of 33 simulation executions and considered at 95% confidence intervals.

Fig. 6 presents the reliability for all protocols under different traffic flows. As can be observed, AddP is the best performing protocol even in sparse scenarios when compared with DOT, PGB, TBN, and pure flooding. Such results can be explained by the fact that the AddP protocol uses the Disseminated Messages Monitoring Mechanism to relay the undelivered warning messages in the case of a network partition or a hidden node problem. In dense scenarios, the behavior of AddP, DOT, and PGB are similar (100% coverage). Based on that result, we can conclude that AddP is a suitable solution for applications that require reliable data delivery under sparse and dense network density scenarios.

AddP, PGP, and DOT are beacon-assisted protocols and have mechanisms to reduce the beacon load in the network. Fig. 7 shows the results of the total number of beacons transmitted by all vehicles during the dissemination process for different traffic flows. As the vehicle flow increases, AddP incurs the lowest number of beacons transmitted. This comes from the fact that AddP adjusts the time between beacon retransmissions based on node density to address the broadcast storm.

Fig. 8 shows the number of duplicate messages (redundancy rate) in all protocols under different traffic flows. As expected, Flooding is the protocol with the highest redundancy, since it does not employ any kind of rebroadcast suppression mechanism. AddP introduces a lower overhead in the network, especially in dense scenarios, when compared to other protocols. The reason lies in

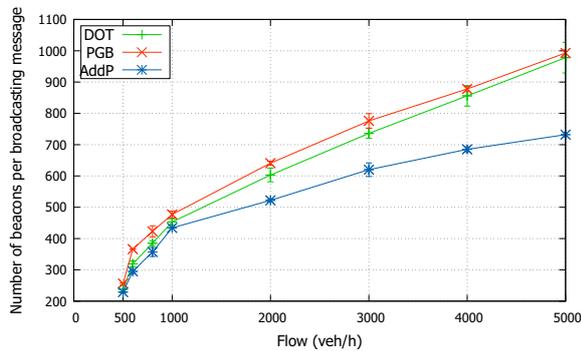


Fig. 7. Number of beacons - highway.

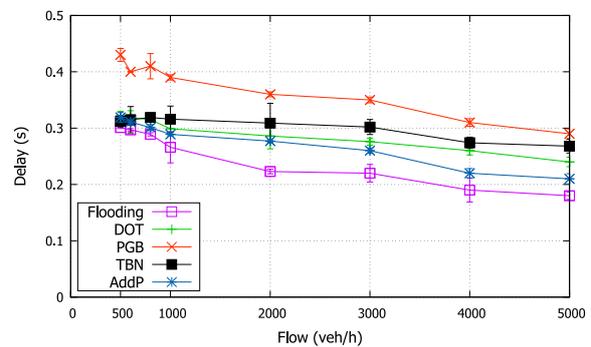


Fig. 10. Delay - highway.

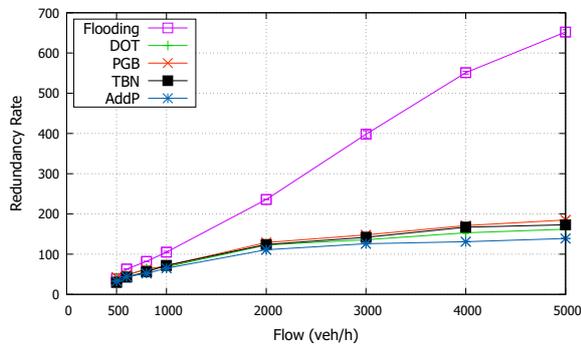


Fig. 8. Redundancy rate - highway.

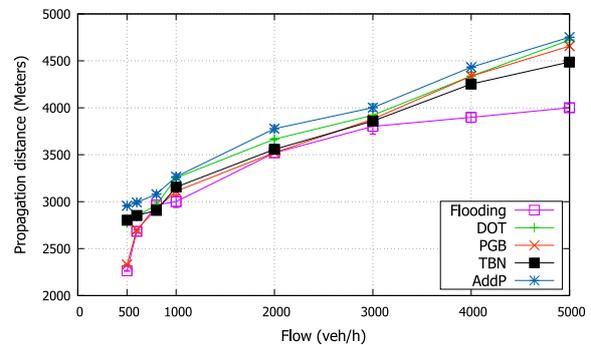


Fig. 11. Propagation distance - highway.

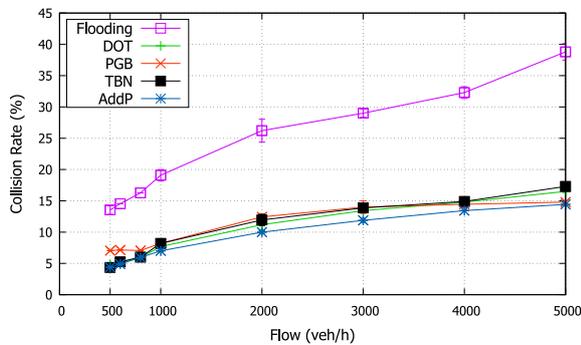


Fig. 9. Collision ratio - highway.

the ability of AddP to correctly select only one vehicle to disseminate the message in consideration of two metrics (local density and distance from the node).

In a similar result, Fig. 9 shows the number of collisions for all protocols. The behavior, or the shape of the graph of the protocols, is almost the same as the number of beacons and the redundancy. We can observe clearly that the Flooding protocol has the highest number of collision because it does not have a broadcast suppression approach and does not address the broadcast storm problem. Our protocol performs better under dense and sparse scenarios than the other protocols.

In Fig. 10, we can observe the performance with respect to the end-to-end delay. As expected in reliable protocols (AddP, DOT, TBN, and PGB), the delay for these protocols is higher than Flood-

ing due to the store-carry-forward performed by these protocols, i.e., vehicles need to store and carry messages around in order to deliver them. As the vehicle flow increases, the delay for all protocols decreases. In particular, AddP has the lowest delay when compared to PGB, DOT, and TBN. For PGB, the route discovery process precedes every first data transmission to an unknown destination, this adds to the delay of the first data packet. This result shows that despite a slightly higher delay when compared flooding, AddP is a good solution for applications that require reliable message delivery and carry time-critical information.

Fig. 11 shows the maximum average distance in meters that the message from the source vehicle was propagated. The graph shows that AddP has the best performance when compared with the other protocols. In a sparse scenario, AddP performs better than Flooding due to the Disseminated Messages Monitoring Mechanism. As expected, when the vehicle flow increases, the distance is higher for all protocols. Based on that result, we can conclude that AddP offers a much better network reachability than the other protocols.

Finally, to assess the efficiency of all protocols under different vehicle flows, we calculated the dissemination efficiency (see Eq. (18)) which considers the protocol overhead (redundancy rate, delay) and the reliability and reachability. This metric consolidates the previous metric results so, as expected, AddP performs better than the other protocols. When the traffic flow increases, DE values decrease, however, stabilize at dense scenarios. This happens because when the network becomes denser, the number of vehicles that will select the same time slot for transmission will increase. The results of the DE metric shows that the set of mechanisms proposed in AddP contributes to the efficiency of the protocol and has a better result than the others protocols (see Fig. 12).

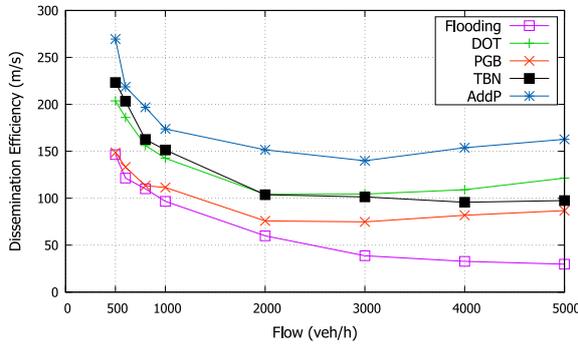


Fig. 12. Dissemination efficiency – highway.

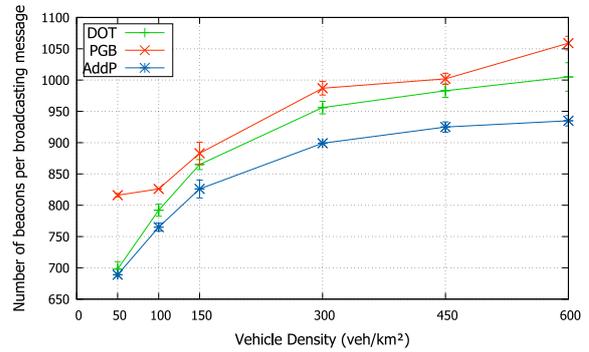


Fig. 14. Number of beacons – urban.

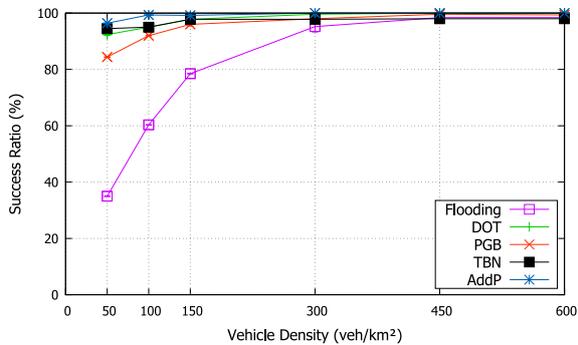


Fig. 13. Success ratio – urban.

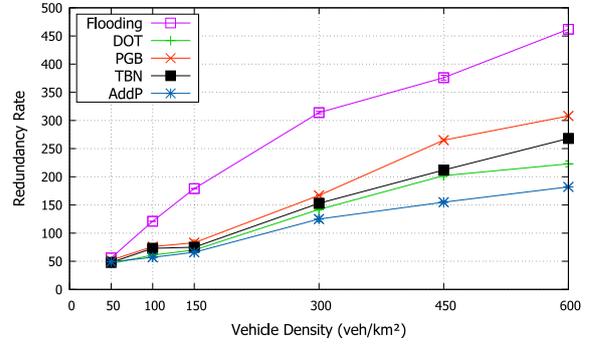


Fig. 15. Redundancy rate – urban.

4.4. Urban scenario simulation results

This section consists of several graphs representing the results of performed simulations in Ottawa's downtown scenario under various densities of vehicles. As in the Highway scenario, each point in the graphs represents the mean of 33 simulation executions with a confidence interval of 95%.

Fig. 13 shows the reliability results for all protocols under diverse traffic conditions. As can be observed, AddP is the best performing protocol, especially in sparse scenarios. When the density is 50 vehicles/km², AddP delivers the message to about 97% of the vehicles, and in normal and dense scenarios the message was delivered to all vehicles. This result indicates that AddP is a suitable solution for applications that require reliable data delivery.

Considering the beacon overhead, as we can see from Fig. 14, AddP incurs the lowest number of beacons transmitted, especially in dense scenarios. The behaviors of the protocols depicted in this figure are very similar to the results in the highway scenario.

Fig. 15 shows the redundancy rate for an urban scenario with different densities of vehicles. For all densities, AddP shows better or similar results than DOT, TBN, and PGB.

