



**Lauro de Lacerda Caetano**

**Formação de comboios veiculares dinâmicos:  
uma abordagem de auto-organização**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Carlos José Pereira de Lucena

Rio de Janeiro  
Setembro de de 2019



**Lauro de Lacerda Caetano**

**Formação de comboios veiculares dinâmicos:  
uma abordagem de auto-organização**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Carlos José Pereira de Lucena**

Orientador

Departamento de Informática – PUC-Rio

**Prof. Markus Endler**

Departamento de Informática – PUC-Rio

**Prof. Ricardo Choren Noya**

Seção de Engenharia da Computação – Instituto Militar de Engenharia

Rio de Janeiro, 25 de Setembro de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Lauro de Lacerda Caetano**

Formado Bacharel em Sistemas de Informação pelo Instituto Federal Fluminense com bolsa de extensão sanduíche na University of Portsmouth, Reino Unido. Também é técnico em Informática Industrial pelo IFF Campos/RJ.

#### Ficha Catalográfica

Caetano, Lauro de Lacerda Caetano

Formação de comboios veiculares dinâmicos: uma abordagem de auto-organização / Lauro de Lacerda Caetano; orientador: Carlos José Pereira de Lucena. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Informática, 2019.

v., 101 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui bibliografia

1. Auto-organização. 2. Sistemas Autônomos. 3. Gerenciamento de Comboios Veiculares. I. Lucena, Carlos José Pereira de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

## Agradecimentos

Agradeço a Deus, que me proporcionou a vida e me agraciou com o jeito curioso e a vontade de conhecer sobre o mundo.

Ao professor Carlos Lucena, meu orientador e minha referência como pesquisador, com quem tive oportunidade de aprender e desenvolver o meu trabalho.

Aos estimados professores do Departamento de Informática da PUC-Rio, que são fonte inexaurível de conhecimento e generosidade.

À minha querida família, por me incentivarem a crescer como ser humano.

À minha noiva e sua família, pelo carinho e suporte em diversas circunstâncias. Sem vocês eu não poderia realizar este mestrado.

Aos amigos da pós-graduação, pelas suas contribuições ao meu trabalho e pelos momentos felizes.

Aos amigos que me acompanham desde o ensino médio, com quem tenho dividido grandes momentos da vida.

Aos amigos e líderes do IPqM: o aprendizado que tive com vocês foi extremamente relevante para a minha jornada acadêmica.

Agradeço também ao leitor pelo interesse neste trabalho. Desejo que esta pesquisa possa contribuir grandemente para os seus estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Resumo

Caetano, Lauro de Lacerda Caetano; Lucena, Carlos José Pereira de. **Formação de comboios veiculares dinâmicos: uma abordagem de auto-organização**. Rio de Janeiro, 2019. 101p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A auto-organização possui conceitos amplamente utilizados em diversos domínios que vão desde a biologia até aplicações em sistemas distribuídos. Além disso, os seus princípios servem como base e inspiração para a modelagem e desenvolvimento de tecnologias contemporâneas, como os drones e os sistemas autônomos. Nos últimos anos, os sistemas autônomos de direção e suas aplicações têm gerado um grande interesse na sociedade, principalmente pelo potencial de melhorar a segurança e a eficiência dos fluxos rodoviários. Neste trabalho, investigamos os principais aspectos de auto-organização presentes na formação de comboios veiculares dinâmicos. Ademais, modelamos e desenvolvemos um protocolo de gerenciamento de comboios baseado em fundamentos de auto-organização. Finalmente, demonstramos que o protocolo preserva a segurança e estabilidade do comboio em um cenário onde há redução de faixas no ambiente rodoviário.

## Palavras-chave

Auto-organização ; Sistemas Autônomos ; Gerenciamento de Comboios Veiculares

## Abstract

Caetano, Lauro de Lacerda Caetano; Lucena, Carlos José Pereira de (Advisor). **Dynamic vehicle platoon formation: a self-organizing approach**. Rio de Janeiro, 2019. 101p. Dissertação de mestrado – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Self-organization has concepts widely used in many fields ranging from biology to applications in distributed systems. Besides, its principles serve as the basis and inspiration for the modeling and the development of contemporary technologies, such as drones and autonomous systems. In recent years, autonomous driving systems and their applications have instigated a great interest in society, primarily due to the potential of improving the safety and efficiency of road traffic. In this work, we investigate the main aspects of self-organization present in dynamic vehicle platoons. Also, we model and develop a platoon management protocol based on self-organizing principles. Finally, we demonstrate that the protocol maintains the safety and stability of the platoon in a lane reduction scenario in the road environment.

## Keywords

Self-Organization ; Autonomous Systems ; Vehicle Platoon Management

## Sumário

1	Introdução	14
1.1	Definição do Problema	15
1.2	Perguntas de Pesquisa	16
1.3	Solução Proposta	16
1.4	Contribuições	17
1.5	Organização da Dissertação	17
2	Fundamentação Teórica	18
2.1	Princípios de auto-organização	18
2.1.1	Auto-organização em Sistemas Distribuídos	20
2.1.2	Auto-organização em Sistemas Multi-agentes	23
2.2	Comunicação veicular	24
2.2.1	Considerações sobre segurança	25
2.3	Direção Colaborativa	26
2.3.1	História	27
2.3.2	Arquiteturas para direção colaborativa	28
2.3.3	Estabilidade de corda	31
2.3.4	Sistemas de Controle	34
2.4	Direção Autônoma	37
3	Trabalhos Relacionados	39
4	Um modelo para gerenciamento de comboios auto-organizáveis	42
4.1	Cenário	42
4.2	Processo de auto-organização	42
4.2.1	Mapeamento da Geolocalização	43
4.2.2	Detecção de mudanças no contexto rodoviário	44
4.2.3	Distribuição de Papéis	45
4.2.4	Ajustes Longitudinais e Laterais	46
4.2.4.1	Alocação da Posição de Entrada	48
4.2.4.2	Manobras	49
4.2.4.3	<i>Join at Back</i>	49
4.2.4.4	<i>Join at Front</i>	51
4.2.4.5	Outras Manobras	52
4.2.5	Estabilização do Comboio	53
4.3	Requisitos do Modelo	53
4.4	Requisitos de Auto-organização	54
5	Implementação do modelo	59
5.1	Simulação de Tráfego Rodoviário	59
5.1.1	Modelos de Mobilidade	59
5.1.2	<i>Simulator of Urban Mobility</i>	61
5.2	Simulação de Redes	61
5.2.1	Simulação de Redes Veiculares	62

5.2.2	Simulação de Comboios	63
5.3	Implementação do modelo	64
5.3.1	Detector TSR para o SUMO	64
5.3.2	Aplicação para Gerenciamento de Comboios	66
6	Estudo de Caso	<b>74</b>
6.1	Cenário	74
6.2	Experimento	77
6.2.1	Resultados e Discussões	77
6.3	Lições aprendidas	81
6.4	Conclusão	82
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	<b>83</b>
	Referências bibliográficas	<b>86</b>
A	Mensagens de rede	<b>95</b>
B	Estudo de Caso: Ponte Rio-Niterói	<b>98</b>
B.1	Cenário	98
B.2	Resultados	99



## Lista de figuras

Figura 2.1	Escalabilidade versus determinismo em sistemas de controle centralizado e distribuído	22
Figura 2.2	Arquitetura AHS	29
Figura 2.3	Arquitetura DOLPHIN	30
Figura 2.4	Ausência de estabilidade de corda percebida após oscilação da velocidade do veículo líder da frota	32
Figura 2.5	Gráfico demonstra ausência de estabilidade de corda na formação de comboio	33
Figura 2.6	Gráfico mostra a não amplificação de uma oscilação introduzida pelo veículo líder da frota	33
Figura 4.1	Cenário do problema	42
Figura 4.2	Processo de execução da auto-organização do modelo	43
Figura 4.3	Deteção de bloqueios nas faixas $L_0$ e $L_1$ sugere uma mudança de faixa para o veículo $V_3$	45
Figura 4.4	Atribuição de papéis para os veículos em contexto de bloqueios de faixa	46
Figura 4.5	Fluxo de execução para líder em faixa segura	47
Figura 4.6	Fluxo de execução para seguidor em faixa segura	47
Figura 4.7	Fluxo de execução para líder em faixa não segura	48
Figura 4.8	Fluxo de execução para seguidor em faixa não segura	48
Figura 4.9	Posição sugerida pelo líder observa critério de distância euclidiana	49
Figura 4.10	Cenário de manobra <i>Join at Back</i>	50
Figura 4.11	Cenário de manobra <i>Join at Front</i>	51
Figura 4.12	Cenário de manobra <i>Join in the Middle</i>	52
Figura 4.13	Estabilização do comboio não leva inicialmente à estabilidade de corda	53
Figura 5.1	Interface do SUMO	61
Figura 5.2	Comunicação bidirecional entre os <i>frameworks</i> Veins e SUMO	63
Figura 5.3	Simulação de comboios no <i>framework</i> Plexe	64
Figura 5.4	Diagrama de classes do modelo proposto	67
Figura 5.5	Trocas de estados dos veículos envolvidos na manobra <i>Join at Back</i>	70
Figura 5.6	Trocas de estados dos veículos envolvidos na manobra <i>Join at Front</i>	72
Figura 6.1	Cenário rodoviário para estudo de caso do modelo proposto	74
Figura 6.2	Momento da deteção da placa de estreitamento de pista, prenúncio da modificação do ambiente	77
Figura 6.3	Aceleração dos veículos em formação de comboio	78
Figura 6.4	Velocidade dos veículos em formação de comboio	78

Figura 6.5	Gráfico de distâncias inter-veiculares do comboio ao longo do tempo	80
Figura 6.6	Gráfico de desvio padrão das lacunas inter-veiculares na formação de comboio ao longo do tempo	81
Figura A.1	Formato do <i>beacon</i> utilizado pelo protocolo de gerenciamento	95
Figura B.1	Comparação do tempo médio de trajeto dos experimentos <i>baseline</i> e comboio	100
Figura B.2	Comparação do tempo médio de trajeto dos experimentos <i>baseline</i> e comboio na faixa 0	100

## Lista de tabelas

Tabela 2.1	Níveis de autonomia de direção padronizados pela SAE	38
Tabela 4.1	Requisitos do Modelo de Gerenciamento de Comboios Proposto	54
Tabela 4.2	Garantias necessárias para a construção de sistemas auto-organizáveis e auto-adaptativos	56
Tabela 4.3	Verificação do modelo proposto com garantias de auto-adaptação e auto-organização	58
Tabela 5.1	Requisitos Mínimos para simulação de CAVs	60
Tabela 5.2	Parâmetros a serem definidos para simulação de dispositivo TSR no SUMO	66
Tabela 6.1	Versões dos simuladores utilizados no experimento	75
Tabela 6.2	Parâmetros de Simulação de Tráfego	75
Tabela 6.3	Parâmetros de simulação da rede	76
Tabela A.1	Mensagens criadas para os protocolos Join-at-Back e Join-at-Front	97

## Lista de abreviaturas

ACC – Adaptive Cruise Control  
ADAS – Advanced Driver-Assistance Systems  
AHS – Automated Highway Systems  
CACC – Cooperative Adaptive Cruise Control  
CC – Cruise Control  
DSRC – Dedicated Short Range Communications  
DOLPHIN – Dedicated Omni-purpose inter-vehicle communication Linkage Protocol for Highway automation  
ETSI – European Telecommunications Standards Institute  
HSM – Hardware Security Module  
IVHS – Intelligent Vehicle Highway System  
LIDAR – Light Detection And Ranging  
MANET – Mobile Ad Hoc Network  
MPC – Model Predictive Control  
OBU – On-board Unit  
PATH – Partners for Advanced Transportation Technology  
RADAR – Radio Detection And Ranging  
RSU – Road Side Unit  
SAE – Society of Automotive Engineers  
SARTRE – Safe Road Trains for the Environment  
SUMO – Simulator of Urban Mobility  
TraCI – Traffic Command Interface  
TSR – Traffic-Sign Recognition  
V2I – Vehicle-to-Infrastructure  
V2V – Vehicle-to-Vehicle  
V2X – Vehicle-to-Everything  
VEINS – VEHICLES In Network Simulation  
WAVE – Wireless Access in Vehicular Environments

*“Nothing is too wonderful to be true if it be  
consistent with the laws of nature.”*

**Michael Faraday**, *The Life and Letters of Faraday*.

# 1

## Introdução

Os conceitos de auto-organização são amplamente utilizados para compreender os comportamentos de tipos diversos de sistemas, sejam naturais ou artificiais, desde domínios como a biologia [1] até aplicações em sistemas artificiais complexos.