In Fig. 16, which depicts the collision ratio, we see that the rates for all protocols are higher than in the highway scenario. In high-density scenarios, the collision overhead in an urban area is heavier than on highways. For example, for 600 vehicles/km², the collision rate of PGB is 38.1%, TBN is 37.8%, DOT is 36.9%, and AddP is 34.80%.

In Fig. 17, we can observe performance concerning the end-to-end delay in an urban scenario. AddP has a low delay when compared to other approaches, but the delay shown is constant in all

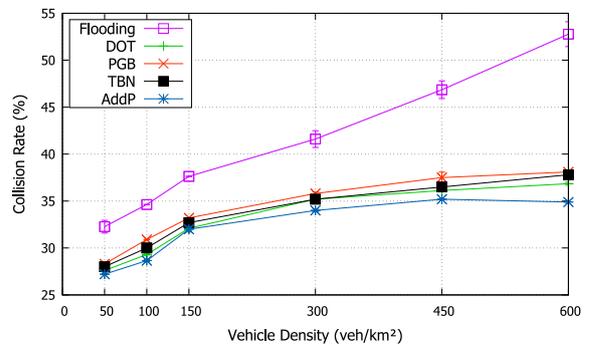


Fig. 16. Collision ratio – urban.

scenarios, this occurs because the nodes form clusters which facilitate the broadcast message.

Fig. 18 shows the message propagation distance. Safety applications require data to be disseminated in the largest possible area. As shown in the figure, AddP is able to propagate data to almost 2000 m in Ottawa's downtown scenario under all considered densities, and it presents the best performance. For example, in a sparse scenario, e.g. 50 vehicles/km², the maximum distance for Flooding is 666 m, PGB is 869 m, DOT is 795 m, TBN is 960 m and AddP is 980 m. This is because AddP makes use of mechanisms to deal with network partitions and the hidden node problem. In high-density scenarios, AddP has the same maximum distance as the others protocols.

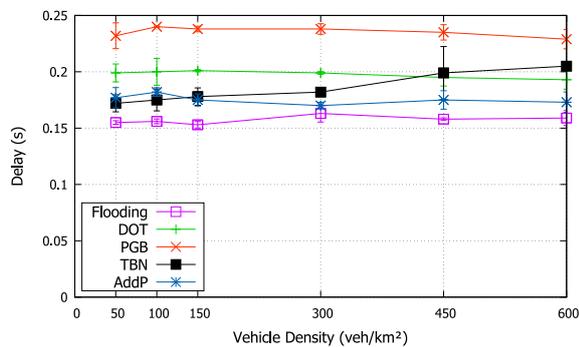


Fig. 17. Delay - urban.

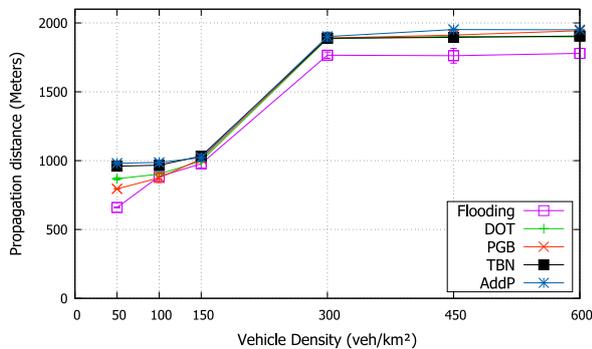


Fig. 18. Propagation distance - urban.

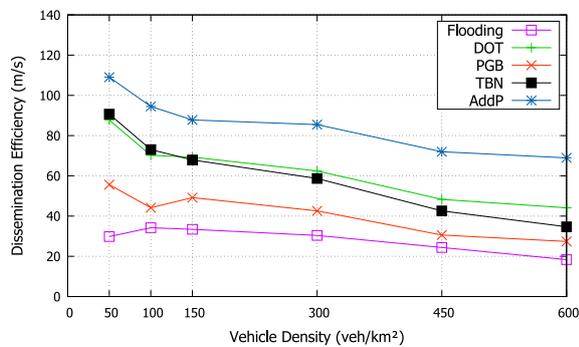


Fig. 19. Dissemination efficiency - urban.

Finally, considering the dissemination efficiency metric (DE), the results of which are shown in Fig. 19, in a sparse scenario the DE of AddP is about four times better than Flooding and about two times better in dense scenarios. As expected, in urban scenarios, when the density increases, the efficiency decreases for all protocols. AddP efficiency results are better than TBN, DOT and PGB results.

Based on the results of the performance evaluation described in this section, we can conclude that AddP is more efficient and more effective than Flooding, PGB, TBN, and DOT protocols when we consider Urban and Highway scenarios, and it is a suitable solution for safety applications that require reliable data delivery and which are delay sensitive.

5. Conclusion

One of the challenges in vehicular networks is the insertion of new mechanisms to make the network more safe and reliable, without the risk of compromising the performance. Reliable protocols emerge as an important alternative providing services of guaranteed message delivery.

This paper presents, as a contribution, a reliable protocol called AddP, which is developed to be a multi-hop broadcast protocol that reduces the number of unnecessary messages on the network and also the delays in message delivery.

Based on a receiver oriented approach, AddP selects a relay node based on the local density and distance from neighboring nodes. AddP uses an adaptive beacon congestion control to reduce the beacon load and to address the broadcast storm problem. AddP also addresses hidden node problem and short-lived connectivity using a message monitoring mechanism. Besides that, in scenarios with more than one valid warning message in a given network, the proposed protocol uses network coding to reduce the number of retransmissions.

We compared AddP performance against other protocols (beaconless and beacon-assisted protocols) and the results obtained in the simulations prove the reliability of AddP. Besides that, the results show that it maintains its high delivery ratio and low average delay even under extreme conditions. The proposed AddP protocol shows acceptable performance in both highway and urban scenarios. The results also indicate that the impacts of proposed mechanisms on the efficiency do not undermine the data dissemination goals in safety applications.

The possibilities for future work on the AddP research line are manifold and may include the following aspects:

- The use of vehicle movement direction as an input of the Connectivity Detector mechanism, and the effects of road interceptions and obstacles in urban scenarios must be better studied and incorporated in the AddP protocol.
- Another future topic to be explored is to analyze, separately, each AddP mechanism, verifying their impact on the proposed performance metrics.
- In order to assist the AddP parameterization, a mathematical model may be proposed.
- Privacy and security requirements are critical issues that need to be ensured in VANETs safety applications. It is also envisioned as a future work to analyze the performance of AddP in more realistic scenarios in order to investigate mechanisms to provide trustworthiness, mainly security and fault tolerance.

Acknowledgment

This work was partially supported by the NSERC, CRC Research Chairs Program, NSERC Strategic DIVA Network and NSERC CREATE-TRANSIT Program, and CAPES Brazilian research support agency (99999.000455/2015-06 and 1540527 grant numbers).

References

- [1] P. Papadimitratos, A. La Fortelle, K. Evenssen, R. Brignolo, S. Cosenza, Vehicular communication systems: enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation, *IEEE Commun. Mag.* 47 (11) (2009) 84–95.
- [2] M. Faezipour, M. Nourani, A. Saeed, S. Addepalli, Progress and challenges in intelligent vehicle area networks, *Commun. ACM* 55 (2) (2012) 90–100.
- [3] H. Hartenstein, K.P. Laberteaux, A tutorial survey on vehicular ad hoc networks, *IEEE Commun. Mag.* 46 (2008) 164–171.
- [4] G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, G. Heijnen, B. Jarupan, K. Lin, T. Weil, Vehicular networking: a survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions, *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 13 (4) (2011) 584–616.
- [5] S. Al-Sultan, M.M. Al-Doori, A.H. Al-Bayatti, H. Zedan, A comprehensive survey on vehicular ad hoc network, *J. Netw. Comput. Appl.* 37 (2014) 380–392.