A auto-organização é compreendida como um processo colaborativo, adaptativo e dinâmico no qual a interação dos componentes individuais tem uma função importante para a segurança e estabilidade do sistema. A presença desta característica pode ser facilmente observada no comportamento em coletivos de animais como em revoadas e cupinzeiros, que formam estruturas fascinantes e têm um propósito específico. No caso das aves, o processo de auto-organização ocorre para facilitar o deslocamento dos bandos, enquanto que na sociedade de cupins a rainha controla o nível de afastamento de seus pares pelo gradiente de intensidade de seu feromônio.

Os sistemas artificiais, inspirados nos sistemas naturais eussociais<sup>1</sup>, empregam recursos físicos e lógicos na implementação de mecanismos para garantir um nível de organização de seus componentes. O conceito de auto-organização, aplicado a sistemas artificiais, se faz presente em redes de computadores, sistemas distribuídos e sistemas multi-agentes e oferece benefícios importantes para o funcionamento robusto e escalável destas tecnologias [2, 3, 4].

Nos últimos anos, pesquisadores têm aplicado propriedades bioinspiradas na auto-organização de sistemas autônomos, agregando maior qualidade ao design de robôs e outros dispositivos [5]. O crescente interesse de consumidores por tecnologias com grau de automação também atinge a área dos transportes, o que faz a indústria automobilística, por exemplo, aumentar a produção de carros e sistemas de direção autônoma [6]. Além disso, existe uma expectativa de que a automação veicular poderia reduzir o número de acidentes [7], reduzir o consumo de combustíveis [8, 9] e, com a ajuda de tecnologias de comunicação, assegurar uma maior eficiência no tráfego [10].

Entre diversas tecnologias relacionadas à automação veicular, a formação de carros em comboios vem sendo recentemente discutida como uma possível

<sup>1</sup>o mais alto grau de organização social dos animais presente nas sociedades mais complexas.

solução no conceito de cidades inteligentes [11]. No entanto, poucos trabalhos têm discutido a incorporação de características de auto-organização nos componentes de uma formação de comboio veicular e como tais frotas poderiam reagir à alterações emergentes no ambiente rodoviário. Por isso, um modelo de sistema auto-organizável capaz de reagir às constantes mudanças no ambiente rodoviário poderia agregar virtudes ao gerenciamento de comboios autônomos. Portados com tal estrutura, é possível que os comboios autônomos promovam maior segurança e eficiência no fluxo rodoviário.

## 1.1

### Definição do Problema

A maior parte dos acidentes automobilísticos nos tempos atuais estão relacionados à falha humana [12]. Um dos fatores que denota a responsabilidade dos motoristas está ligado à capacidade limitada do ser humano perceber e reagir à situações de risco em ambiente rodoviário. Um estudo mostra que o tempo de reação de motoristas frente a uma frenagem repentina pode ultrapassar 1 segundo [13]. Sabe-se que a consequência desse atraso no tempo de reação pode significar a perda de vidas. Logo, o auxílio da tecnologia em detectar situações de risco e eliminar o tempo de reação de um motorista humano poderia levar a uma drástica redução do número de acidentes.

Contudo, ao lidar com situações de mudanças emergentes em ambiente rodoviário (ex.: redução do número de pistas, bloqueio em faixa por presença de carro enguiçado, entre outras), os comboios de carros autônomos além de reagirem subitamente, também por vezes precisam modificar a disposição dos membros do grupo para assegurar segurança e fluidez no ambiente rodoviário. Observando a literatura, os modelos de sistemas auto-organizáveis são úteis para permitir rearranjos na estrutura preservando os objetivos almejados pelo próprio sistema [14]. Como princípio básico, os modelos de auto-organização existentes fundamentam-se na interação para garantir a manutenção de uma estrutura funcional do sistema [15].

O estado da arte da interação entre veículos autônomos baseia-se na tecnologia CACC (*Cooperative Adaptive Cruise Control*), que oferece um controle de cruzeiro adaptativo e coordenado dos membros de comboios [16]. A troca de pacotes de comunicação utilizando a tecnologia descrita assegura maior precisão da telemetria do sistema. Em termos práticos, o CACC permite que os comboios aproveitem de maneira eficiente a malha viária devido à cooperação entre os veículos levando a uma redução da distância inter-veicular. No entanto, os modelos virtuais existentes que se aproveitam dessa tecnologia [17, 18] não compreendem a formação de comboios sob a ótica de

auto-organização, o que abre uma possibilidade de melhoria destas abordagens.

Um modelo para o gerenciamento da formação de comboios veiculares baseado nos fundamentos de auto-organização deve permitir um número diverso de trocas de posição por meio de manobras entre os membros do sistema. Tais trocas de posição devem ser realizadas individualmente ou mesmo em conjunto observando as lacunas existentes. A partir deste modelo, os comboios autônomos podem reorganizar-se longitudinalmente e ocupar a pavimentação de forma mais segura e eficiente.

## 1.2

### Perguntas de Pesquisa

As perguntas de pesquisa que este trabalho visa responder são:

1. Quais ganhos os princípios de auto-organização podem trazer ao gerenciamento de comboios veiculares autônomos?
2. Como organizar um conjunto de veículos preservando a segurança e a estabilidade frente à mudanças no ambiente rodoviário?
3. Quais critérios devem ser observados na reorganização de comboios veiculares autônomos?

## 1.3

### Solução Proposta

Com este trabalho, busca-se definir um modelo que contemple princípios de auto-organização no gerenciamento de comboios veiculares autônomos considerando as situações emergentes de alteração no ambiente rodoviário. Além disso, este modelo fundamenta-se na interação entre os veículos para garantir a coordenação longitudinal dos membros componentes da frota.

Neste sentido, este trabalho apresenta uma breve visão dos princípios de auto-organização percebidos nos sistemas naturais e artificiais e aborda de forma específica a auto-organização no contexto de sistemas distribuídos e de agentes de *software* com ênfase na formação de comboios veiculares.

Ademais, este trabalho apresenta uma solução em *software* do modelo supracitado, realiza experimentos em estudos de caso (um deles em uma região do mundo real) e avalia os resultados comparando com outras soluções existentes na literatura.



## 1.4

### Contribuições

Este trabalho apresenta uma abordagem baseada em princípios de auto-organização para o gerenciamento de comboios veiculares autônomos. Mais precisamente, as contribuições desta dissertação são:

- Discussão da aplicação dos princípios de auto-organização aplicados ao caso dos comboios veiculares autônomos;
- Um modelo para o gerenciamento de comboios veiculares contemplando aspectos de auto-organização;
- Soluções em *software* para implementação do modelo em simulador de mobilidade urbana e simulador de eventos discretos.

## 1.5

### Organização da Dissertação

Este trabalho de dissertação está estruturado como descrito a seguir.

- No Capítulo 2 são descritos alguns conceitos essenciais para o entendimento deste trabalho, entre os quais estão incluídos auto-organização, auto-organização em sistemas distribuídos e sistemas multi-agentes, comunicação veicular e direção cooperativa e autônoma;
- No Capítulo 3 são mencionados os trabalhos que têm relação com esta pesquisa;
- Um modelo que contempla aspectos de auto-organização em comboios veiculares autônomos é proposto no Capítulo 4;
- A implementação do modelo e os arcabouços utilizados como base são descritos no Capítulo 5;
- No Capítulo 6, são discutidos os resultados da avaliação experimental do modelo supracitado;
- O Capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho e descreve os trabalhos futuros;
- Ao final, incluímos alguns apêndices relacionados a esta pesquisa.

## 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos abordados nesta pesquisa. A Seção 2.1 descreve princípios e propriedades de sistemas auto-organizáveis e suas propriedades aplicadas em sistemas distribuídos e sistemas multi-agentes. A Seção 2.2 aborda aspectos de interação entre os veículos, seus padrões e aplicações, e discute brevemente questões relacionadas à segurança. A Seção 2.3 descreve a direção colaborativa, suas principais arquiteturas e sistemas de controle. E por fim, a Seção 2.4 expõe a padronização dos sistemas de direção autônoma.

### 2.1

#### Princípios de auto-organização

A presença de organismos auto-organizáveis na natureza certamente não passa despercebida à vista do ser humano. O movimento coletivo de animais como em cardumes, revoadas e enxames atrai a atenção para a forma sinérgica e sincronizada com que os agentes participantes interagem. Ademais, a auto-organização se faz presente de forma abrangente em outros campos da ciência como a física, economia, psicologia e sociologia [19].

Esta presença disseminada de conceitos de auto-organização na formação em grupos de animais ou tecnologias poderia levar ao entendimento de um tipo ou categoria para os sistemas auto-organizáveis na hierarquia de sistemas naturais e artificiais. No entanto, a literatura não aponta uma visão categórica para os sistemas auto-organizáveis. Como referência, o trabalho de Gershenson [14] discute quando os sistemas podem ser chamados “auto-organizáveis” e conclui que o conceito de auto-organização é uma perspectiva de compreender, modelar e construir os sistemas ao invés de uma classe de sistemas. Portanto, ao ler o conceito de “auto-organização” neste trabalho, o leitor deve compreendê-lo como uma qualidade e não uma tipificação ou classificação de sistemas.

Os estudos preliminares em sistemas auto-organizáveis foram iniciados por Ashby [20], que propôs os chamados “princípios da auto-organização”. Em seu trabalho, ele percebeu que os sistemas dinâmicos tendem a evoluir para um estado de equilíbrio. O autor também percebeu que a organização é um

aspecto relativo que depende do observador do sistema, por isso uma parte substancial da teoria da organização se preocupa com as propriedades que derivam da relação entre observador e a coisa observada.

Numa visão abstrata e livre de domínios, um sistema descrito como auto-organizável possui uma forma ou estrutura para cumprir uma função [15]. A estrutura significa a disposição ou arranjo dos componentes a partir de uma interação entre as partes ou entidades formadoras do coletivo. A função traduz o propósito da estrutura, isto é, o porquê desta organização ser efetuada. Para algumas espécies de peixes, por exemplo, a formação de cardumes tem a função de proteger o grupo contra o ataque de predadores.

Os sistemas auto-organizáveis mantêm sua estrutura funcional de forma espontânea e livre de controle centralizado. Não ter um elemento dedicado ao controle significa que preservar a auto-organização é tarefa de todas as partes. Se houvesse um elemento centralizador, bastaria a remoção de tal parte do sistema para que o princípio da auto-organização fosse perdido. A evidência do caráter distribuído dos sistemas auto-organizáveis fica clara a partir desta característica.

Vale notar a interação das entidades para a formação do sistema auto-organizável. Primeiramente, é importante afirmar que as partes que compõem o sistema auto-organizável são enxergadas como a camada microscópica enquanto o sistema global é descrito no nível macroscópico. A interação geralmente ocorre de forma localizada dentro do sistema, seja por comunicação direta ou por percepção ambiental. É também de se notar que a interação entre os participantes em nível micro é que vai proporcionar a organização do sistema visualizada no grau macro. Proporcionada pela interação a nível local, as propriedades que surgem a partir do ajuntamento coletivo deste sistema global auto-organizável são chamadas de propriedades “emergentes” [21].

A adaptabilidade é outro aspecto significativo em sistemas auto-organizáveis. A partir de mudanças percebidas no ambiente ou no próprio sistema, as entidades componentes convergem para uma estrutura que traga benefícios para o sistema global, procurando cumprir com um objetivo. A re-organização pode ocorrer a partir de um gatilho externo ou interno, sempre de forma coordenada com os movimentos de outros pares. Por isso, a auto-organização também compreende o conceito de auto-adaptação.

Outras qualidades relevantes destes sistemas são o alto nível de escalabilidade e robustez. A escalabilidade consiste do sistema operar com extenso número de entidades. Por exemplo, grupos de milhares de pássaros voam juntos e adaptam-se bem em revoadas com o objetivo de facilitar o deslocamento ou fortalecer a defesa contra os predadores. Já a robustez significa que as entidades

do sistema podem agir proativamente contra ataques ou falhas, adaptando-se e reorganizando-se sem ajuda externa. O fato de sistemas auto-organizáveis não possuírem uma entidade centralizadora (que seria seu ponto único de falha) ajuda a promover esta característica. Além disso, um sistema auto-organizável bem desenhado tem a tendência de desintegrar-se “graciosamente” ao invés de quebrar-se de forma súbita.

A não-linearidade é outro importante entendimento sobre os sistemas auto-organizáveis. Nos modelos matemáticos lineares, a relação entre causa e efeito é facilmente compreendida. Como exemplo, se um objeto for arremessado com o dobro de força então a distância a ser alcançada tende a ser duas vezes maior. Por outro lado, nos sistemas não-lineares esta relação não ocorre proporcionalmente. Em um sistema auto-organizável, cada componente influencia no comportamento de outros participantes e esta relação causa-efeito percebida é definida como circular. Uma mudança gerada por um componente do sistema pode afetar diversos participantes, o que pode gerar consequências tanto aos outros participantes quanto ao próprio elemento responsável pela mudança, além de interferir nas propriedades do sistema global.

Percebendo os benefícios que mecanismos de auto-organização trazem aos sistemas naturais, desenvolvedores têm buscado incorporar estes princípios no projeto de arquiteturas, protocolos e modelos para sistemas artificiais.

Nos sistemas artificiais, a incorporação do princípios de auto-organização tem objetivo direto: melhorar a eficiência dos próprios processos e a percepção dos processos de outros agentes do sistema. O resultado geralmente é maior robustez, escalabilidade e autonomia.

Os princípios de auto-organização estão incutidos em diversos sistemas artificiais e neste trabalho nos fixamos em exemplificar casos notórios de auto-organização presentes em sistemas distribuídos e sistemas multi-agentes.

Enfatiza-se ao leitor que os conceitos de auto-organização supracitados serão frequentemente referenciados a fim de se caracterizar os sistemas artificiais apresentados nos capítulos e seções a seguir.

### 2.1.1

#### **Auto-organização em Sistemas Distribuídos**

Os sistemas distribuídos inegavelmente apresentam uma predisposição por princípios de auto-organização em uma parte relevante de suas aplicações. Seja para simplesmente servir no descobrimento de serviços dos pares ou para o sincronismo entre os processos partilhados. Em geral, percebe-se que uma melhor estruturação dos processos ou das partes envolvidas resulta em benefícios para o sistema em escala global.

A busca por interação dos agentes-parte para garantir a auto-organização do sistema global evidencia, na perspectiva dos sistemas distribuídos, a importância de uma rede de comunicação altamente disponível. O papel das redes de comunicação é essencial para a garantia da organização visto que, em certos casos, estas são a única forma de interação possível entre os agentes-parte do sistema. É nestes casos que a forma em que a auto-organização é compreendida, modelada e implementada influencia diretamente no cumprimento dos objetivos do sistema global.

As redes sem controle centralizado, comumente chamadas de redes ad hoc e muito discutidas nas últimas décadas, aparecerem como principais beneficiadas de um modelo genérico de auto-organização. Prehofer [22] justifica a atual tendência para a ubiquidade da comunicação para defender a necessidade de funcionalidades gerais que garantam a auto-organização destas redes. Das redes ad hoc, que tem interação ocorrendo de forma local e direta, surgem aplicações envolvendo toda sorte de dispositivos de computação distribuída como *smartphones*, sensores, veículos e drones. As formações dinâmicas destes dispositivos, sendo norteadas por diretrizes de uma camada abstrata de auto-organização e a partir de interações dos agentes-parte, têm o potencial de trazer benefícios para o sistema global.

O trabalho de Dressler [23] reforça que a auto-organização é especialmente importante para redes ad hoc sem fio devido à espontaneidade da interação de múltiplos agentes por meio das conexões de rádio. O autor, ao defender os princípios de auto-organização para redes ad hoc, argumenta que os benefícios diretos trazidos pela abordagem são escalabilidade, confiabilidade e disponibilidade. Ainda há outros ganhos como o de maior autonomia de energia no caso dos dispositivos que têm funcionamento alimentado por bateria. Por outro lado, o ganho de escalabilidade contrasta com a queda de determinismo do sistema, conforme ilustrado na figura 2.1 (adaptada de [23]).

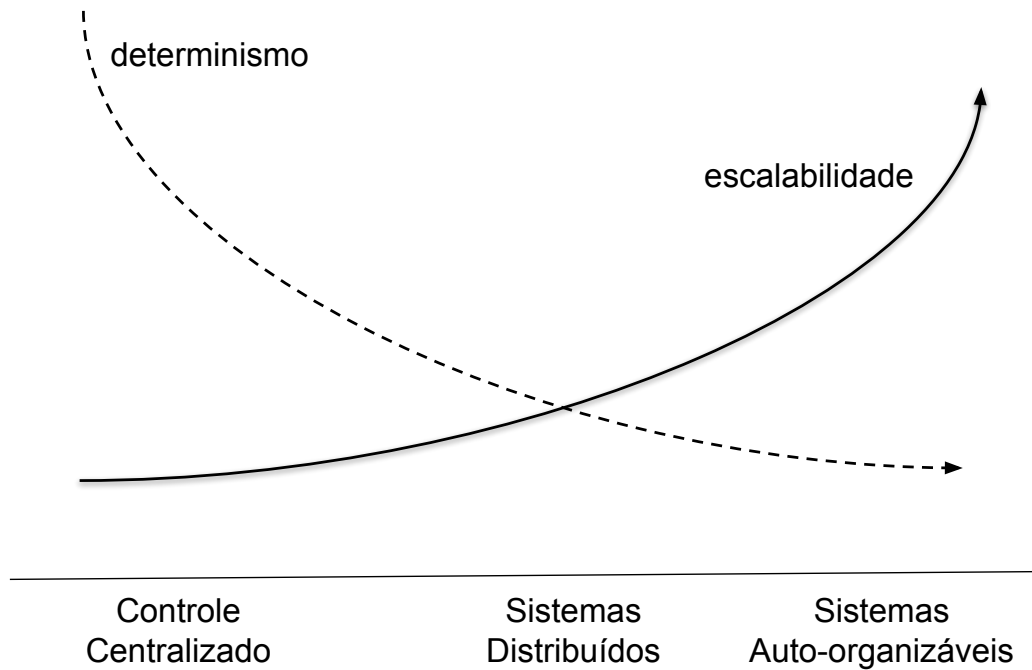


Figura 2.1: Escalabilidade versus determinismo em sistemas de controle centralizado e distribuído

Pode-se correlacionar a perda da previsibilidade dos sistemas auto-organizáveis ao alto dinamismo das redes ad hoc, especialmente se as entidades-partes forem móveis.

Obviamente, funcionalidades devem ser modeladas e implementadas a fim de que um sistema distribuído englobe o conceito de auto-organização. Dressler [23] classifica as diferentes metodologias para auto-organização em redes ad hoc. O autor argumenta que o conceito de auto-organização em redes ad hoc se resume a pelo menos um dos dois fatores: (1) a troca de informações frequentemente atualizada por eventos que gera interação entre vizinhos ou (2) métodos probabilísticos empregados para tomar decisões em caráter local.

Prehofer [22] defende paradigmas como a criação de propriedades globais, a coordenação implícita, a eliminação periódica de informações de longa duração e a adaptação à mudanças como funcionalidades gerais a serem implementadas nas redes de comunicação para garantir a qualidade de auto-organização. Entretanto, o autor afirma que a implementação destes paradigmas em uma camada geral de auto-organização afeta a forma com que as regras e protocolos de interação estão desenhados.

### 2.1.2

#### Auto-organização em Sistemas Multi-agentes

Embora não haja um senso comum sobre a definição do termo, agentes de *textit{software}* são comumente compreendidos como entidades computacionais capazes de perceber onde estão, interagir com outros agentes e reagir a estímulos do ambiente [24]. Cada agente é visto como uma entidade que tem características e interesses individuais, o que traz a noção de heterogeneidade em termos de sistema. Estes interesses ou objetivos podem ser compartilhados entre os agentes de forma complementar ou conflituosa, o que pode levar os agentes a cooperarem ou mesmo competirem entre si.

No que diz respeito à percepção sobre o ambiente, esta pode ser suportada e enriquecida por tecnologias como sensoramento e visão computacional, que ajudam o agente a “enxergar” o mundo. Em seguida, a interação dos agentes com outros pares pode ser descrita em modelos de interação e regida por protocolos, normas e leis. E por fim, a reação de cada agente é uma consequência de sua própria experiência [24], capacidade e consciência sobre seus comportamentos, que são produzidos de forma autônoma.

A percepção que os agentes têm da organização do sistema depende diretamente da forma que os agentes são modelados. Alguns sistemas multi-agentes auto-organizáveis baseiam suas arquiteturas em modelos inspirados na biologia enquanto outros criam suas próprias metodologias. O trabalho de Serugendo et al. [25] apresenta os principais mecanismos que incorporam o aspectos de auto-organização aos sistemas multi-agentes, dentre os quais destacam-se:

- As interações diretas entre os agentes utilizando a localização e a difusão de mensagens, diferenciando-se dos sistemas distribuídos no que diz respeito à estabilidade após convergir para o estado desejado, mesmo sob perturbações do ambiente ;
- As comunicações indiretas ligadas ao princípio de estigmergia<sup>1</sup> [26] ;
- A aprendizagem de comportamentos de outros agentes, estratégia que por vezes se vale da atribuição de recompensas ou punições para readaptar as ações;
- O comportamento de cooperação de agentes, que exerce esta capacidade no aspecto local ;

<sup>1</sup>Uma tarefa realizada por um agente deixa um vestígio no ambiente que estimula a execução de trabalho subsequente pelo mesmo agente ou por outros agentes

- A escolha de uma arquitetura genérica, ou meta-modelos que são instanciados e dinamicamente modificados de acordo com os requisitos da aplicação.

## 2.2

### Comunicação veicular

Nesta seção iremos discorrer sobre aspectos da comunicação inter-veicular, que foram inspiradas originalmente nas redes ad hoc móveis, popularmente conhecidas como MANETs. As redes veiculares, ou VANETs, podem ser consideradas um braço importante das MANETs e detém um grande potencial para aplicações com alto grau de interação.

A interação entre veículos podem ser realizadas por meio de diversas interfaces de comunicação sem-fio, como por exemplo as de longo alcance como as redes celulares (3G, 4G e 5G) e as tecnologias de curto alcance como as redes sem fio. Cada uma destas tecnologias é apropriada para servir de suporte para determinados cenários em ambiente veiculares.

As redes celulares tem uma larga abrangência e são utilizadas majoritariamente com o propósito de disseminar informações sobre o veículo e o tráfego. Por já possuírem uma estrutura pronta, tais redes servem de suporte aos Sistemas de Informações de Tráfego (Traffic Information Systems) que se valem das informações transmitidas para, por exemplo, notificar sobre trechos com acidentes ou congestionamentos.

Por outro lado, as redes sem fio, conhecidas como redes WiFi e descritas formalmente pelo padrão IEEE 802.11 [27], têm uma abrangência local (de até 1 km) e são adequadas para suportar a disseminação de dados de segurança, visto que este tipo de informação geralmente é mais útil nas proximidades de um evento. Como exemplo, as aplicações que alertam pontos em que ocorreram acidentes ou disseminam a passagem de veículos de resgate [28] são relevantes para veículos circunvizinhos à tal evento.

Para adequar o seu funcionamento nos ambientes veiculares, que são altamente dinâmicos, o padrão 802.11 teve que passar por uma série de ajustes para permitir, por exemplo, uma associação rápida e ad-hoc entre os veículos. A padronização destas redes iniciou-se por meio do documento IEEE 802.11p [29] que propõe emendas às camadas físicas e de enlace das redes WiFi. A camada física teve a frequência determinada em 5.9GHz e uma tecnologia chamada Comunicações Dedicadas de Curto Alcance (DSRC, do inglês *Dedicated Short Range Communications*) foi criada com o objetivo de permitir a alta transferência de dados no meio veicular.