- [6] Y. Toor, P. Muhlethaler, A. Laouiti, Vehicle ad hoc networks: applications and related technical issues, *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 10 (3) (2008) 74–88.
- [7] B. Moeller, C. Frings, Designers beware: response retrieval effects influence drivers response times to local danger warnings, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 24 (2014) 117–132.
- [8] C.D. Wang, J.P. Thompson, Apparatus and method for motion detection and tracking of objects in a region for collision avoidance utilizing a real-time adaptive probabilistic neural network, Google Patents, US Patent 5613039, 1997.
- [9] T. Kosch, Local danger warning based on vehicle ad-hoc networks: prototype and simulation, in: *Proceedings of the First International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2004)*, 2004.
- [10] B. Ostermaier, F. Dotzer, M. Strassberger, Enhancing the security of local danger warnings in VANETs – a simulative analysis of voting schemes, in: *Proceedings of the 2007 International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES)*, 2007, pp. 422–431.
- [11] J. Lee, W. Chen, R. Onishi, R. Vuyyuru, Vehicle local peer group based multicasting protocol for vehicle-to-vehicle communications, in: *Proceedings of the Fourth Workshop on Vehicle to Vehicle Communications (V2VCOM)*, 2008, pp. 422–431.
- [12] G. Mitropoulos, I. Karanasiou, A. Hinsberger, F. Aguado-Agelet, H. Wiekler, H.-J. Hilt, S. Mammari, G. Noecker, Wireless local danger warning: cooperative foresighted driving using intervehicle communication, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 11 (3) (2010) 539–553.
- [13] S. Panichapiboon, W. Pattara-Aitikom, A review of information dissemination protocols for vehicular ad hoc networks, *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 14 (3) (2012) 784–798.
- [14] K. Na Nakorn, K. Rojviboonchai, Comparison of reliable broadcasting protocols for vehicular ad hoc networks, in: *Proceedings of the Twelfth IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2010, pp. 1168–1171.
- [15] M. Gholibeigi, G. Heijnen, D. Moltchanov, Y. Koucheryavy, Analysis of a receiver-based reliable broadcast approach for vehicular networks, in: *Proceedings of the 2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2014, pp. 89–96.
- [16] K. Abboud, W. Zhuang, Modeling and analysis for emergency messaging delay in vehicular ad hoc networks, in: *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2009*, 2009, pp. 1–6.
- [17] N. Wisitpongphan, O. Tonguz, J. Parikh, P. Mudalige, F. Bai, V. Sadekar, Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks, *IEEE Wirel. Commun.* 14 (6) (2007) 84–94.
- [18] S.-Y. Ni, Y.-C. Tseng, Y.-S. Chen, J.-P. Sheu, The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network, in: *Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '99*, ACM, New York, NY, USA, 1999, pp. 151–162.
- [19] O. Tonguz, N. Wisitpongphan, F. Bai, P. Mudalige, V. Sadekar, Broadcasting in vanet, in: *Proceedings of the 2007 Mobile Networking for Vehicular Environments*, 2007, pp. 7–12.
- [20] A. Vegni, A. Stramacci, E. Natalizio, SRB: a selective reliable broadcast protocol for safety applications in VANETs, in: *Proceedings of the 2012 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (iCOST)*, 2012, pp. 89–94.
- [21] M. Koubek, S. Rea, D. Pesch, Reliable broadcasting for active safety applications in vehicular highway networks, in: *Proceedings of the Seventy-first IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, 2010, pp. 1–5.
- [22] V. Naumov, R. Baumann, T. Gross, An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces, in: *Proceedings of the Seventh ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc '06*, ACM, New York, NY, USA, 2006, pp. 108–119.
- [23] A. Laouiti, P. Muhlethaler, Y. Toor, Reliable opportunistic broadcast in vanets (R-OB-VAN), in: *Proceedings of the Ninth International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST)*, 2009, pp. 382–387.
- [24] B. Blaszczyk, A. Laouiti, P. Muhlethaler, Y. Toor, Opportunistic broadcast in VANETs (OB-VAN) using active signaling for relays selection, in: *Proceedings of the Eighth International Conference on ITS Telecommunications (ITST 2008)*, 2008, pp. 384–389.
- [25] K. Na Nakorn, K. Rojviboonchai, POCA: position-aware reliable broadcasting in VANET, in: *Proceedings of the Second Asia-Pacific Conference of Information Processing (APCIP2010)*, 2010, pp. 7–8.
- [26] O.K. Tonguz, N. Wisitpongphan, F. Bai, DV-CAST: a distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks, *IEEE Wirel. Commun.* 17 (2) (2010) 47–57.
- [27] C. Sommer, O.K. Tonguz, F. Dressler, Adaptive beaconing for delay-sensitive and congestion-aware traffic information systems, in: *Proceedings of the 2010 IEEE Vehicular Networking Conference*, 2010, pp. 1–8, doi:10.1109/VNC.2010.5698242.
- [28] N. Kamoltham, K. Nakorn, K. Rojviboonchai, Improving reliable broadcast over asymmetric VANETs based on a RSSI-voting algorithm, in: *Proceedings of the 2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, 2011, pp. 1–6.
- [29] D. Chuan, W. Jian, A reliable and efficient highway multihop vehicular broadcast model, *ISRN Commun. Netw.* 2012 (2012) Article ID 185472, 8 pages, doi:10.5402/2012/185472.
- [30] S. Djahel, Y. Ghamri-Doudane, A robust congestion control scheme for fast and reliable dissemination of safety messages in vanets, in: *Proceedings of the 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2012, pp. 2264–2269.
- [31] R.S. Schwartz, K. Das, H. Scholten, P. Havinga, Exploiting beacons for scalable broadcast data dissemination in VANETs, in: *Proceedings of the Ninth ACM International Workshop on Vehicular Inter-networking, Systems, and Applications, VANET '12*, ACM, New York, NY, USA, 2012, pp. 53–62.
- [32] G. Maia, A. Boukerche, A.L.L. Aquino, A.C. Viana, A.A.F. Loureiro, A data dissemination protocol for urban vehicular ad hoc networks with extreme traffic conditions, in: *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2013, pp. 5997–6001.
- [33] R.I. Meneguette, G. Maia, E.R.M. Madeira, A.A.F. Loureiro, L.A. Villas, Autonomic data dissemination in highway vehicular ad hoc networks with diverse traffic conditions, in: *Proceedings of the 2014 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2014, pp. 1–6.
- [34] R.I. Meneguette, A. Boukerche, G. Maia, A.A. Loureiro, L.A. Villas, A self-adaptive data dissemination solution for intelligent transportation systems, in: *Proceedings of the Eleventh ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks, PE-WASUN '14*, ACM, New York, NY, USA, 2014b, pp. 69–76.
- [35] C. Wu, S. Ohzahata, Y. Ji, T. Kato, Multi-hop broadcasting in VANETs integrating intra-flow and inter-flow network coding, in: *Proceedings of the Eighty-third IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, 2014, pp. 1–6.
- [36] F.D. Cunha, G.G. Maia, A.C. Viana, R.A. Mini, L.A. Villas, A.A. Loureiro, Socially inspired data dissemination for vehicular ad hoc networks, in: *Proceedings of the Seventeenth ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '14*, ACM, New York, NY, USA, 2014, pp. 81–85.
- [37] M.S. Rayeni, A. Hafid, P.K. Sahu, Dynamic spatial partition density-based emergency message dissemination in {VANETs}, *Veh. Commun.* 2 (4) (2015) 208–222.
- [38] S. Gonzalez, V. Ramos, Fast-OB-VAN: a fast opportunistic broadcast protocol for VANETs, in: *Proceedings of the Ninth International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2015*, 2015, pp. 114–119.
- [39] A.T. Akabane, L.A. Villas, E.R.M. Madeira, An adaptive solution for data dissemination under diverse road traffic conditions in urban scenarios, in: *Proceedings of the 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2015, pp. 1654–1659.
- [40] M. Segata, F. Dressler, R.L. Cigno, Jerk beaconing: a dynamic approach to platooning, in: *Proceedings of the 2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2015, pp. 135–142, doi:10.1109/VNC.2015.7385560.
- [41] A. Baiocchi, P. Salvo, F. Cuomo, I. Rubin, Understanding spurious message forwarding in VANET beaconless dissemination protocols: an analytical approach, *IEEE Trans. Veh. Technol.* 65 (4) (2016) 2243–2258, doi:10.1109/TVT.2015.2422753.
- [42] European Telecommunications Standards Institute (ETSI EN 302 636-4-1 V1.2.1), Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality, ETSI, 2014. ETSI EN 302 636-4-1 V1.2.1.
- [43] European Telecommunications Standards Institute (ETSI TS 102 637-2 V1.2.1), Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, 2013, ETSI, ETSI TS 102 637-2 V1.2.1.
- [44] L. Le, R. Baldessari, P. Salvador, A. Festag, W. Zhang, Performance evaluation of beacon congestion control algorithms for VANETs, in: *Proceedings of the 2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 2011, pp. 1–6.
- [45] R. Oliveira, A. Garrido, R. Pasquini, M. Lus, R. Dinis, P. Pinto, Towards the use of XOR-based routing protocols in vehicular ad hoc networks, in: *Proceedings of the 2011 IEEE Vehicular Technology Conference – VTC-Spring*, 2011, pp. 1–6.
- [46] S. Dietzel, J. Petit, F. Kargl, B. Scheuermann, In-network aggregation for vehicular ad hoc networks, *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 16 (4) (2014) 1909–1932.
- [47] Y.-D. Chen, Y.-P. Shih, K.-P. Shih, An emergency message dissemination protocol using n-way search with power control for VANETs, in: *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2015, pp. 3653–3658.
- [48] C. Sommer, R. German, F. Dressler, Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved IVC analysis, *IEEE Trans. Mob. Comput.* 10 (1) (2011) 3–15.
- [49] D. Eckhoff, C. Sommer, F. Dressler, On the necessity of accurate IEEE 802.11p models for IVC protocol simulation, in: *Proceedings of the Seventy-fifth IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, IEEE, Yokohama, Japan, 2012, pp. 1–5.
- [50] F. Modesto, A. Boukerche, A novel service-oriented architecture for information-centric vehicular networks, in: *Proceedings of the Nineteenth ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '16*, ACM, New York, NY, USA, 2016, pp. 136–139, doi:10.1145/2988287.2989178.
- [51] C. Sommer, D. Eckhoff, F. Dressler, IVC in cities: signal attenuation by buildings and how parked cars can improve the situation, *IEEE Trans. Mob. Comput.* 13 (8) (2014) 1733–1745.



René Oliveira is a Ph.D. student from Federal University of Santa Catarina (UFSC). He is computer engineer from University of Vale do Itajaí (UNIVALI), Master of Automation and Systems Engineering from UFSC. His research interests are vehicular networks and dependability.



Carlos. B. Montez is a Professor and researcher at Automation and System Department from Federal University of Santa Catarina (UFSC). He is Bachelor's in Computer Science from UFRJ, M.Sc. and D.Eng. from UFSC. His research interests include wireless sensor networks, real-time scheduling and real-time systems.



Azzedine Boukerche is a Professor at University of Ottawa. His research interests are vehicular networks, wireless and mobile ad hoc network.



Michelle S. Wingham is a Professor at University of Vale do Itajaí. She received her M.Sc. and Ph.D. on Electrical Engineering from the Federal University of Santa Catarina (UFSC). Recently, she was a Visiting Researcher at University of Ottawa. Her research interests are vehicular networks, security in embedded and distributed systems, identity management, and network security.

Projeto Integrado de Controle de Pelotões baseado em Consenso e um Protocolo de Disseminação de Dados Confiável

Renê Oliveira¹, Carlos Montez¹, Michelle S. Wingham²

¹Depto de Automação e Sistemas – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

²Mestrado em Computação Aplicada – Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI)

rene.oliveira@posgrad.ufsc.br, carlos.montez@ufsc.br, wingham@univali.br

Abstract. *Automated and coordinated platoon driving involves theories of control, vehicle dynamics and vehicular communication. Due to a constant interaction between control logic and communication topology, a co-design approach to the controller and the communication protocol becomes necessary. This article introduces AddP-CACC – a consensus-based vehicle platoon solution, in which topology is a design parameter that can be exploited to reconfigure the controller, depending on the characteristics of the scenario. AddP-CACC was compared to other techniques, and the results show its robustness and ability to maintain a stable vehicle platoon in different communication topologies.*

Resumo. *A condução automatizada e coordenada de pelotões envolve teorias de controle, dinâmica dos veículos e comunicação veicular. Devido a uma constante interação entre a lógica de controle e a topologia de comunicação, uma abordagem de co-projeto para o controlador e o protocolo de comunicação torna-se necessária. Este artigo apresenta a AddP-CACC – uma solução para pelotões de veículos baseada no consenso, na qual a topologia é um parâmetro do projeto que pode ser explorado para reconfigurar o controlador, dependendo das características do cenário. A solução foi comparada a outras técnicas da literatura e os resultados obtidos comprovam sua robustez e capacidade em manter um pelotão veicular estável em diferentes topologias de comunicação.*

1. Introdução

As redes veiculares cumprem papel fundamental nos *Intelligent Transportation Systems* (ITS), suscitando pesquisas em aplicações associadas ao conforto, eficiência e segurança no tráfego [Lyamin et al. 2018]. A condução automatizada é uma área ativa de investigação que visa aumentar a segurança, reduzir congestionamentos e emissões de gases dos veículos. Nessa área de investigação, a implementação de pelotões inteligentes (*vehicle platooning*) que agrupam veículos visa ajustar automaticamente a velocidade de cada veículo de modo a manter uma distância segura entre eles.

Problemas semelhantes aos de controles de pelotões são encontrados em sistemas de controle via redes (NCS – *Networked Control Systems*) [Kheirandish et al. 2017]. Em ambos, o co-projeto do algoritmo de controle com o da rede de comunicação se mostra adequado e visa controlar o sistema e assegurar a estabilidade do sistema. No caso dos pelotões, essa estabilidade é caracterizada através do conceito denominado estabilidade em cadeia (*string stability*) [Schwartz et al. 2012], a qual considera a propagação de perturbações gerada por um veículo na direção dos veículos seguidores. Em um pelotão estável, um distúrbio não deve ser amplificado para os veículos seguidores.

Devido aos requisitos de tempo e confiabilidade das aplicações de controle de pelotão e às características das comunicações veiculares (diferentes densidades de rede, mudanças rápidas de topologias e desconexões frequentes), um protocolo de disseminação de dados confiável é crucial. Neste artigo é proposto o AddP-CACC – uma solução de controle para pelotões veiculares baseada em um algoritmo de consenso projetado especificamente para lidar com atrasos heterogêneos e variáveis no tempo da comunicação. O protocolo de disseminação confiável de dados AddP, proposto em [Oliveira et al. 2017], foi adaptado e integrado a um algoritmo de controle de pelotão.