As camadas superiores são regidas por diferentes padrões que variam de acordo com a localização geográfica. Nos Estados Unidos, a IEEE desenvolveu o conjunto de padrões 1609 chamado de WAVE (do inglês *Wireless Access in Vehicular Environments* para Acesso sem fio em ambientes veiculares) que foi subdividido em diversos documentos [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]. Na Europa, a ETSI desenvolveu um extenso conjunto de padrões ITS-G5<sup>2</sup>. Em ambos os conjuntos de documentos foram definidas normatizações visando o desenvolvimento de aplicações para o meio veicular, como primitivas de segurança, formato das mensagens, operações nos canais de rádio, entre outras. Uma descrição extensa do funcionamento das redes veiculares, desde a camada física até a camada de aplicação, com ênfase no padrão WAVE, pode ser encontrada em um trabalho anterior do autor deste trabalho [37].

A literatura apresenta diversas aplicações [38] a serem suportadas pela comunicação veicular: aplicações de assistência ao motorista, emergência, segurança, entretenimento, e de direção cooperativa. Este trabalho, em especial, enfatiza as aplicações e protocolos para a formação e gerenciamento de comboios. Portanto, não é objetivo deste trabalho discorrer sobre outros tipos de aplicações para redes veiculares.

### 2.2.1

#### Considerações sobre segurança

Mesmo apresentando características únicas como a alta mobilidade dos nós e tempos curtos de conexão, as VANETs também são alvo constante de ataques à segurança e a privacidade de seus usuários. No caso dos veículos conectados, a segurança é um aspecto suma importância visto que qualquer falha pode significar a perda de vidas. Logo, uma camada de segurança sempre deve ser levada em consideração para desenvolver qualquer aplicação para VANETs.

Alguns dos possíveis ataques relacionados à segurança e a privacidade das VANETs foram mapeados por Mejri et al. [39] e classificados quanto à disponibilidade, autenticidade e identificação, confidencialidade, integridade dos dados, e não-repúdio/responsabilidade. O mesmo trabalho reúne soluções técnicas de criptografia simétrica e assimétrica para atuar como contramedidas aos ataques no contexto da interação inter-veicular.

Além disso, podem haver ataques direcionados ao fluxos de veículos conectados por tecnologia CACC (ex.: comboios), principal aplicação a ser tratada neste trabalho. Segundo Amoozadeh et al [40], há ataques direcionado à comboios que atingem os níveis de aplicação, de rede e de sistema.

<sup>2</sup>Padrões disponíveis em <https://www.etsi.org/committee/1402-its>

Na camada de aplicação, um adversário pode afetar a frota de veículos praticando ataques de *spoofing*, *replay*, e falsificação de mensagens. Mecanismos como assinaturas digitais podem ser utilizadas para promover integridade, autenticação e não-repúdio aos pacotes de mensagens periódicas (*beacons*) transferidos entre os veículos de um comboio. Ademais, estratégias como *nonce*, que é um número arbitrário gerado em um processo pseudo-aleatório, podem ser utilizadas para prevenir ataques de replay.

Na camada de rede, os ataques destinados à VANETs tem o potencial de comprometer o funcionamento de diversas aplicações dos usuários devido à interferências que podem ser causadas na interface do rádio de comunicação. É esperado que os Módulo de Segurança em Hardware (HSM, do inglês *Hardware Security Module*) [41] atuem nestes cenários e garantam a inviolabilidade das comunicações.

A nível de sistema, há ataques de adulteração dos valores medidos pelos sensores. Mecanismos e técnicas para mitigar a adulteração dos dados ou mesmo tornar a medição inviolável poderiam ser aplicados. Se nenhuma das tecnologias for eficiente como contramedida para os ataques, o veículo pode rebaixar o controlador de cruzeiro que utiliza a comunicação para o que não utiliza a interface de rádio.

Contudo, mesmo com as técnicas de segurança citadas, ainda há muito o que avançar no que diz respeito aos mecanismos de detecção de anomalias em um comboio. Por exemplo, atacantes podem estar disfarçados de membros válidos de um comboio com intenção de prejudicar de alguma forma o fluxo (ex.: afetando a estabilidade). Por isso, entende-se haver uma necessidade do surgimento de técnicas eficazes para analisar e detectar anomalias a partir de dados transferidos em formações de comboio.

É importante ressaltar que a descrição em maiores detalhes dos possíveis ataques e a implementação de mecanismos que garantam a segurança da comunicação inter-veicular fogem do escopo deste trabalho.

## 2.3

### Direção Colaborativa

Um dos principais conjuntos de aplicações para as redes veiculares considera o campo da direção colaborativa, sendo a principal aplicação a que permite a formação de comboios. Entende-se como “comboio” o agrupamento de veículos que mantém espaçamentos regulares entre si. Os comboios são vistos atualmente como um mecanismo de segurança, e são formados geralmente para realizar o transporte protegido de autoridades. Porém, no contexto de uma aplicação de redes veiculares os comboios podem trazer outros benefícios

que vão muito além da escolta.

Neste trabalho, considera-se os comboios de veículos como uma instância de um sistema auto-organizável. Logo, todas as características apresentadas na Seção 2.1 podem, guardadas as devidas proporções, ser aplicadas à formação de comboios.

Nas próximas seções, discutiremos o aspecto histórico, as importantes características das formações de comboios, as arquiteturas e tecnologias de controle que permitem o seu funcionamento.

### 2.3.1 História

O estudo em comboios veiculares autônomos surgiu do grande interesse da academia e da indústria em, por meio da automatização, alcançar objetivos de (1) reduzir o tráfego rodoviário e (2) aumentar a segurança no trânsito. O primeiro objetivo seria uma consequência de uma menor distância de afastamento entre veículos. As expectativas iniciais indicavam um aumento da capacidade das rodovias em até quatro vezes [42] por causa da formação de comboios, além de vantagens aerodinâmicas que trariam menor consumo de combustível e redução na emissão de gases. O segundo objetivo seria alcançado por retirar o fator humano da direção, o que poderia aumentar o tempo de reação frente à situação adversas.

Historicamente, os primeiros sistemas desenvolvidos para controle longitudinal e lateral dos veículos ficaram conhecidos como Sistemas Rodoviários Automatizados (AHS, do inglês *Automated Highway Systems*). Já os primeiros experimentos na formação de comboios para o trânsito foram conduzidos pelo programa California PATH (*Partners for Advanced Transportation Technology*) da Universidade de Berkeley no ano de 1992. Em 1994, uma formação de comboio contendo 4 veículos foi demonstrada numa autopista de San Diego, Califórnia. No ano de 1997 houve a principal demonstração da capacidade dos comboios, que ficou conhecida como Demo '97, altamente divulgada nos meios de comunicação à época. A demonstração contou com 8 veículos capazes de manterem-se afastados por curtas distâncias e de realizarem manobras de mudança de faixa. A interessante história dos estudos realizados pelo programa PATH foi revisada em [43].

No final dos anos 90, o entendimento ainda precoce sobre a formação de comboios rumava a um controle centralizado das rodovias por meio de um Sistema Inteligente de Rodovias (IVHS, do inglês *Intelligent Vehicle Highway System*). Em uma perspectiva acadêmica, o estudo iniciado pelo programa PATH teve relevante sucesso pois alavancou o interesse pela pesquisa da

formação de comboios veiculares. Porém, em uma perspectiva de mercado, os altos custos de infraestrutura pareciam inviabilizar o crescimento do projeto em larga escala.

A partir de então, considerando as limitações orçamentárias existentes, a visão de um sistema centralizado responsável pelo controle dos comboios começou a ser abandonada e a comunidade acadêmica passou a experimentar novas tecnologias e arquiteturas com caráter descentralizado, destinadas a atuar em cada veículo de forma individual.

### 2.3.2

#### Arquiteturas para direção colaborativa

Ao longo dos anos, foram propostas diferentes arquiteturas para realizar o gerenciamento cooperativo da formação de veículos em comboio. Hallé et al. discutiram arquiteturas de direção colaborativa de forma mais detalhada em seu trabalho [44]. Os principais aspectos de duas arquiteturas para direção colaborativa serão revisados nesta seção com o objetivo de compreender a estrutura necessária para a formação de comboios.

#### Arquitetura PATH

A primeira arquitetura foi idealizada por Varuya [45] no programa California PATH. O programa PATH previu não apenas mudanças nos controladores de direção dos carros, mas também um novo conceito de infraestrutura viária que distribuiria sensores, atuadores e dispositivos de comunicação nas rodovias. A arquitetura de controle proposta para o sistema inteligente de auto-estrada (IVHS) é exibida na Figura 2.2 (adaptada de [45] para o português).

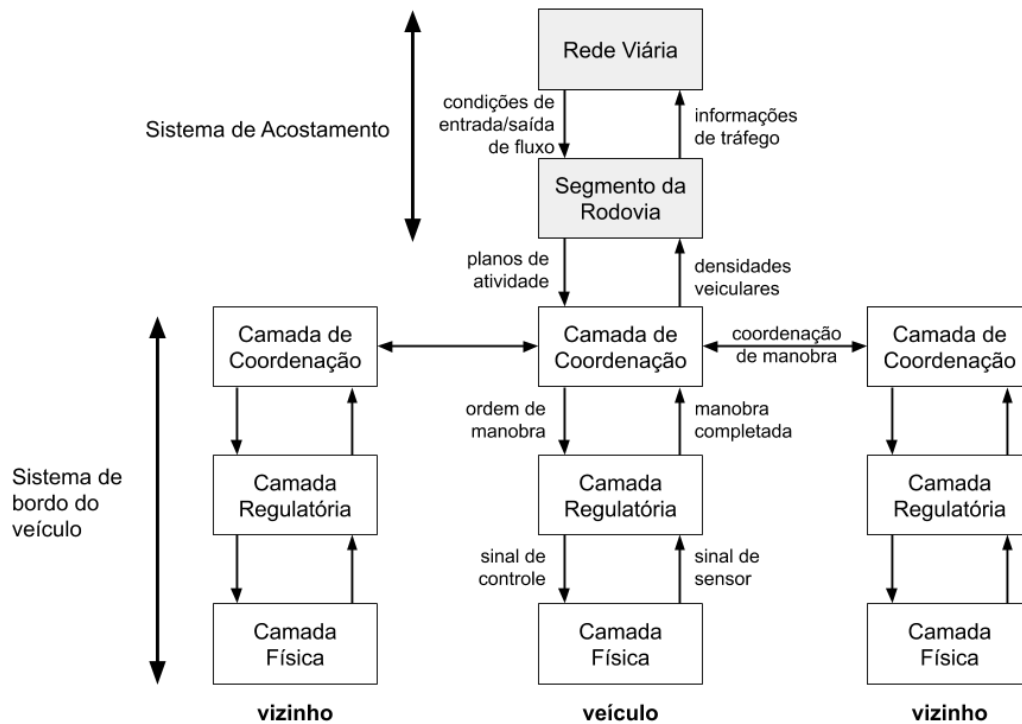


Figura 2.2: Arquitetura AHS

A arquitetura PATH consiste de 5 camadas hierárquicas:

- Física, composta de sensores e atuadores que seriam acionados pelos níveis superiores;
- Regulatória, que tem a tarefa principal de controlar a direção (lateral e longitudinal), a aceleração e a frenagem recebendo ordens de manobra das camadas superiores;
- Coordenação, em que o principal objetivo é orquestrar os movimentos com os veículos vizinhos observando os planos de atividade recebidos da camada superior;
- Segmento da rodovia, responsável pelo controle do fluxo de tráfego em um segmento da rodovia que varia entre 0.5 a 5 km;
- Rede, que tem o objetivo de regular o tráfego e distribuir os fluxos nos segmentos da rodovia.

O modelo da arquitetura PATH destina as três primeiras camadas para os veículos de forma individual, enquanto as duas últimas estão relacionadas à estruturas no acostamento rodoviário. A prova de conceito desta arquitetura foi demonstrada com sucesso por um conjunto de 8 carros que trafegaram em uma autopista localizada em San Diego, Califórnia [46].