A contribuição mais significativa deste artigo é a estratégia de controle cooperativo descentralizada baseada em consenso que, comparada aos trabalhos relacionados, é reconfigurável em tempo de execução e se adapta às condições da rede na presença de atrasos de comunicação. A abordagem de controle compensa automaticamente informações desatualizadas causadas por perdas e atrasos na rede. A avaliação do desempenho e da robustez da solução proposta, frente a perturbações na dinâmica do veículo líder e falhas de comunicação, foi conduzida neste trabalho por meio de simulações.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 contextualiza os tipos de automação veiculares e topologias de redes veiculares. A Seção 3 analisa os principais trabalhos relacionados. A Seção 4 apresenta a solução proposta e a Seção 5 descreve os resultados das simulações e os analisa. Finalmente, a Seção 6 conclui o trabalho com uma discussão sobre as contribuições e os trabalhos futuros.

2. Contextualização

Uma alternativa para aumentar o fluxo de veículos e evitar o congestionamento do tráfego é reduzir o espaçamento dos veículos através de um sistema automatizado [Elefteriadou 2013]. Para facilitar o desenvolvimento de sistemas de automação de veículos, a National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) definiu níveis distintos de automação [Hicks 2018]. O sistema de suporte de direção mais simples, com um certo nível de automação, é um controle longitudinal que mantém automaticamente um Cruise Control (CC) constante [Rajamani 2011]. O aprimoramento da tecnologia de controle de veículos deu origem ao sistema Adaptive Cruise Control (ACC). A distância entre veículos e a velocidade em relação ao veículo anterior são medidas usando sensores.

Sistemas ACC geralmente se concentram no conforto ao dirigir, e buscam manter uma distância de segurança comparável a de condutores humanos [Rajamani 2011]. A extensão do ACC, ao se acrescentar conectividade entre veículos e *Road Side Units* (RSUs), é denominada CACC (*Cooperative and Adaptive Cruise Control*). Veículos equipados com CACC não apenas medem a distância e a velocidade em relação ao veículo anterior, mas também podem se comunicar com outros veículos equipados com CACC por meio de uma rede sem fio. Informações adicionais obtidas por meio dessa rede de comunicação facilitam o projeto de controladores sofisticados que permitem distâncias mais curtas entre os veículos e, ao mesmo tempo, garantem a estabilidade do pelotão [Santini et al. 2015].

O projeto do controlador voltado aos pelotões veiculares depende da topologia de comunicação que determina o tipo de conexão lógica entre os veículos. São exemplos de topologias de comunicação: *Predecessor Following* (PF), *Predecessor-Leader Following* (PLF), *Bidirectional* (BD) e *Bidirectional-Leader* (BDL) [Zheng et al. 2016]. A topologia mais comumente usada é a PF, na qual o veículo seguidor considera apenas informações de seu antecessor, recebidas através de sensores ou através da rede veicular.

Na topologia do PLF, o líder se comunica diretamente com todos os veículos seguidores e todos os outros veículos também consideram as informações de seu antecessor para calcular suas ações de controle. Nesta topologia, o controlador pode levar em consideração dois sinais de erro à medida que cada veículo se comunica com seu antecessor e com o líder do pelotão. Na comunicação bidirecional (BD), cada veículo se comunica apenas com seus veículos predecessores e sucessores; enquanto na topologia do BDL, além da comunicação bidirecional, cada veículo se comunica diretamente com o líder do pelotão.

3. Trabalhos Relacionados

[Rajamani et al. 2000] propuseram um controlador de pelotões para o projeto PATH. O CACC-PATH é considerado um marco nessa área de pesquisa [Santini et al. 2017] e obteve resultados satisfatórios em simulações comparativas com abordagens mais recentes. O controlador utiliza a topologia PLF, porém, em estudos mais recentes foi utilizado com outras topologias como, BD e PF [Santini et al. 2017]. A solução proposta não trata atrasos na comunicação e não foi projetado para prover confiabilidade na comunicação.

[Wang et al. 2014] buscaram resolver o problema de consenso em pelotões veiculares, por meio de um controle longitudinal. O CACC proposto utiliza uma estratégia de controle de consenso não ponderada, mas restrita, sob a topologia de rede de comutação Markoviana. O trabalho analisou a estabilidade do pelotão formado, porém, não se preocupa em desenvolver uma solução de comunicação confiável para o sistema. Além disso, a topologia de comunicação é definida *a priori* durante todos experimentos.

Em [Öncü et al. 2014], os autores abordam o projeto que incorpora o efeito de atrasos na amostragem, que ocorrem devido à comunicação sem fio. Os experimentos avaliaram as propriedades de estabilidade do pelotão para variações de *headways* e atrasos na comunicação. Nos experimentos, foram utilizados apenas dois veículos, a topologia PLF e a troca de informação teve frequência de 25 Hz.

Os autores em [di Bernardo et al. 2016] propuseram um controle longitudinal de pelotões baseado em um problema de consenso de alta ordem para uma rede de agentes dinâmicos na presença de atrasos heterogêneos. A solução tem sua topologia definida *a priori* como PLF. Os experimentos foram realizados em um pelotão com três veículos. Neste cenário restrito, a solução foi eficaz ao manter o pelotão estável e foi capaz de atenuar a propagação de perturbações. No trabalho, a confiabilidade da comunicação entre os veículos não é considerada.

O trabalho [Zhang and Orosz 2016] investigou os efeitos de veículos com e sem CACC, pertencentes ou não ao pelotão, e atrasos de informação sobre a dinâmica de um pelotão veicular. A topologia utilizada foi a PLF e alguns aspectos da simulação foram simplificados, como os parâmetros de comportamento dos condutores, que foram uniformes e constantes. Por fim, o estudo comprovou ser possível prover estabilidade a um pelotão em certos cenários, entretanto, o controlador não foi capaz de evitar colisões entre os veículos pertencentes ao pelotão.

Em [Zheng et al. 2016], foi avaliada a influência das topologias BD e BDL com atraso fixo na estabilidade e escalabilidade de pelotões veiculares homogêneos. Um modelo linearizado da dinâmica longitudinal do veículo foi derivado usando a técnica de linearização exata por realimentação de estados, que acomoda o atraso inercial da dinâmica do veículo. Apenas simulações numéricas foram usadas na avaliação.

Em [Schwartz et al. 2012] foi proposto o protocolo de comunicação DOT. A abordagem foca no problema da escalabilidade em redes densas na presença de *beacons* periódicos. Já em [Chitra and Sathya 2016], os autores integraram a abordagem de controle presente em [Rajamani et al. 2000], com a solução de comunicação DOT. Os autores implementaram um pelotão com quatro veículos e topologia BD, contudo eles não investigaram o impacto que transmissões oriundas de veículos não pertencentes ao pelotão podem provocar em um cenário com alto fluxo de veículos.

O TESTCC [Santini et al. 2017] considera o pelotão como um problema de consenso de segunda ordem, que representa uma topologia de comunicação não fixa com atrasos variáveis no tempo. Os resultados obtidos mostraram que, o uso de um mecanismo de entrega confiável melhora a segurança geral do sistema, quando comparado a abordagens não adaptativas. A solução foi comparada com o ACC padrão e o CACC PATH [Rajamani et al. 2000] em um pelotão de oito veículos.

Em [Lyamin et al. 2018], foi investigado o impacto da implementação da Norma EN 302 637-2 na estabilidade de pelotões veiculares. O controlador usado é baseado em outras abordagens da literatura com algumas simplificações no modelo de controle, como a velocidade do pelotão ser constante, não haver distância mínima entre veículos e a reação dos condutores ser instantânea. Os autores concluíram que a norma estudada gera sobrecarga na rede por conta da disseminação de mensagens de controle, desta forma, eles defendem a implementação de controle de carga em cenários voltados aos pelotões.

No trabalho [Nunen et al. 2019], os autores propuseram uma solução de controle preditivo em combinação com um projeto de controle de *feedforward*. Essa solução é aplicada em um pelotão heterogêneo de veículos com topologia PLF. Os autores definem que as condições necessárias para que haja estabilidade no pelotão estudado sigam as condições operacionais nominais (sem frenagem de emergência, levando a situações inseguras e saturações de atuadores). No trabalho não são levadas em consideração métricas ligadas à confiabilidade na comunicação.

Na Tabela 1 é apresentada a comparação das abordagens descritas, considerando as seguintes características: (i) co-projeto (ganho do controlador de acordo com informações provenientes do protocolo de comunicação); (ii) topologia de comunicação escolhida; (iii) se o projeto do controlador leva em consideração atrasos na comunicação; (iv) quais fluxos veiculares foram usados nas experimentos realizados; e (vi) se a solução implementa algum mecanismo de controle de carga de mensagens de controle.

Todos os trabalhos analisados usam algum mecanismo de seleção de candidatos para a retransmissão de informação. Somente dois trabalhos investigaram seu desempenho em mais de uma topologia de comunicação e seis consideram o atraso na comunicação. As soluções pesquisadas não levam em consideração informações do protocolo de comunicação para o cálculo dos coeficientes de amortecimento e rigidez do controlador. Nenhum dos trabalhos analisou as abordagens de controle em cenários com fluxo veicular denso, e também nenhum deles implementa algum tipo de controle de carga para diminuir a quantidade de mensagens.

Na Tabela 1, as soluções mais relevantes, selecionadas por suas características ou pelo alto número de citações, são destacadas em negrito. Essas soluções foram simuladas e seus resultados comparados aos resultados obtidos com o AddP-CACC, na Seção 5.

Tabela 1. Comparação entre trabalhos relacionados

Trabalhos Seleccionados (ordem cronológica)	Co-projeto Parâmetros Variantes	Topologia de Com.	Atraso na Com.	Fluxo Veic. Útil.	Controle de Carga
[Rajamani et al. 2000]	Não	PLF	Não	N	Não
[Wang et al. 2014]	Não	PF	Sim	ME	Não
[Öncü et al. 2014]	Não	PLF	Sim	ME	Não
[di Bernardo et al. 2016]	Não	PLF	Não	ME	Não
[Zhang and Orosz 2016]	Não	PLF	Sim	N	Não
[Zheng et al. 2016]	Não	BD e BDL	Não	ME	Não
[Chitra and Sathya 2016]	Não	BD	Sim	E	Não
[Santini et al. 2017]	Não	PF, PLF e BD	Sim	N	Não
[Lyamin et al. 2018]	Não	PLF	Não	ME	Não
[Nunen et al. 2019]	Não	PLF	Sim	ME	Não
AddP-CACC	Sim	PF, PLF e BD	Sim	ME-D	Sim

Muito Esparso (ME): 500, 600 e 800 v/h, Esparsos (E): 1000 e 2000 v/h, Normal (N): 3000 e 4000 v/h e Denso (D): 5000 v/h.