### Arquitetura DOLPHIN

A arquitetura DOLPHIN proposta por Tsugawa et al. [47] se inspirou nas formações de golfinhos para descrever a direção veicular colaborativa. A inspiração se deve ao fato de que os golfinhos nadam a distâncias próximas sem haver colisão enquanto os seus membros estão comunicando-se, comportamento análogo ao movimento realizado pelos veículos em formação de comboio.

A arquitetura, conforme ilustrado na Figura 2.3 (adaptada de [47] para o português) é composta por três camadas: Controle de Veículo, Gerenciamento de Veículo, Controle de Tráfego.

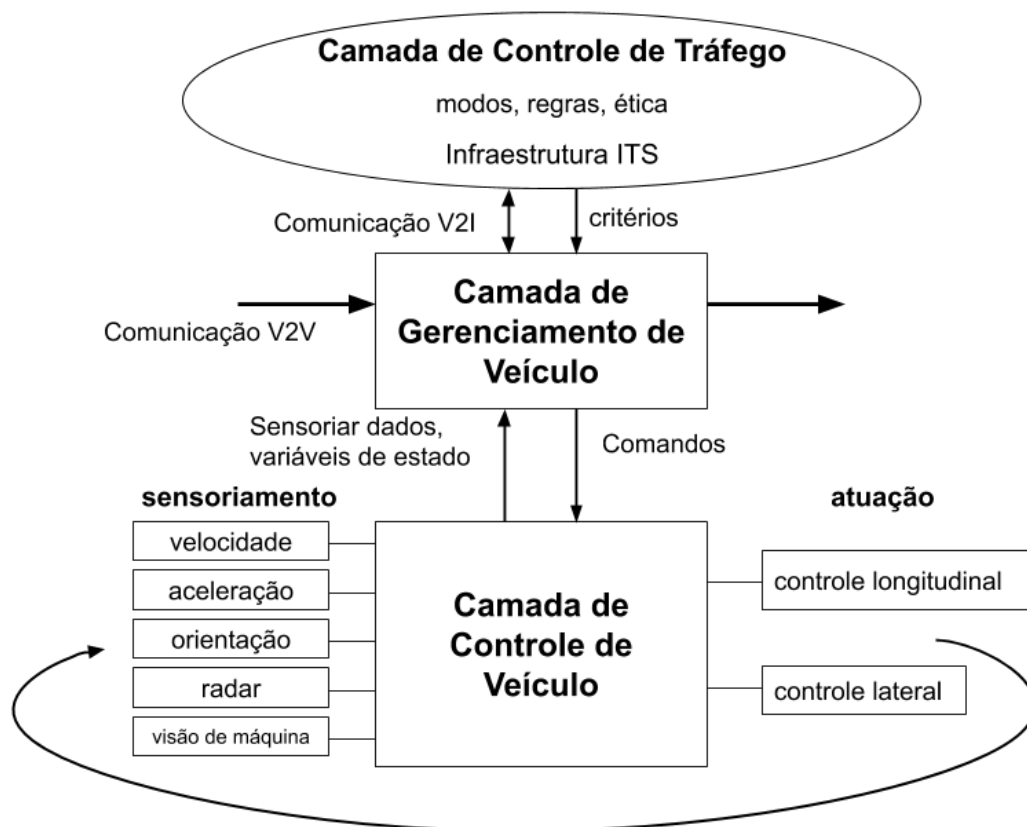


Figura 2.3: Arquitetura DOLPHIN

A arquitetura proposta tem uma estrutura centralizada no veículo, o que permite projetar sistemas veiculares bem organizados. As camadas de controle e de gerenciamento de veículo no modelo DOLPHIN são destinadas a atuarem nos veículos ao passo que a camada de controle de tráfego atua na infraestrutura viária.

A camada de controle de veículo tem os sistemas de sensoriamento e atuação como principais componentes. Os sistemas de sensoriamento podem medir as condições do veículo e das redondezas e definir os estados de variáveis. Os sistemas de atuação operam sobre o controle longitudinal e lateral (direção,

aceleração, frenagem, etc). Os dados de saída dos sensores e os estados das variáveis são repassados para a camada de gerenciamento.

A camada de gerenciamento obtém os dados sensoreados e os estados das variáveis provenientes da camada de controle, além dos dados de veículos das redondezas adquiridos por meio da comunicação inter-veicular e da camada de controle de tráfego. Por fim, os critérios gerados na camada de controle de tráfego são transformados em ações (ex.: novas trajetórias, manobras) para os veículos.

A camada de controle de tráfego é dividida em duas partes: física e lógica. Os principais componentes da parte física são infraestruturas para Sistemas Inteligentes de Transporte, como RSUs (*Road Side Units*), placas de trânsito, semáforos inteligentes. A parte lógica abrange as leis de trânsito, o senso comum e aspectos éticos do meio rodoviário. Os critérios comuns a todos os veículos são transmitidos à camada de gerenciamento de cada veículo nas redondezas.

A arquitetura DOLPHIN foi experimentada em prova de conceito realizada pelo projeto de direção cooperativa Demo 2000 [48]. Na demonstração, 5 veículos autônomos realizaram manobras de entrada, saída, ajuste e separação em uma formação de comboio. A demonstração apresentou o potencial da arquitetura DOLPHIN, que atualmente é utilizada como base para o desenvolvimento de protocolos para a formação de comboios autônomos.

### 2.3.3

#### Estabilidade de corda

A principal propriedade emergente da união dos sistemas auto-organizáveis, discutidos anteriormente neste capítulo, e a formação de comboios veiculares é a estabilidade da corda. Considera-se este conceito como a materialização de uma propriedade emergente, descrita como uma característica que o sistema global auto-organizável apresenta quando as entidades-parte do sistema estão em alguma formação. Portanto, define-se que a estabilidade de corda é uma propriedade intrínseca ao sistema global de formação de comboios.

A teoria da estabilidade de corda para sistemas interconectados foi estudada por Swaroop & Hedrick [49] que considerou cenários para sistemas de seguimento automático de veículos. Além disso, segundo o autor, os teoremas apresentados por este trabalho são condições suficientes para garantir a estabilidade de corda para sistemas não-lineares. Logo, por transitividade, aplica-se a estabilidade de corda na formação de veículos em comboio.

A estabilidade de corda é uma propriedade de suma importância para a

formação de comboios de veículos pois garante, sob condições normais, que o sistema não causa colisões. Um algoritmo de controle para a formação de comboios é considerado estável a nível de corda se os erros de posição, aceleração e velocidade transmitidos não forem amplificados até o final da frota.

A prova de estabilidade de corda de algum algoritmo de controle, de acordo com a norma padrão, é feita analisando a resposta deste algoritmo frente às oscilações introduzidas pela aceleração/frenagem de veículos à frente. Se a oscilação não é amplificada por veículos ao final do comboio, isto é, os veículos não criam o chamado “tráfego fantasma” e nem causam engavetamentos, então o algoritmo de controle apresenta estabilidade de corda.

Um experimento de exemplo criado originalmente por Segata et al. [18] foi executado com o objetivo de demonstrar de forma visível a ausência da estabilidade da corda gerada pela oscilação de velocidade em uma frota de 8 veículos. Na figura 2.4, o veículo líder começa a apresentar uma amplitude de oscilação de 10 km/h com 5 segundos de simulação, o que gera consequências no espaçamento entre os veículos seguidores. Percebe-se que o espaçamento aumenta do início (cabeça) para o final (cauda) do comboio gerando o conhecido “tráfego fantasma”.

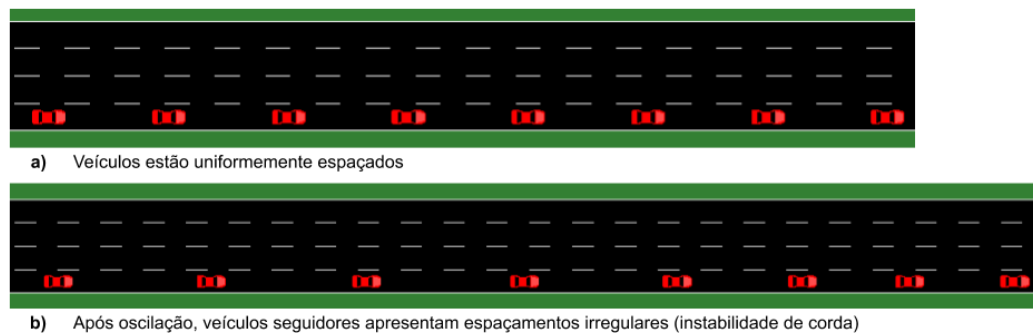


Figura 2.4: Ausência de estabilidade de corda percebida após oscilação da velocidade do veículo líder da frota

A ausência da estabilidade de corda na formação do comboio é demonstrada na figura 2.5. O gráfico contém as distâncias de afastamento dos veículos 1 ao 7. Percebe-se que a amplitude da oscilação vai aumentando do segundo ao último veículo. Esta “instabilidade” pode levar desde a redução dos benefícios de uma formação do comboio até mesmo ao engavetamentos de múltiplos veículos.



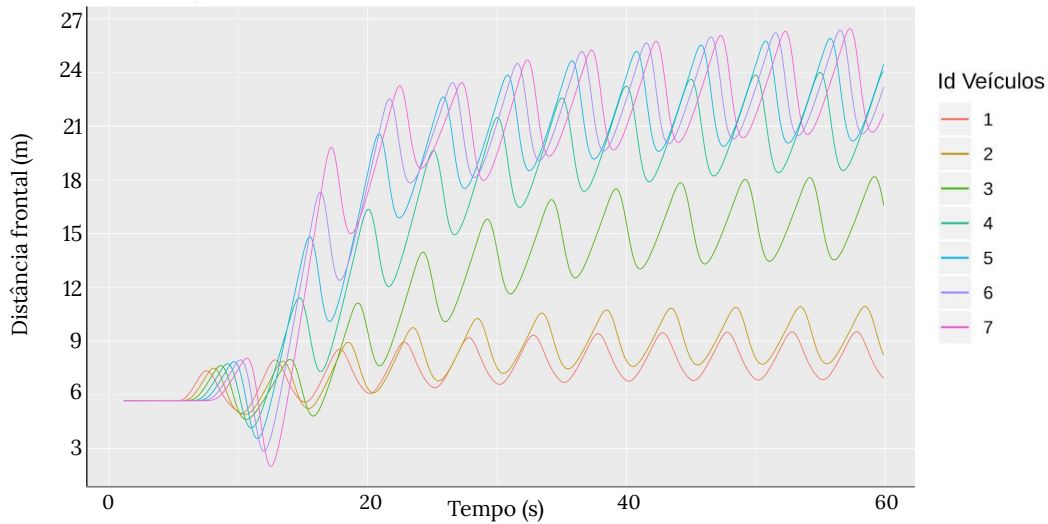


Figura 2.5: Gráfico demonstra ausência de estabilidade de corda na formação de comboio

Ao contrário do que foi apresentado no gráfico da figura anterior, dispositivos interconectáveis com algoritmos de controle que detêm característica de estabilidade de corda apresentam uma oscilação que não é amplificada ao longo do tempo, permitindo assim a manutenção das distâncias inter-veiculares da formação de comboio. Percebe-se no gráfico da figura 2.6 o mesmo grupo de veículos do exemplo da figura 2.4 parte (a), que desta vez utilizaram um algoritmo de controle com estabilidade de corda. Mesmo sob distâncias mais curtas (5 metros), os veículos seguidores mantiveram uma distância uniforme para os veículos imediatamente à frente.