4. Solução Proposta: AddP-CACC

Os elementos fundamentais de um sistema CACC são os nós da rede (veículos) e, neste artigo, assume-se que cada veículo possui uma identidade única baseada no endereço MAC do seu módulo de rede. Os veículos participantes possuem componentes que permitem a comunicação e execução de aplicações como; sensores, unidades de armazenamento, unidade de comunicação sem fio e sistema de posicionamento (GPS). Também é assumido que os eventos sempre podem ser detectados pelos sensores presentes nos veículos e que o GPS fornece precisão suficiente para se definir onde e quando ocorreram.

O objetivo geral deste artigo é descrever uma abordagem de co-projeto que fornece confiabilidade à comunicação e estabilidade para formações de pelotões de veículos. A solução proposta consiste de um protocolo de comunicação confiável integrado a um controle adaptativo e cooperativo baseado em consenso, onde o controlador lida com informações provenientes da rede de comunicação e sensoriamento. A estratégia proposta de controle de pelotões de veículos é baseada em princípios de cooperação que servem como parâmetros para garantir o consenso no grupo de veículos. Esta seção apresenta o protocolo de comunicação confiável, o modelo matemático utilizado para representar a dinâmica longitudinal de cada veículo pertencente ao pelotão, a metodologia usada para descrever a solução de controle e, por fim, o modelo de malha fechada que representa a dinâmica do erro de espaçamento entre os veículos de pelotão.

4.1. Protocolo de Comunicação: AddP

Para controlar um pelotão veicular, os veículos participantes devem trocar informações ao longo do caminho. Portanto, é necessário um protocolo de comunicação robusto e eficiente, focado na transmissão de dados para ambientes veiculares. Idealmente, esse protocolo deve ser totalmente integrado ao projeto de controle para que ele possa receber dinamicamente *feedback* sobre o comportamento da rede. O protocolo também deve atenuar questões como nó oculto, *broadcast storm*, alta latência e oferecer adaptabilidade a vários cenários com densidade veicular variável.

Com este objetivo, a solução proposta adaptou o protocolo de disseminação de dados confiável chamado AddP (*Adaptive Data Dissemination Protocol*)

[Oliveira et al. 2017]. O AddP utiliza a densidade, distância e direção dos nós vizinhos para selecionar os veículos que retransmitirão as mensagens de alerta. O AddP baseia-se em uma abordagem de *beacons* periódicos, as chamadas mensagens de consciência cooperativa (CAMs). A troca de *beacons* permite que os nós (veículos) notifiquem outros nós, que estão localizados a um salto de distância, de sua presença e seu *status*. Estes *beacons* contêm a identificação do veículo, a densidade local, a velocidade, a posição e a outras informações pertinentes a seus vizinhos. No entanto, quando ocorre congestionamento no canal (por exemplo, numa rede densa), é necessário reduzir a carga de *beacons* para manter uma certa quantidade de largura de banda disponível para as mensagens de aviso, porque transportam informações críticas de grande importância. Portanto, o AddP usa o mecanismo chamado de *Adaptative Beacon Congestion Control* para evitar sobrecarga na comunicação do pelotão e para garantir que a transmissão de um alerta no momento da frenagem seja realizada sem interferências.

Todos os veículos usam ainda o mecanismo *Disseminated Messages Monitoring* para verificar se um nó selecionado retransmitiu o aviso atual. Caso contrário, o vizinho transmite a mensagem de aviso. Esse mecanismo é usado para resolver o problema do nó oculto e aumentar a confiabilidade da disseminação em cenários de densidade esparsa.

4.2. Controle Cooperativo e Adaptativo

A ideia do controlador proposto é considerar o pelotão como um problema de consenso de alta ordem, responsável por uma topologia de comunicação não fixa com atrasos no tempo. O consenso distribuído é uma maneira de abordar os NCSs. Em um problema de consenso, todos os nós em uma rede devem chegar a um acordo. Ou seja, no estado estacionário todos devem convergir para o mesmo objetivo. No caso particular de um pelotão de veículos, busca-se ter a mesma distância entre pares de veículos consecutivos.

Ao considerar um pelotão com n veículos seguidores e um veículo líder, pode-se representar o fluxo de informação entre os seguidores por uma topologia de grafo direcionado $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, tal que $\mathcal{V} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ é o conjunto de n vértices e \mathcal{E} representa o conjunto de arestas que os conectam, dadas por $a_{ij} = (\alpha_i, \alpha_j)$. O vértice α_i representa o i -ésimo veículo do pelotão e cada aresta a_{ij} representa a existência de um canal de comunicação direcionado do veículo i para o veículo j . Para representar o fluxo de informações entre os seguidores e entre os seguidores e o líder, considera-se um grafo aumentado $\tilde{\mathcal{G}} = (\tilde{\mathcal{V}}, \tilde{\mathcal{E}})$, tal que $\tilde{\mathcal{V}} = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n\}$, no qual α_0 é o veículo líder.

4.2.1. Dinâmica Longitudinal do Veículo

Assumindo-se um modelo simplificado por meio da segunda lei de Newton, ao se mover no plano, um veículo sofre ação de forças externas, tais como: de arrasto, gravitacional, longitudinal dos pneus e de atrito dos pneus. Neste trabalho, foi usado o modelo definido por [Rajamani 2011] para retratar o torque no veículo proveniente dos seus atuadores. Também assume-se que cada veículo é dotado de uma lei de controle linearizante. Ao realizar as substituições e simplificações, o modelo linearizado para a dinâmica longitudinal do veículo é expresso como: $u(t) = \varsigma \dot{a}(t) + a(t)$, onde $a(t)$ é a aceleração do veículo; ς denota o atraso inercial do *powertrain*; e $u(t)$ é a entrada de controle. Ao escolher a posição de cada veículo $p_i(t)$, velocidade $v_i(t)$ e aceleração $a_i(t)$ como o estado, um modelo de terceira ordem é derivado para cada veículo: $\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t)$.

4.2.2. Política de Espaçamento

Ao considerar os parâmetros relativos a qualquer par de veículos no pelotão, a distância entre os dois veículos adjacentes (parados) pode ser expressa tanto em termos dos comprimentos dos veículos, quanto da distância de segurança requerida. A distância entre os veículos i e j pode ser reformulada em relação ao veículo principal como $\hat{d}p_{ij} = \hat{d}p_{i0} - \hat{d}p_{j0}$. Além disso, destaca-se que $dp_{ij} = -dp_{ji}$. Neste trabalho, assume-se que a distância desejada a se seguir é linearmente proporcional à velocidade do líder.

$$d_{ij} = h_{ij}v_0 + dp_{ij}, \quad (1)$$

e que o tempo de *headway* constante do veículo i com relação ao veículo j pode ser calculado a partir do tempo de *headway* em relação ao veículo líder $h_{ij} = h_{i0} - h_{j0}$ (por exemplo, com veículos em movimento na mesma velocidade constante).

4.2.3. Modelagem do Pelotão como Problema de Consenso

Ao considerar um pelotão veicular, o comportamento do i -ésimo veículo é matematicamente descrito como o seguinte agente inercial ($i = 1, \dots, n$):

$$\dot{p}_i(t) = v_i(t), \quad \dot{v}_i(t) = a_i(t) \quad e \quad \dot{a}_i(t) = \frac{-a_i(t) + u_i(t)}{\zeta}, \quad (2)$$

onde $p_i(t)$ (m), $a_i(t)$ (m/s²) $v_i(t)$ (m/s) e $u_i(t)$ indicam que a entrada de controle deve ser escolhida apropriadamente para alcançar a posição desejada, a manutenção da velocidade e as manobras de frenagem.

O modelo linear de veículo da Equação 2 pode ser derivado ao aplicar a linearização *input-output* (I/O) para simplificar a complexidade do modelo que descreve a dinâmica longitudinal de veículo. Por fim, o vetor de estado do i -ésimo veículo é definido como $x_i(t) = [x_i^{(1)}(t), x_i^{(2)}(t), x_i^{(3)}(t)]^\top = [p_i(t), v_i(t), a_i(t)]^\top \in \mathbb{R}^2$. Ao supor que o pelotão tenha que se mover com uma velocidade constante de referência, v_0 , a dinâmica de referência do líder pode ser descrita como:

$$\dot{p}_0(t) = v_0(t), \quad \dot{v}_0(t) = a_0(t) \quad e \quad \dot{a}_0(t) = 0. \quad (3)$$

Pode-se definir como $x_0(t) = [p_0(t), v_0, a_0]^\top \in \mathbb{R}^2$ o vetor de estado líder. Dadas as Equações 2 e 3, o problema de manter uma política de espaçamento interveicular desejada e uma velocidade comum do pelotão de veículos pode ser reescrito como um problema de consenso de terceira ordem. O objetivo do controle do pelotão é manter a mesma velocidade do líder e manter um espaço desejado entre veículos:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} |v_i - v_0| = 0 \quad e \quad \lim_{t \rightarrow +\infty} |p_i - p_{i-1} - d_{ii-1}| = 0 \quad (4)$$

onde d_{ii-1} representa a distância desejada entre o veículo i e o veículo $i - 1$. A distância desejada d_{ii-1} pode ser expressa ao utilizar o tempo de *headway* h_{ii-1} e a distância de paragem dp_{ii-1} , como mostrada na Equação 1. A síntese do controlador local para o nó i só pode usar as informações dos nós no conjunto $\mathcal{I}_i = \mathcal{C}_i \cup \mathcal{P}_i$. Para definir a lei de controle, pode-se assumir que a comunicação é ideal, desta forma, tem-se o seguinte controle local para o veículo i :

$$u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}} [k_p(p_i - p_j - d_{i,j}) + k_v(v_i - v_j) + k_a(a_i - a_j)], \quad (5)$$

no qual k_p , k_v e k_a são coeficientes de rigidez e amortecimento a serem oportunamente ajustados para regular o comportamento entre os veículos vizinhos. Por fim, pode-se representar a forma compacta da Equação 5, por:

$$u_i = -k^\top \sum_{j \in \mathcal{I}} (x_i - x_j), \quad i = 1, \dots, n, \quad (6)$$

onde $k = [k_p, k_v, k_a]^\top$ é um vetor contendo os ganhos do controlador, $x_i(t) = [p_i, v_i, a_i]^\top$ é o vetor dos estados de cada veículo e $u_i(t)$ a lei de controle. Para tentar obter uma sintonia de controlador que apresente o desempenho desejado no cenário de referência, recorreu-se à sintonia por tentativas e erros. Os ganhos foram definidos de acordo com os intervalos de atrasos possíveis no cenário (0 μs a 10 μs). Os valores para k_p , k_v e k_a foram definidos de acordo com:

$$k_p = \begin{cases} 0.9, & \text{if } 0 \mu s \leq \tau \leq 2 \mu s \\ 1, & \text{if } \tau > 2 \mu s \end{cases}, \quad k_v = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \mu s \leq \tau \leq 2 \mu s \\ 0.7, & \text{if } \tau > 2 \mu s \end{cases} \quad \text{and} \quad k_a = \begin{cases} 1, & \text{if } \tau \geq 0 \end{cases}. \quad (7)$$