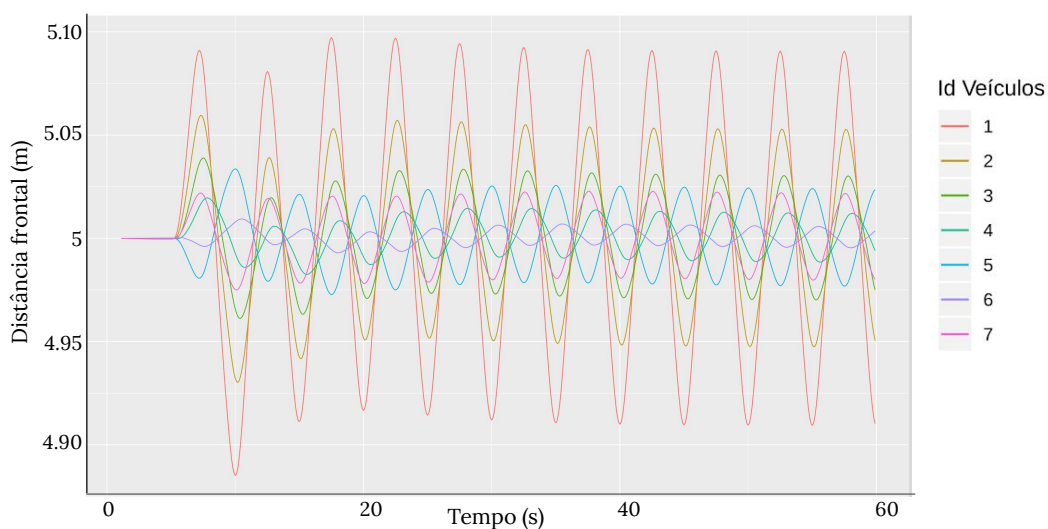


Figura 2.6: Gráfico mostra a não amplificação de uma oscilação introduzida pelo veículo líder da frota

### 2.3.4

#### Sistemas de Controle

A direção cooperativa confia em tecnologias e sistemas de controle para ajustar parâmetros relativos à dinâmica do veículo. Os sistemas de controle desempenham um considerável número de tarefas na vida cotidiana, desde ajustar de forma automática a temperatura de um cômodo e até atuar no pouso e decolagem de uma aeronave.

Os sistemas de controle regulam, gerenciam e atuam sobre o comportamento de outros sistemas com o objetivo de alcançar um objetivo desejado. Um exemplo simples é a gerência da temperatura de um cômodo. O objetivo é manter uma temperatura desejada e o sistema é um aparelho resfriador (ou aquecedor) de ar. O sistema de controle mede a temperatura atual do cômodo por meio de sensores e compara o valor medido com a temperatura desejada. Se o valor medido estiver diferente do valor desejado, o sistema de controle envia comandos ao aparelho aquecedor/resfriador de ar para aumentar ou diminuir a temperatura.

No que diz respeito a direção cooperativa, os sistemas de controle longitudinal têm objetivo de regular a velocidade e a distância inter-veicular das formações de comboios. Atualmente, há diferentes tipos de sistemas de controle longitudinal e estes variam especialmente no nível de autonomia. Na sequência, os controladores de cruzeiro existentes para veículos serão discutidos.

#### Controlador de Cruzeiro

Um sistema simples de controle longitudinal são os sistemas de Controle de Cruzeiro (CC), em que um motorista estabelece qual a velocidade constante desejada para que o veículo possa mantê-la de forma automática. No entanto, se um carro em modo de CC aproximar-se de outro veículo em menor velocidade, o motorista deve desengatar tal controlador de cruzeiro para ajustar manualmente a velocidade do veículo, já que os sistemas simples de controle de cruzeiro não atuam na frenagem automática.

A tecnologia de controle de cruzeiro já não é tão nova e atualmente é largamente implantada em carros de diversas montadoras.

#### Controle de Cruzeiro Adaptativo

O Controle de Cruzeiro Adaptativo (ACC, do inglês *Adaptive Cruise Control*) é uma versão mais sofisticada do CC que utiliza tecnologias como radar e o lidar para monitorar e ajustar o espaçamento do veículo em relação a um veículo à frente. Para medir o espaçamento para até um alvo, o Radar detecta as ondas de rádio ao passo que o Lidar captura a luz refletida utili-

zando um sensor. Se o radar/lidar detectar um veículo em menor velocidade à frente, o ACC desacelera automaticamente a fim de manter um espaçamento de segurança. A observação de um referencial (veículo a frente) traz avanços em relação ao CC, possibilitando a diminuição do risco de acidentes e engavetamentos que poderiam ser causados por motoristas dispersos com o controle de cruzeiro simples engatado.

Para explicar a questão da velocidade de cruzeiro, considere que uma diferença de tempo definida no sistema como  $T = 1$  s para dois veículos trafegando a 30 m/s poderia representar um risco à segurança do comboio caso o veículo referencial precisasse realizar uma frenagem brusca. Portanto, uma diferença de tempo mínima deve ser definida para se garantir a segurança do veículo. Esta diferença de tempo é considerada como uma política de intervalo de tempo para garantir a segurança do ACC.

A equação de controle para o ACC é definida por Rajamani [50] como:

$$u_i = -\frac{1}{T}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1} + \lambda(x_i - x_{i-1} + l_{i-1} + T\dot{x}_i)),$$

onde  $\dot{x}_i$  e  $\dot{x}_{i-1}$  representam respectivamente a velocidade do veículo considerado e a velocidade de veículo da frente,  $x_i$  e  $x_{i-1}$  são suas posições,  $l_i$  é o comprimento do veículo da frente,  $T$  é o intervalo de tempo, e  $\lambda$  é um parâmetro relativo ao projeto. A velocidade relativa  $\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}$  e a distância para o veículo da frente  $x_i - x_{i-1} + l_{i-1}$  são calculados pelo radar/lidar. A distância desejada para o veículo da frente  $T\dot{x}_i$  é um valor não fixado que depende da velocidade de cruzeiro, conforme discutido anteriormente.

Para explicar a questão da velocidade de cruzeiro, considere que uma diferença  $T = 1$  s para dois veículos trafegando a 30 m/s poderia representar um risco à segurança do comboio caso o veículo referencial precisasse realizar uma frenagem brusca. Portanto, uma diferença de tempo deve ser definida como constante para se garantir a segurança do veículo. Esta diferença de tempo é considerada como uma política de intervalo de tempo constante para o ACC.

Além disso, pode-se garantir a estabilidade de corda para o sistema ACC, conforme provado por Rajamani, se o seguinte caso persistir:

$$T \geq 2\tau,$$

isto é, a diferença de tempo entre os veículos  $T$  deve ser pelo menos duas vezes igual ao atraso de atuação. Isso significa que se um atraso de atuação for igual à 0.5s, a distância de afastamento deve ser de pelo menos de 1s.

### Controle de Cruzeiro Adaptativo e Cooperativo

Embora o controlador ACC tenha trazido avanços no que diz respeito à dinâmica longitudinal em relação a um referencial à frente, os espaçamentos inter-veiculares dos comboios que utilizam a tecnologia ACC ainda são considerados grandes, o que impede que o sistema atinja seus objetivos de melhorar a vazão do trânsito e reduzir o consumo de combustível.

A comunidade científica passou então a trabalhar numa solução que utiliza a comunicação sem-fio para compartilhar informações relacionadas à cinemática dos veículos. O objetivo seria melhorar a reatividade dos sistemas de controle de cruzeiro, permitindo um agrupamento ainda mais “apertado” dos veículos da frota.

O uso do radar pelo controlador ACC permite apenas o conhecimento dos dados do veículo à frente. Já o Controle de Cruzeiro Adaptativo e Cooperativo (Cooperative Adaptive Cruise Control ou CACC) permitiria expandir o conhecimento quanto ao posicionamento, à velocidade e aceleração, considerando os dados de inúmeros veículos à frente ou atrás do veículo equipado.

A literatura oferece diferentes arquiteturas para CACC, distinguindo-se especialmente nos requisitos de projeto. Uma destas arquitetura foi demonstrada em experimentos nos projetos California PATH [51] e SARTRE [52] (em um conceito similar). Nestes projetos, os veículos reproduzem um espaçamento constante de respectivamente 6 e 5 metros entre os membros da formação de comboio.

Neste projeto de pesquisa foi adotada a fórmula de controle proposta pelo projeto California PATH, que foi assim definida:

$$u_i = \alpha_1 u_{i-1} + \alpha_2 u_0 + \alpha_3 (x_i - x_{i-1} + l_{i-1} + d_d) + \alpha_4 (\dot{x}_i - \dot{x}_0) + \alpha_5 (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}), \quad (2-1)$$

onde  $d_d$  representa a distância desejada em metros. As variáveis  $\alpha_i$  são definidas como:

$$\alpha_1 = 1 - C_1; \quad \alpha_2 = C_1; \quad \alpha_5 = -\omega_n^2 \quad (2-2)$$

$$\alpha_3 = -(2\xi - C_1(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}))\omega_n \quad (2-3)$$

$$\alpha_4 = -C_1(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n. \quad (2-4)$$

$C_1$  é um fator de ponderação definido entre as acelerações do líder e do veículo precedente.  $\xi$  é o coeficiente de amortecimento, e  $\omega_n$  é a largura de banda do controlador. Estes parâmetros podem ser alterados para ajustar o comportamento do controlador. Na equação 2-1, enfatiza-se que os parâmetros

da distâncias entre os veículos são detectados pelo radar, ao passo que a aceleração e a velocidade são obtidas através da interface de rádio.

Por fim, indica-se o trabalho de Segata [53] e Rajamani [50] para um entendimento mais detalhado da física por trás da controladores CACC.

## 2.4

### Direção Autônoma

Ao finalizar este capítulo, enfatiza-se que os sistemas de condução, possuindo ou não modo de direção cooperativa, possuem uma padronização quanto ao nível de autonomia. Conforme já discutido anteriormente, os controladores de cruzeiro como ACC ou CACC são considerados como tecnologias complementares ao sistema de condução do veículo.

O desenvolvimento da autonomia veicular passa pela definição de níveis de autonomia para delimitar as capacidades dos veículos autônomos. A Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE) definiu 6 níveis de autonomia no padrão J3016 [54]. Tais níveis de autonomia são descritos na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Níveis de autonomia de direção padronizados pela SAE

Nível	Nome	Descrição
0	Sem automação	O controle da direção é de total encargo do motorista mesmo se houver sistemas de segurança ativos no veículo.
1	Direção assistida	O veículo conta com sistemas de auxílio ao motorista e tecnologias assistivas como o controle de cruzeiro. Tecnologias como ACC podem ter controle parcial, isto é, podem atuar no movimento longitudinal ou lateral, porém não ambos ao mesmo tempo.
2	Direção autônoma parcial	O sistema de direção autônoma pode acionado pelo motorista. O condutor humano assumirá a responsabilidade de supervisionar a direção e detectar alterações no ambiente. O sistema poderá manipular a direção longitudinalmente, controlar a velocidade e mudar de faixa a partir do comando do condutor humano.
3	Direção autônoma condicional	O sistema de direção autônoma é capaz de assumir o controle da direção, aceleração e frenagem. O sistema deve permitir a intervenção de um condutor humano em casos eventuais, que apresentem ou não risco.
4	Direção autônoma alta	O sistema de direção autônoma pode pedir que haja intervenção de condutor humano apenas nos casos em que o domínio operacional do sistema não esteja apto para atuar na condução. Ex.: Localidades em que o sistema autônomo de direção não estiver legalizado.
5	Direção autônoma completa	Neste nível, o condutor humano torna-se um mero passageiro. As funções de controle da direção são inteiramente responsabilidade do sistema autônomo e o condutor humano não será solicitado em circunstância alguma. O passageiro tem a responsabilidade apenas de informar o local de destino desejado.

O desenvolvimento das capacidades de direção autônômica podem representar, ao mesmo tempo, maiores capacidades de cooperação entre veículos para a formação de comboios. Portanto, quanto maiores os níveis de autonomia de um veículo com sistema de condução autônoma, maior poderá ser sua capacidade de cooperar para a auto-organização dos veículos em formação de comboios.

### 3

## Trabalhos Relacionados

Nesta seção, serão analisadas as publicações que, em alguma medida, se relacionam à esta pesquisa. Encontra-se na literatura alguns trabalhos que propõem estratégias para a organização de veículos conectados em formações de comboios, baseando-se em alguma meio de interação com ou sem comunicação entre veículos. Outros trabalhos discutem a realização de manobras do ponto de vista de teoria de controle. Portanto, da perspectiva de interação, serão discutidas outras propostas de arcabouços e protocolos para o gerenciamento de comboios de veículos. E do ponto de vista de controle, serão abordadas estratégias para o controle longitudinal e lateral de veículos em formação de comboios.