4.3. Dinâmica do Pelotão

Para analisar a dinâmica de formação do pelotão, é definido um vetor de estados composto pelos erros dos estados dos veículos em relação ao líder:

$$\bar{x}_i(t) = \begin{bmatrix} \bar{p}_i(t) \\ \bar{v}_i(t) \\ \bar{a}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_i(t) - p_i^*(t) \\ v_i(t) - v_0(t) \\ a_i(t) - a_0(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

onde $p_i^*(t) = p_0(t) - d_{0i} = p_0(t) - h_{0i}v_0 - dp_{0i}$ é a posição desejada do veículo i . Diante disso, a lei de controle de cada veículo pode ser definida como:

$$u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}_i} [k_p(p_i(t) - p_i^*(t) - p_j(t) - p_j^*(t)) + k_v(v_i(t) - v_0(t) - v_j(t) - v_0(t)) + k_a(a_i(t) - a_0(t) - a_j(t) - a_0(t))] \quad (9)$$

Ao utilizar o vetor de estados composto pelos erros dos estados dos veículos em relação ao líder (Equação 8) e realizar as simplificações possíveis, tem-se:

$$u_i = -k^\top \sum_{j=1}^n [a_{ij}(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + \varphi_i(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_0(t))]. \quad (10)$$

Desta forma, a dinâmica de erro em malha-fechada do i -ésimo veículo é expressa por $\dot{\bar{x}}_i(t) = A\bar{x}_i(t) + Bu_i(t)$. Ao substituir $u_i(t)$ na dinâmica de erro em malha-fechada, pela Equação 10, tem-se:

$$\dot{\bar{x}}_i(t) = A\bar{x}_i(t) + Bk^\top \sum_{j=1}^n [a_{ij}(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + \varphi_i(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_0(t))]. \quad (11)$$

Para avaliar a influência do atraso de comunicação na dinâmica do pelotão é apresentado o modelo matemático para a dinâmica do erro na formação de um pelotão sujeito a atraso na comunicação. Ao analisar a lei de controle representada pela Equação 5, nota-se que o veículo i necessita dos valores em tempo real da posição, velocidade e aceleração dos veículos adjacentes que se comunicam com i . Entretanto, no caso da existência de atraso de comunicação entre os veículos, a lei de controle (Equação 5), passa a ser representada pela Equação 12:

$$u_i = - \sum_{j \in \mathcal{I}} [k_p(p_i(t) - p_j(t - \tau_{ij}) - d_{ij}) + k_v(v_i(t) - v_j(t - \tau_{ij})) + k_a(a_i(t) - a_j(t - \tau_{ij}))], \quad (12)$$

onde τ representa o atraso variável na comunicação, que afeta o i -ésimo veículo quando a informação é transmitida de seu vizinho j e do líder do pelotão, respectivamente.

O atraso $\tau_{ij}(t)$ pode ser considerado entre um valor máximo e mínimo, por exemplo $0 \leq \tau_{ij}(t) \leq \tau_{max}$ ($\tau_{ij}(t)$ é uma função contínua por partes). Pode-se observar que

algumas das informações transmitidas, como o estado do veículo anterior, podem estar disponíveis a partir de medições realizadas por sensores a bordo. A entrega dessas informações não será afetada por atrasos sensíveis, e pode-se assumir $\tau_{ij}(t) = 0$. Além disso, embora o atraso $\tau_{ij}(t)$ seja desconhecido, pode ser detectado e avaliado de forma local em todos os veículos do pelotão, já que os nós recebem *beacons* com o *timestamp* relativo \bar{t} , que representa o instante em que a informação é medida.

Como visto anteriormente, a dinâmica de erro em malha-fechada do i -ésimo veículo é definida por $\dot{\bar{x}}_i(t) = A\bar{x}_i(t) + Bu_i(t)$. Realizando substituições e simplificações:

$$\dot{\bar{x}}_i = A\bar{x}_i - Bk^\top \sum_{j=1}^n [a_{ij}(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + \varphi_i(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_0(t)) + a_{ij}(x_j(t) - x_j(t - \tau)) + \varphi_i(x_i(t) - x_i(t - \tau))] \quad (13)$$

Por fim, a dinâmica do erro sob atraso em malha-fechada, de acordo com os apontamentos feitos na Seção 4.2, pode ser expressa pela Equação 14.

$$\dot{\bar{X}}(t) = [I_N \otimes A - (\mathcal{L} + \mathcal{P}) \otimes Bk^\top] \bar{X}(t) - [(A + \mathcal{P}) \otimes Bk^\top] \int_{-\tau}^0 \dot{\bar{X}}(t + s) ds. \quad (14)$$

5. Simulação e Análise dos Resultados

Esta seção descreve o projeto de experimentos realizados para avaliar a solução proposta e apresenta os resultados das simulações com suas respectivas análises. O objetivo dos experimentos foi comparar a AddP-CACC com as soluções selecionadas na Seção 3. Nesse sentido, uma aplicação EEBL (*Emergency Electronic Brake Light*) foi implementada. A avaliação é dividida em duas partes. Inicialmente, a solução proposta AddP-CACC é comparada a outras soluções no que diz respeito a comunicação confiável para VANETs. Em seguida, a AddP-CACC é avaliada a fim de verificar seu desempenho diante do controle de um pelotão veicular.

5.1. Parâmetros de simulação e mobilidade

Um segmento da rodovia BR-101 no sul do Brasil foi modelado, consistindo em uma via com duas pistas para cada direção e comprimento de 5 km. O tráfego diário normal neste trecho é de 60 mil veículos. Em todos os experimentos, os dados são coletados somente após 500 segundos, que é considerado o tempo necessário para o cenário ser preenchido.

Nas experiências, foi utilizado o simulador de rede baseado em eventos OM-NeT++ acoplado bidirecionalmente com o simulador de tráfego SUMO (Simulation of Urban Mobility). Foram definidos três tipos de veículos. O pelotão veicular foi constituído por dez carros e com 1 segundo de *headway*. A distância de paragem foi definida para 10 metros e a constante inercial $\varsigma = 0,5$. Os estilos de direção foram escolhidos aleatoriamente dentro de limites aceitáveis. O parâmetro de imperfeição do condutor foi definido usando valores diferentes para a velocidade desejada [Oliveira et al. 2017]. Nas experiências, optou-se por variar as velocidades máximas do veículo (50, 70, 90 e 110 km/h). Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de simulação usados para definir os módulos do *framework* Veins nos experimentos.

Em todos os cenários simulados de rodovias, havia duas RSUs responsáveis pela propagação de alertas para veículos que não os receberam pela via convencional. Uma delas foi posicionada no início do primeiro quilômetro e a outra no início do terceiro quilômetro. Foram definidos cenários com diferentes fluxos de veículos, simulando, por exemplo, tráfego normal (3000 veículos/hora) e tráfego denso (5000 veículos/hora)¹.

¹O tráfego diário e os volumes de fluxos de tráfego foram obtidos na Polícia Rodoviária Federal em 2017.

Tabela 2. Parâmetros de simulação (Veins)

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
MAC Layer	IEEE 802.11p/1609.4	Tamanho do <i>Beacon</i>	32 bytes
Frequência	5.89 GHz	Atraso Máximo τ_{max}	10 μs
Raio de transmissão	256 metros	Modelo de propagação	Two-ray interference
Força do sinal / Taxa de bits	2 mW / 18 Mbps	Modelo de desvanecimento	Nakagami- m
Quantidade de repetições	33 vezes	Tempo de simulação	15 min

5.2. Avaliação do Desempenho do Protocolo de Comunicação

Devido à limitação de espaço, neste artigo apenas duas métricas de desempenho são apresentadas: total de *beacons* (TB), que é o total de mensagens de controle enviadas; e taxa de sucesso (TS), que é a porcentagem de veículos que receberam as mensagens enviadas com sucesso.

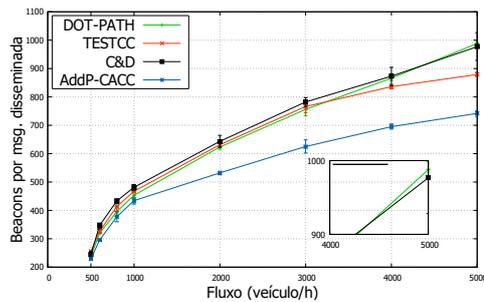


Figura 1. Beacons enviados (TB)

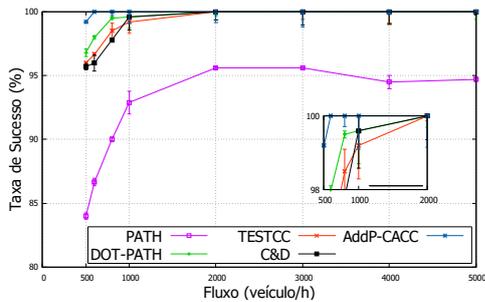


Figura 2. Taxa de sucesso (TS)

A Figura 1 ilustra o total de *beacons* transmitidos por todos os veículos assumindo diferentes fluxos de tráfego. Diferentemente de outras abordagens, por não possuir mecanismo de controle de carga, a solução PATH atingiu valores superiores a 2000 *beacons* por mensagem disseminada, desta forma, seus resultados não são apresentados. À medida que o fluxo de veículos aumenta, o AddP-CACC impõe uma menor quantidade de mensagens de controle transmitidas por veículo pois ajusta o tempo entre as retransmissões de *beacons* com base na densidade do nó para evitar o problema de *broadcast storm*.

Na Figura 2, é apresentada a taxa de sucesso para todas as abordagens sob diferentes fluxos de tráfego. Quando comparado com as abordagens DOT-PATH, TESTCC, Connect & Drive e PATH, AddP-CACC é a solução com melhor desempenho mesmo em cenários esparsos. Tais resultados podem ser explicados pelo fato de que o protocolo de comunicação do AddP-CACC usa o mecanismo *Disseminated Messages Monitoring* para transmitir as mensagens de aviso não entregues no caso de uma partição de rede ou um problema de nó oculto. Em cenários densos, o comportamento de AddP-CACC, DOT-PATH, Connect & Drive e TESTCC são semelhantes (cobertura de 100 %).

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o AddP-CACC é uma solução adequada para a aplicações de pelotões, as quais requerem entrega confiável de dados em diferentes densidades de rede, e que são sensíveis ao atraso.

5.3. Avaliação do Desempenho do Controlador

Nas experiências realizadas nesta seção, a topologia PLF foi adotada, por permitir que os veículos recebam comunicação tanto do líder como, também, de seus antecessores no cálculo da ação de controle.

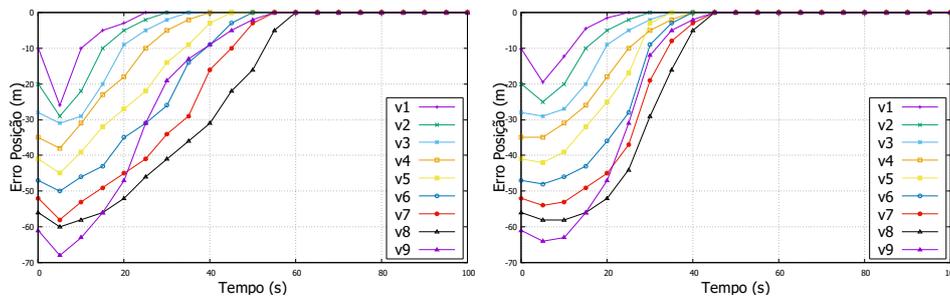


Figura 3. Erros de posicionamento de veículos no pelotão. (a) Fluxo: 3000 veículos/hora; (b) Fluxo: 5000 veículos/hora

5.3.1. Comportamento em Cenários de Tráfego Normal e de Alta Densidade

Em um primeiro cenário, o objetivo é observar se o AddP-CACC fornece consenso entre os veículos de pelotão. O líder mantém velocidade constante e os seguidores tentam alcançar o espaçamento desejado entre veículos. Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados. É possível confirmar a capacidade do controlador de fornecer consenso e manter o pelotão estável. É importante notar que o AddP-CACC controla a carga, mesmo em uma rede com alta densidade, para que a comunicação no pelotão permaneça estável.