Inicialmente, a movimentação lateral e longitudinal autônoma dos veículos foi pensada como responsabilidade de um Sistema Inteligente de Auto-estrada (AHS, do inglês *Automated Highway System*), em que a infraestrutura central seria encarregada de direcionar aspectos como deslocamento e ordenação dos veículos seguindo algum critério (Ex.: destino, tipo do veículo).

Abordagens que observam a formação de comboios sob o ponto de vista de teoria de controle foram propostas em [42, 51]. Em [42], os autores propuseram uma manobra de junção de dois comboios consecutivos em uma mesma faixa, demonstrando como a operação seria realizada em diagramas de máquinas de estados. Em [51], manobras de separação (*split*), entrada (*join*) e mudança de faixa (*lane-change*) foram descritas considerando a movimentação individual de veículos em comboios. Em ambas as abordagens, o controle da movimentação dos veículos é centralizado em um sistema AHS, o que se difere do aspecto descentralizado de nossa abordagem. Além disso, considera-se que um mecanismo de detecção acoplado individualmente a cada veículo, observando as circunstâncias do ambiente, pode disparar a necessidade de formar comboios dinamicamente.

Outros trabalhos abordam a formação de comboios sob um aspecto descentralizado, isto é, os veículos se coordenam e colaboram entre si sem a necessidade de uma infraestrutura externa concentrar o envio de comandos.

O trabalho de Hallé et al. [55] propõe um sistema baseado em agentes para a direção colaborativa. O sistema se vale do conceito de trabalho

em equipe (*teamwork*) para atribuir papéis para os veículos envolvidos na manobra. Este trabalho baseia-se na metodologia proposta pelo autor supracitado para conferir papéis aos veículos líderes e não líderes de um comboio seguro/não-seguro. Porém, foi percebido que o modelo proposto pelo autor não incorpora a propriedade de estabilidade de corda, descrita neste trabalho como a característica emergente de uma formação de comboio auto-organizável.

Michaud et al. [56] apresenta diversos mecanismos de coordenação distribuída que consideram uma (1) estratégia descentralizada, onde não há interação entre os veículos, uma (2) estratégia distribuída entre os veículos envolvidos no comboio, e uma (3) estratégia centralizada no líder para orquestrar as manobras. O trabalho trouxe uma contribuição empírica, demonstrando a viabilidade da formação de comboios e da execução de manobras utilizando um conjunto de robôs. Contudo, o trabalho não trouxe informações se os membros formadores de um comboio conseguiram manter a estabilidade de corda do grupo e também não demonstrou métodos para alocar veículos em diferentes posições de um comboio.

Segata et al. propôs um arcabouço chamado Plexe [57, 18] para a formação de comboios em ambiente de simulação. Neste trabalho, o autor integrou modelos de tecnologias de controle de cruzeiro (ACC e CACC) e realizou modificações na física e mecânica dos modelos virtuais de veículos com o objetivo de proporcionar cenários mais realísticos para a experimentação de comboios. Ademais, o arcabouço confia na comunicação inter-veicular utilizando o padrão IEEE 802.11p para a troca de parâmetros essenciais à formação e estabilização das frotas. Este trabalho propõe a extensão do *framework* desenvolvido pelo autor supracitado para a inclusão de novos métodos e protocolos que preservam a auto-organização das formações de comboios veiculares.

Uma extensão do trabalho [58] mencionado acima investiga as interferências da entrada de veículos não autônomos em comboios durante uma manobra de entrada, além de analisar o impacto das perdas de pacote na realização desta manobra. O cenário discutido pelo autor trata de um comboio já formado autorizando a entrada de um veículo solicitante. Em contraste com o trabalho do autor, este trabalho discute a formação de comboios em tempo de execução e sob aspecto dinâmico, com o objetivo de adaptar-se às mudanças no ambiente. Além disso, o trabalho do autor não propõe a inserção de novas manobras de entrada como o acesso a um comboio pela frente e não discute critérios para atribuir posições de entrada em comboios.

Amoozadeh et al. [17] apresentou um arcabouço para a formação de comboios a partir da ativação de um sistema de controle longitudinal. O sistema



também utiliza o padrão IEEE 802.11p para comunicação de parâmetros de controle entre os veículos. Ademais, este trabalho apresentou um protocolo de gerenciamento para comboios que se baseia em micro-comandos que permitem a entrada, separação e mudança de faixa de veículos. Contudo, este modelo se limita a propor entradas de veículos na retaguarda dos comboios. De resto, os comboios parecem ter sido reproduzidos de forma “estática” e as manobras utilizadas como exemplo parecem ter sido executadas apenas em comboios já formados. Por fim, o autor também não discutiu quais seriam os possíveis critérios para alocar veículos em diferentes posições de comboios.

Kazerooni & Ploeg [59] propôs uma estratégia baseada em agentes para realizar o entrelaçamento de comboios em faixas diferentes. Os autores simularam um evento de redução de faixas para ativar a direção cooperativa entre veículos de faixas distintas. Da literatura investigada, este foi o primeiro trabalho que percebe-se a introdução de uma manobra de comboio como solução para modificações no contexto rodoviário. Contudo, o trabalho se restringe a abordar apenas a manobra de entrelaçamento, e o cenário de experimento apenas considera comboios já formados. Ademais, o trabalho não faz qualquer menção à aspectos de auto-organização. Nosso trabalho, em contraste com a proposta do autor, se aproveita da interação já existente entre os veículos para iniciar a formação de comboios e a execução de manobras em adaptação às modificações do contexto rodoviário.

Alguns trabalhos discorrem sobre a tarefa de realizar a movimentação lateral de veículos com ênfase na cinética. Em outras palavras, estes trabalhos discutem como os veículos parcial ou completamente autônomos realizam manobras de mudança de faixa.

Os trabalhos de Nilsson et al. [60, 61] discutem, sob o ponto de vista de controle, a forma com que os veículos de direção autônoma podem decidir sobre mudanças de faixa em rodovias, além de definir como e quando estes veículos podem executar as movimentações laterais por meio de um protocolo de mudança de faixa. A abordagem utilizada busca solucionar problemas de Modelo de Controle Preditivo (MPC, do inglês *Model Predictive Control*).

Segundo um destes trabalhos [61], o algoritmo de decisão de trajetória a ser realizada busca determinar (1) a lacuna inter-veicular e o instante para executar a manobra, (2) o corredor longitudinal seguro, (3) a trajetória longitudinal, (4) o corredor lateral seguro, (5) a trajetória lateral. Este trabalho nos inspirou para então considerar o cálculo de uma posição de entrada para veículos ingressantes em comboios, embora não trate de aspectos relevantes para a auto-organização de comboios, como a propriedade emergente de estabilidade de corda.

## 4

# Um modelo para gerenciamento de comboios auto-organizáveis

Neste capítulo propomos um modelo para o gerenciamento de comboios baseado em princípios de auto-organização. A Seção 4.1 descreve o cenário e o contexto em que o modelo pode atuar. Na Seção seguinte, detalha-se o processo de execução, que representa o caminho para a auto-organização do modelo proposto. Na Seção 4.3, descreve-se uma lista de requisitos necessários à implementação do modelo de gerenciamento de comboios auto-organizáveis. Na Seção 4.4, examina-se as premissas necessárias para a construção de sistemas auto-organizáveis e verifica-se a conformidade do modelo proposto com tais requisitos.

### 4.1

#### Cenário

Seja uma frota de veículos  $V$  trafegando em via pública com um conjunto de faixas  $L$ . Em dado momento, um trecho da via tem o número de faixas reduzido em virtude de um acidente ou de um estreitamento sinalizado. Logo após a detecção de redução do número de faixas livres à frente, os veículos devem encontrar uma forma de se ajustarem à modificação do ambiente em que estão inseridos, buscando manter a segurança, promover a estabilidade e, se possível, reduzir custos de energia.

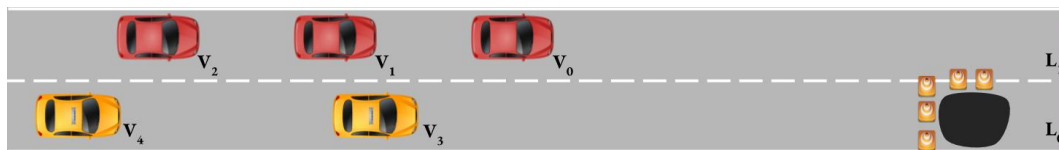


Figura 4.1: Cenário do problema

### 4.2

#### Processo de auto-organização

Para encontrar uma solução para o cenário apresentado, um processo de execução baseado em fundamentos de auto-organização é criado com o objetivo de fazer com que os veículos saiam de um estado de desorganização e busquem o equilíbrio por meio de formações de comboio.

Neste trabalho, entende-se que a auto-organização aplicada a formação de comboios veiculares dinâmicos é um processo intrinsicamente relacionado ao contexto ambiental, que visa prover uma estrutura estável para a mobilidade lateral e longitudinal das entidades-parte (veículos) do organismo global (comboios) adaptando-se às condições existentes no ecossistema rodoviário.

Entende-se que o modelo deve possuir os seguintes componentes para a formação dos comboios veiculares auto-organizáveis: o (1) mapeamento contínuo do posicionamento dos nós (atual e circunvizinhos), a (2) detecção precoce de alterações no contexto como bloqueios ou reduções de faixas, a (3) distribuição de papéis entre os veículos envolvidos na formação, os (4) ajustes longitudinais e laterais necessários para a formação e, por fim, os (5) ajustes para a estabilização da frota de veículos. A figura 4.2 ilustra o processo de auto-organização proposto no modelo.

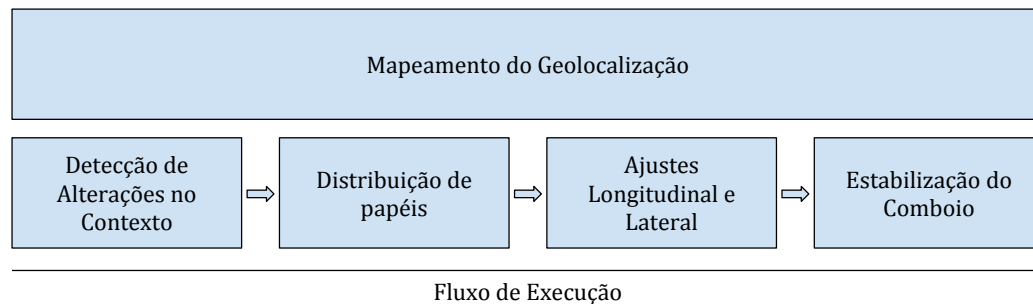


Figura 4.2: Processo de execução da auto-organização do modelo

Para o correto funcionamento, o processo de auto-organização descrito neste trabalho depende do suporte de tecnologias de detecção de eventos e de interfaces de comunicação sem-fio (ex.: rádios). Nos próximos capítulos as fases expostas no processo de auto-organização serão discutidas, delimitando sua atuação e os procedimentos necessários.

#### 4.2.1

##### Mapeamento da Geolocalização

Esta fase baseia-se na troca periódica de mensagens entre os veículos para armazenamento dos últimos estados de posicionamento, velocidade e aceleração. Esta estratégia foi um dos métodos genéricos propostos por Dressler [23], que descreveu sobre a necessidade de mecanismos de localização e descobrimento de estados da vizinhança para a operacionalização de auto-organização em redes ad hoc.

A partir dos dados de posicionamento (ex.: posição em X, posição em Y, faixa atual) enviados por cada veículo nas redondezas, é possível projetar um mapa em cada veículo com a posição do próprio veículo e de seus “vizinhos”,

isto é, os veículos nas redondezas. É importante que este mecanismo esteja em correto funcionamento e seja resiliente à falhas de adulteração dos dados para que os veículos recebam constantemente a posição correta e atualizada de seus pares próximos. Para este cenário, considera-se que cada veículo possui um nível básico de autonomia capaz de informar a faixa atual em que o veículo está trafegando.

Entende-se que para que o processo de auto-organização tenha eficácia, os rádios de comunicação precisam ter um alcance abrangente. Por isso, considera-se que os veículos estão equipados com rádios de comunicação IEEE 802.11p, que possuem alcance de até 1 quilômetro. Enfatiza-se que este trabalho não trata de interferências que podem atingir as comunicações via rádio (ex.: *fading*, variação de atraso).