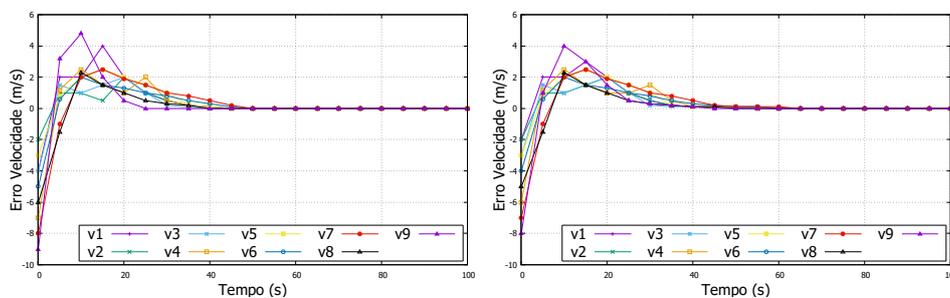


Figura 4. Erros na velocidade do pelotão de veículos comparada com a do líder. (a) Fluxo: 3000 veículos/hora; (b) Fluxo: 5000 veículos/hora

No segundo cenário, verificou-se se os veículos são capazes de acompanhar a velocidade do veículo líder. O líder acelera e desacelera para alterar sua velocidade de cruzeiro e os seguidores devem alterar corretamente sua velocidade. Na Figura 5, o líder acelera para 30,6 m/s com uma aceleração constante de 3 m/s² e todos os seguidores mudam corretamente seu comportamento, alcançando consenso sobre a velocidade.

Em um terceiro cenário, o veículo líder é forçado a desacelerar de 30,6 m/s para 0 m/s (parada completa) para simular uma manobra de frenagem. Os veículos iniciam a simulação com uma distância entre para-choques de 35 metros. Após o veículo líder realizar a frenagem, os veículos seguidores devem manter uma distância de 10 metros.

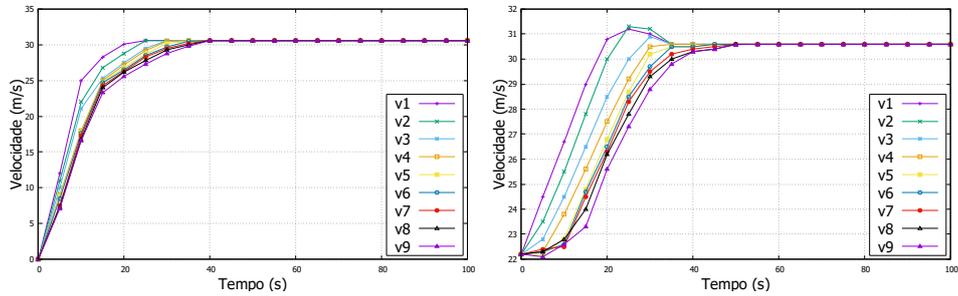


Figura 5. Velocidades ao seguir o líder. (a) 3000 veículos/hora; (b) 5000 veículos/hora

Os resultados apresentados na Figura 6, indicam que todos os veículos param de forma segura e convergem para uma distância de 10 m.

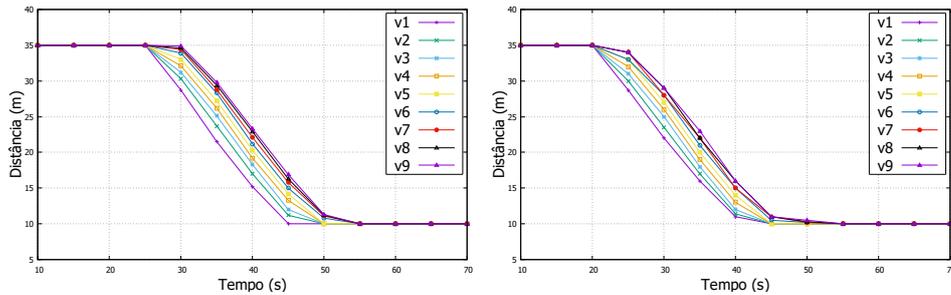


Figura 6. Distância entre para-choques. (a) 3000 veículos/hora; (b) 5000 veículos/hora

No quarto cenário, foi avaliado o consenso da solução proposta, por meio de um distúrbio sinusoidal. O líder acelera e desacelera para formar uma perturbação sinusoidal em torno da velocidade média de $30,6 \text{ m/s}$ [Santini et al. 2015]: $\delta(t) = A \cos\left(\frac{6}{100}\pi t\right)$, onde $A = 2,7 \text{ m/s}$. Na Figura 7 são ilustradas as distâncias entre veículos. Observa-se que a perturbação sinusoidal é atenuada a jusante do pelotão veicular, e a oscilação já é quase imperceptível no veículo $v4$.

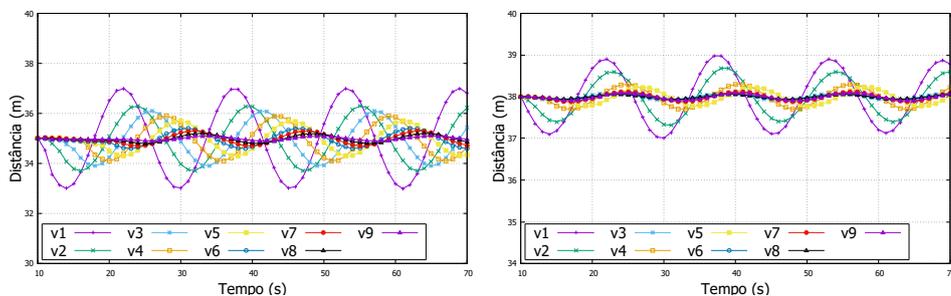


Figura 7. Distúrbios senoidais sobre a velocidade do líder. (a) 3000 veículos/hora; (b) 5000 veículos/hora

5.3.2. Comparação entre abordagens de controle

Nesta seção avaliou-se o desempenho da AddP-CACC diante de outras abordagens, comparando-as em termos de estabilidade em cadeia sob o modelo de propagação Two-Ray Interference que captura tanto a atenuação do sinal, quanto os efeitos de reflexão do solo. Também foi levado em consideração o desvanecimento distribuído Nakagami- m .

Comparou-se as abordagens por meio de uma medida frequentemente usada na verificação da acurácia de modelos numéricos que é o Erro Quadrático Médio (EQM). O EQM é mais sensível aos grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado, assim busca evitar o cancelamento de erros com sinais diferentes. Por meio dos dados obtidos por simulação, o EQM foi calculado para cada solução (e topologias de comunicação). Um comparativo entre as abordagens é apresentado na Figura 8. A solução proposta AddP-CACC apresenta menor erro quadrático médio relacionado à velocidade nos pontos observados e nas três topologias de comunicação implementadas.

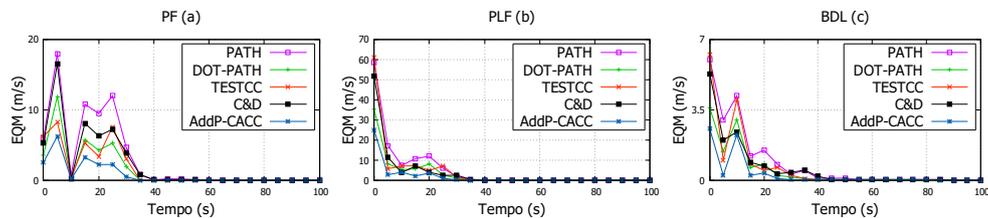


Figura 8. Comparação entre abordagens segundo o EQM. (Fluxo: 3000 veículos/hora)

6. Conclusões

Um dos pontos estudados neste artigo foi a comunicação em VANETs e os problemas existentes que podem inviabilizar o controle longitudinal de um pelotão. Foi proposta uma solução que adapta o intervalo entre mensagens de controle de acordo com o fluxo veicular. Também foi proposta uma solução de controle cooperativo descentralizado baseado em consenso na qual, ao contrário das abordagens da literatura, a topologia da comunicação é configurável. Um dos benefícios é a capacidade de adaptar o padrão de comunicação às características da rede. A abordagem foi analisada em cenários desafiadores, incluindo distúrbios de rede, mostrando suas características de robustez, estabilidade e convergência. Como trabalhos futuros, sugere-se estender a solução proposta para que este possa ser adaptado para outros tipos de aplicações de segurança no trânsito e cenários (urbano, por exemplo).

Referências

- Chitra, M. and Sathya, S. S. (2016). Bidirectional data dissemination in vehicular ad hoc networks using epidemic spreading model. In *Proc. of the International Conference on Informatics and Analytics, ICIA-16*, pages 57:1–57:8, New York, NY, USA. ACM.
- di Bernardo, M., Falcone, P., Salvi, A., and Santini, S. (2016). Design, analysis, and experimental validation of a distributed protocol for platooning in the presence of time-varying heterogeneous delays. *IEEE Trans. on Contr. Systems Tech.*, 24(2):413–427.
- Eleftheriadou, L. (2013). *An Introduction to Traffic Flow Theory*. Springer Optimization and Its Applications. Springer New York.

- Hicks, D. J. (2018). The safety of autonomous vehicles: Lessons from philosophy of science. *IEEE Technology and Society Magazine*, 37(1):62–69.
- Kheirandish, F., Ekramian, M., and Ataei, M. (2017). Stability analysis of networked control systems with time varying delays. In *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pages 633–638.
- Lyamin, N., Vinel, A., Jonsson, M., and Bellalta, B. (2018). Cooperative awareness in VANETs: On ETSI EN 302 637-2 performance. *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, 67(1):17–28.
- Nunen, E., Reinders, J., Semsar-Kazerooni, E., and van de Wouw, N. (2019). String stable model predictive cooperative adaptive cruise control for heterogeneous platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 4(2):186–196.
- Oliveira, R., Montez, C., Boukerche, A., and Wangham, M. S. (2017). Reliable data dissemination protocol for vanet traffic safety applications. *Ad Hoc Networks*, 63:30 – 44.
- Rajamani, R. (2011). *Vehicle Dynamics and Control*. Mechanical Engineering Series. Springer US.
- Rajamani, R., Han-Shue Tan, Boon Kait Law, and Wei-Bin Zhang (2000). Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons. *IEEE Trans. on Cont. Systems Technology*, 8(4):695–708.
- Santini, S., Salvi, A., Valente, A. S., Pescapè, A., Segata, M., and Cigno, R. L. (2015). A consensus-based approach for platooning with inter-vehicular communications. In *2015 IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*, pages 1158–1166.
- Santini, S., Salvi, A., Valente, A. S., Pescapè, A., Segata, M., and Cigno, R. L. (2017). A consensus-based approach for platooning with intervehicular communications and its validation in realistic scenarios. *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, 66(3):1985–1999.
- Schwartz, R. S., Das, K., Scholten, H., and Havinga, P. (2012). Exploiting beacons for scalable broadcast data dissemination in vanets. In *Proceedings of the Ninth ACM International Workshop on Vehicular Inter-networking, Systems, and Applications, VANET '12*, pages 53–62, New York, NY, USA. ACM.
- Wang, L. Y., Syed, A., Yin, G. G., Pandya, A., and Zhang, H. (2014). Control of vehicle platoons for highway safety and efficient utility: Consensus with communications and vehicle dynamics. *Journal of Systems Science and Complexity*, 27(4):605–631.
- Zhang, L. and Orosz, G. (2016). Motif-based design for connected vehicle systems in presence of heterogeneous connectivity structures and time delays. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(6):1638–1651.
- Zheng, Y., Li, S. E., Wang, J., Cao, D., and Li, K. (2016). Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: Study on the influence of information flow topologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(1):14–26.
- Öncü, S., Ploeg, J., van de Wouw, N., and Nijmeijer, H. (2014). Cooperative adaptive cruise control: Network-aware analysis of string stability. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(4):1527–1537.

APÊNDICE B – REVISÃO SISTEMÁTICA

Uma revisão sistemática de literatura é um meio para identificar, interpretar e avaliar todos os resultados relevantes de uma pesquisa acerca de uma questão, área ou fenômeno em particular. Utilizando uma metodologia rigorosa e que possa ser reproduzida posteriormente. A revisão sistemática tem por objetivo apresentar uma avaliação concisa a respeito de um tópico (KITCHENHAM; CHARTERS, 2007). A revisão é dividida em introdução, metodologia, resultados e conclusão.

B.1 INTRODUÇÃO

O principal questionamento deste trabalho é de como prover estabilidade a um pelotão diante de topologias variáveis, falhas e atrasos na comunicação, por meio de um controle cooperativo descentralizado baseado em consenso. Por ser uma área multidisciplinar e complexa, os problemas existentes no âmbito veicular acabam sofrendo simplificações em outros aspectos, principalmente relacionado a rede de comunicação. Com isto em mente, não foi idealizado apenas o estudo da rede e pelotões veiculares, mas sim em como o simular, estruturar, validar e testar os mecanismos e abordagens. Este raciocínio leva a outros questionamentos:

- É possível adaptar métodos e técnicas existentes para outros tipos de simulação e cenários?
- Existem trabalhos focados em métodos específicos para problemas relacionados à pelotões veiculares, controle e rede?
- Quais parâmetros e métodos de avaliação utilizados por trabalhos nas áreas de controle de pelotões veiculares e redes de comunicação?
- É possível integrar ou relacionar estes parâmetros/avaliações?

É importante mencionar que a revisão sobre ferramentas de simulação e implementação, foram realizadas anteriormente sem utilizar um método sistemático. Ambas foram consideradas suficientes, dado ao fato que as técnicas em si não são o foco deste trabalho, e sim o método para implementação, verificação, validação e testes de simulações. As técnicas são utilizadas como ferramentas para exemplificar a implementação do método, podendo ser escolhidas de acordo com uma necessidade ou situação em especial.

B.2 METODOLOGIA

As bases de dados utilizadas para pesquisa foram a IEEE Xplore, Elsevier e a Google Scholar, sendo a primeira a principal fonte de pesquisa e as outras utilizadas

como complementos. A busca associada aos questionamentos foi limitada a um foco inicial, alinhada com os equipamentos disponibilizados na UFSC e com o foco da pesquisa do programa de pós-graduação da UFSC. Portanto, limitou-se a pesquisa à redes veiculares, comunicação confiável sem fio, controle cooperativo e adaptativo voltado a pelotões veiculares e manteve-se o foco em simulações bidirecionalmente acopladas. Os critérios de pesquisa foram adicionados conforme a quantidade de artigos relacionados foram encontrados, com objetivo de reduzir o total de artigos. Este processo foi necessário dado que o assunto possui termos comuns e que envolvem diversas áreas, dificultando localizar artigos relevantes ao trabalho. São utilizados três operadores na pesquisa do IEEE Xplore, '+' para indicar que os resultados devem conter o termo associado, '-' para remover qualquer artigo que contenha o termo associado e aspas (" ") para indicar que o termo associado deve ser idêntico ao descrito no interior das aspas, incluindo espaços e símbolos.

As principais buscas são listadas nas tabelas no item B.3, na qual a cada linha subsequente é adicionado os termos listados. É indicado a quantidade de artigos encontrados à direita. Ao final de cada pesquisa é utilizado um protocolo de inclusão/exclusão, no qual primeiramente foram lidos os títulos e resumos, selecionando os artigos relevantes à área da busca. Ainda, foram incluídos os artigos com assuntos relacionados diretamente ao trabalho, artigos que possuíam apresentação de resultados com critérios para seleção de parâmetros de simulação, artigos que possuíam critérios de avaliação e também de áreas semelhantes que poderiam fornecer *insights* sobre o trabalho.

B.3 RESULTADOS

Os principais resultados das buscas na base IEEE Xplore são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Terminologia e quantidade de artigos encontrados na busca utilizando a IEEE Xplore

Termos	Resultados
+consensus+control	7004
+VANETs	6828
+reliable+dissertation	2655
+NCS	1970
+platoon	1437
+cruise+control	1436
+string+stability	628
+CACC	207
Após leitura dos resumos	36

Também foram realizadas pesquisas com algumas variações de termos, mas não obtiveram resultados significativos e foram omitidas neste anexo por razão de não prolongar demasiadamente o assunto. No entanto, houve alguns artigos encontrados em outros mecanismos de busca (Elsevier e a Google Scholar), sendo indicados os termos e quantidade de artigos encontrados, na Tabela 13.

Tabela 13 – Terminologia e quantidade de artigos encontrados em outros mecanismos de busca

Termos	Resultados
networked control system NCS co-simulation	8522
co-design	6652
verification validation networked control system NCS analysis	6430
wireless	675
Refinar Resultados 2011 - 2019	436
VANET	239
Após leitura dos resumos	12

Após a etapa inicial da busca, foram escolhidos os 48 artigos mencionados nas Tabelas 12 e 13, e mais 4 encontrados em buscas menores, totalizando uma base inicial de 52 artigos. Em seguida, foram consultadas as referências utilizadas nestes artigos e pesquisados trabalhos relacionados dos mesmos autores, somando mais 42 artigos e totalizando 94 artigos. Destes 94, 12 foram eliminados após leitura completa do artigo, reduzindo a 82 artigos.

Os artigos foram separados em 13 categorias conforme seu assunto principal:

1. VANETs;
2. Pelotões Veiculares;
3. OMNeT++ e Plexe;
4. CC;
5. ACC;
6. CACC;
7. Simulação;
8. Consenso;
9. Disseminação Confiável;
10. ITS;

11. Dinâmica Veicular;
12. Estabilidade em Cadeia;
13. Controle de Topologia; e
14. Outros.

Dentre os artigos que já haviam sido pesquisados na revisão não sistemática, 19 foram reanalisados sob esta ótica e foram incluídos nas referências bibliográficas. Desta forma, o total de artigos selecionados na primeira revisão sistemática é de 97 documentos. Ao longo da pesquisa, a base de referência utilizando 101 artigos foi ampliada, incluindo livros, sites e novos artigos publicados em 2019. Ao final da tese, foram contabilizadas mais de 200 referências na tese.

B.4 CONCLUSÃO

Neste anexo foram descritas as principais buscas realizadas em respeito ao tema do trabalho. A etapa de preparar o resumo crítico sobre as obras também foi realizada e adaptada para a introdução da tese e nos capítulos relacionados. Durante as pesquisas foram encontrados termos que auxiliaram na busca de mais trabalhos relacionados, como por exemplo, os termos “*gain scheduling control*” e “*rendezvous*”. Estes e outros termos, foram posteriormente utilizados nas pesquisas, aumentando significativamente o acervo de referências. Os artigos apontaram para um campo científico a ser explorado.

APÊNDICE C – INSTALAÇÃO DE SOFTWARES

C.1 INSTALAÇÃO DO OMNET++

O OMNeT++ é a parte central da estrutura de simulação de rede fornecida pela Veins. Aqui, considerou-se a Versão 5.3. Para instalar o OMNeT++ deve-se primeiro instalar algumas bibliotecas. Em um sistema Linux, deve-se digitar:

- `$ sudo apt-get install bison flex tk8.5-dev`

Em seguida, é preciso incluir a pasta bin do OMNeT++ em seu caminho, adicionando ao seu `.bash_rc` ou `.profile`

- `export PATH=$PATH:$HOME/src/omnetpp-5.3/bin`

Depois de realizar o download do OMNeT++ (IDE) proveniente do site oficial, extraia e compile-o com:

1. `$ cd`
2. `$ tar xzf omnetpp-5.3-src.tgz`
3. `$ cd omnetpp-5.3`
4. `$./configure`
5. `$ make`

Todas as informações necessárias para saber como trabalhar com esta ferramenta podem ser encontradas no site do OMNeT++.

C.2 DOWNLOAD DA EXTENSÃO PLEXE

O código-fonte da extensão Plexe pode ser baixado em um arquivo tar.bz2 no site oficial da PLEXE ou por meio do repositório público. No site existem dois arquivos para serem baixados, `plex-veins-1.1.tar.bz2` e `plex-sumo-1.1.tar.bz2`, que contêm versões modificadas do Veins e SUMO, respectivamente. Ao fazer o download, coloque e extraia-os na pasta de origem digitando no terminal.

1. `$ cd`
2. `$ cd src`
3. `$ tar xjf plex-veins-1.1.tar.bz2`
4. `$ tar xjf plex-sumo-1.1.tar.bz2`

C.3 COMPILAR SUMO

O procedimento é semelhante para sistemas Linux e Mac OS, mas com algumas pequenas diferenças nos comandos. O SUMO depende de algumas bibliotecas de terceiros que podem ser instaladas em uma máquina Linux com:

- `$ sudo apt-get install libgdal-dev libproj-dev \ libxerces-c-dev libfox-1.6-dev libtool \ autoconf`

Depois de instalar as dependências, o SUMO pode ser configurado:

1. `$ cd /src/plexe-sumo`
2. `$ make -f makefile.cvs`
3. `$./configure`

Em ambos os sistemas, o SUMO pode ser construído simplesmente digitando `make` na linha de comando. A etapa final é adicionar o diretório bin SUMO ao seu PATH. Adicione ao seu `.bash_rc`

- `export PATH=$PATH:$HOME/src/plexe-sumo/bin`

Agora é possível executar o SUMO digitando `sumo` ou `sumo-gui` para a linha de comando e a versão da GUI, respectivamente.

C.4 COMPILAR PLEXE VEINS

Para compilar o Plexe Veins basta digitar o seguinte na linha de comando:

1. `$ cd /src/plexe-veins`
2. `$ make -f makemakefiles MODE=release`
3. `$ make MODE=release`