O mapeamento das posições dos veículos têm um papel fundamental no modelo proposto neste trabalho, pois outros componentes dependem de seu correto funcionamento para a tomada de decisão, como é o caso dos componentes que realizam a definição de papéis e o ajuste longitudinal dos veículos.

#### 4.2.2

##### **Deteccção de mudanças no contexto rodoviário**

O componente de deteção de mudanças no contexto se inspira em diversos sistemas de deteção [62] que utilizam tecnologias como sensores, câmeras e algoritmos de visão computacional para criar alertas a motoristas sobre situações relacionados ao ambiente em que o veículo está inserido. Estas aplicações são conhecidas como Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS, do inglês *Advanced Driver-Assistance Systems*).

Exemplos de alertas gerados por ADAS podem servir para a deteção de placas de sinalização ou até mesmo para a percepção de pedestres e ciclistas em via públicas com pouca luminosidade. Os alertas podem emitir um sinal ao motorista ou até mesmo a outros sistemas para fazer o veículo agir autonomicamente de forma reativa ou proativa em relação ao ambiente em que está situado.

No modelo proposto, os veículos contém um componente para a deteção de bloqueios capaz de identificar quais são os trechos e faixas trafegáveis e as não trafegáveis a partir da percepção de objetos das redondezas. Estes objetos são percebidos pelo detector a uma distância de afastamento mínima, que permite um veículo perceber os pontos de interesse para a faixa em que está trafegando e até mesmo para as faixas adjacentes.

O alcance de deteção, ou distância de afastamento para o alvo, é um

parâmetro que depende de fatores como a quantidade de câmeras embarcadas em um veículo e a tecnologia de reconhecimento utilizada para realizar o mapeamento do ambiente. Um veículo pode, por exemplo, ser capaz de detectar apenas objetos à sua frente em um alcance de até 20 metros enquanto outro possui câmeras que somadas detêm capacidade de mapeamento de 360 graus com alcance de detecção de até 200 metros.

A figura 6.2 ilustra a detecção de objetos na pista, como a presença de um triângulo que indica bloqueios de faixas por veículos enguiçados.

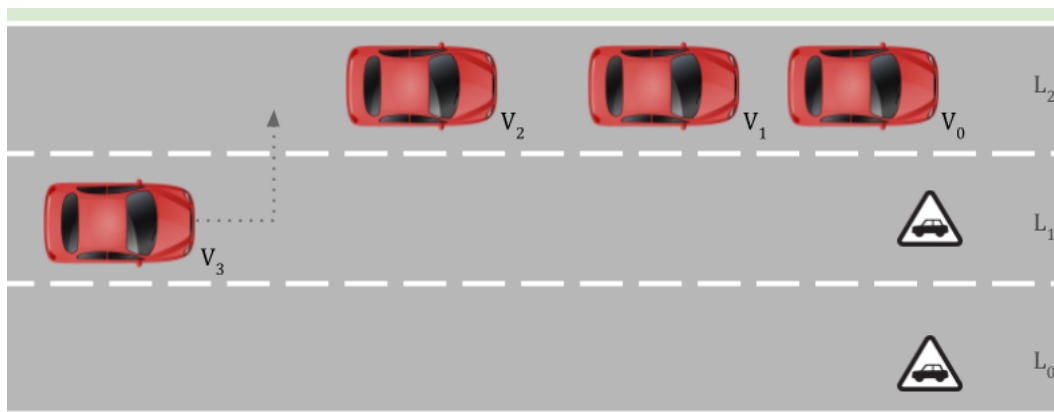


Figura 4.3: Detecção de bloqueios nas faixas  $L_0$  e  $L_1$  sugere uma mudança de faixa para o veículo  $V_3$

Há sistemas ADAS para a detecção de objetos como placas de sinalização incorporados a diversas aplicações de montadoras de veículos, como a Tesla [63] e a Volvo [64].

### 4.2.3 Distribuição de Papéis

Após a percepção de algum bloqueio ou restrição em alguma faixa, os veículos devem identificar seu papel em relação ao grupo, isto é, se assumirão a função de líderes ou de seguidores em suas faixas. Neste sentido, o trabalho de Hallé et al. [55] e Segata et al. [58] surge como fonte de inspiração para esta proposta. A intenção é permitir a definição dos papéis a partir da disposição dos nós no mapa, isto é, os veículos mais à frente em suas faixas são indicados implicitamente como “líderes” e os “seguidores” são assim qualificados por estarem atrás dos líderes. Cabe ressaltar a importância de se ordenar o posicionamento dos veículos que estejam trafegando na mesma orientação (ex.: norte, nordeste, sul, sudeste, etc), até para que não sejam agrupados veículos trafegando em diferentes sentidos.

Além disso, definimos um papel suplementar que indica se o veículo está ou não em uma faixa segura. Faixas seguras são as faixas que não terão algum bloqueio dado um parâmetro de alcance de detecção.

A figura 4.4 exemplifica esta atribuição de papéis, com os veículos das faixas não seguras  $L_0$  e  $L_1$  sendo classificados respectivamente como líderes não seguros ( $UL_0$  e  $UL_1$ ) e seguidor não seguro ( $UF_0$ ). No caso da faixa segura  $L_2$ , classifica-se os veículos como líder seguro ( $SL_0$ ) e seguidores seguros ( $SF_0$  e  $SF_1$ ).

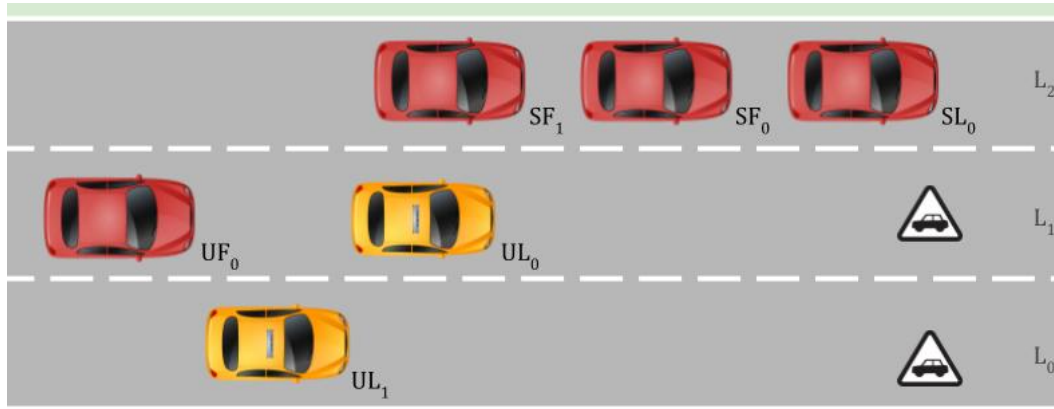


Figura 4.4: Atribuição de papéis para os veículos em contexto de bloqueios de faixa

Os líderes também têm um papel relevante no modelo proposto neste trabalho. Além de poderem sinalizar a presença de um bloqueio de forma antecipada, os líderes comunicam o início de uma formação de comboio oportunizada pelo contexto em que estão inseridos. Ademais, os veículos líderes serão responsáveis por orquestrar os ajustes longitudinais e laterais, controlar a velocidade da frota, além de engajar os veículos “seguidores” a iniciar os controladores de cruzeiro.

#### 4.2.4 Ajustes Longitudinais e Laterais

No modelo proposto, descreve-se a possibilidade de entradas frontal e traseira na formação de comboios auto-organizáveis. Respondendo a desafios levantados por Segata [53], que questiona quais são os critérios e como sequenciar veículos em formações de comboios, este trabalho avança o estado da arte dos modelos de gerenciamento de comboio por permitir que, ao mesmo tempo, os veículos iniciem uma formação de comboio de acordo com o contexto e realizem ingressos tanto pela frente como pela retaguarda, de acordo com um critério simples de alocação de posições na formação da frota.

De acordo com o modelo proposto, resumimos em fluxogramas as principais ações para a execução de ajuste longitudinal e lateral diferenciando-as de acordo com o papel dos veículos no comboio. Enfatiza-se, contudo, que as ações descritas nos fluxogramas apresentam o comportamento do modelo em alto nível. Uma descrição mais detalhada da implementação deste modelo está contida no capítulo subsequente deste trabalho.

A figura 4.5 representa o fluxo de execução de um líder em faixa segura, logo após detectar um bloqueio/redução de faixa em uma rodovia. O objetivo do líder neste contexto é garantir a segurança e melhorar a vazão do fluxo.

O início da formação de comboio pode ser realizado por disseminação de mensagens de rede, ou mesmo de forma implícita caso os dados disseminados na fase de mapeamento da geolocalização sejam aproveitados. Já os dados do cruzeiro como velocidade, posição e aceleração atual devem ser compartilhados via interface de rede para que os veículos seguidores possam engajar seus controladores de cruzeiro.

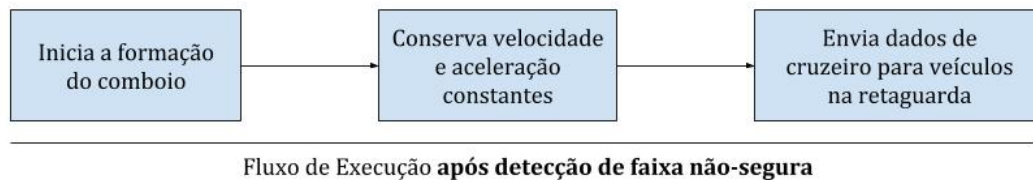


Figura 4.5: Fluxo de execução para líder em faixa segura

A figura 4.6 representa o fluxo de execução de um seguidor em faixa segura, logo após detectar um bloqueio/redução de faixa em uma rodovia. O objetivo do seguidor neste contexto é reduzir a distância inter-veicular para auxiliar a entrada de outros veículos provenientes de faixas não-seguras. Um ganho extra são os benefícios aerodinâmicos, resultado em menor consumo de combustível conforme demonstrado anteriormente pelo trabalho de Bergenhem et al. [65].

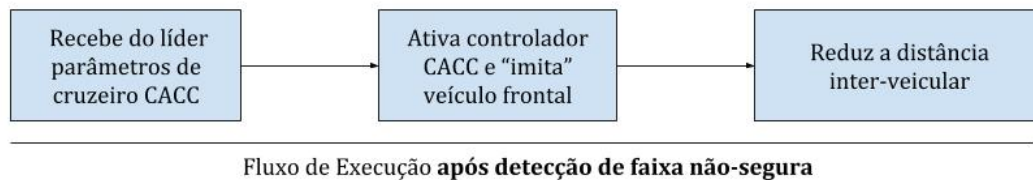


Figura 4.6: Fluxo de execução para seguidor em faixa segura

A figura 4.7 representa o fluxo de execução de um líder em faixa não segura, logo após detectar um bloqueio/redução de faixa em uma rodovia. O objetivo do líder neste contexto é ajustar a sua posição longitudinal para

acessar o comboio em faixa segura pelo caminho mais curto, seja entrando à frente ou atrás, além de garantir a segurança ao mudar de faixa a fim de evitar acidentes.

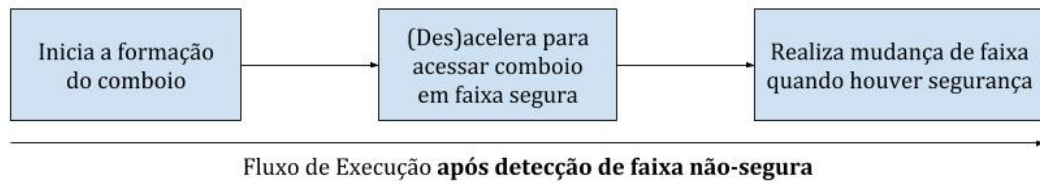


Figura 4.7: Fluxo de execução para líder em faixa não segura

A figura 4.8 apresenta o fluxo de execução de um seguidor em faixa não segura, logo após detectar um bloqueio/redução de faixa em uma rodovia. O objetivo do seguidor neste contexto é ajustar a sua posição longitudinal, sincronizando ou não o movimento com o veículo à frente, para acessar o comboio em faixa segura pelo caminho mais curto, seja entrando à frente ou atrás, além de garantir a segurança ao mudar de faixa a fim de evitar colisões.

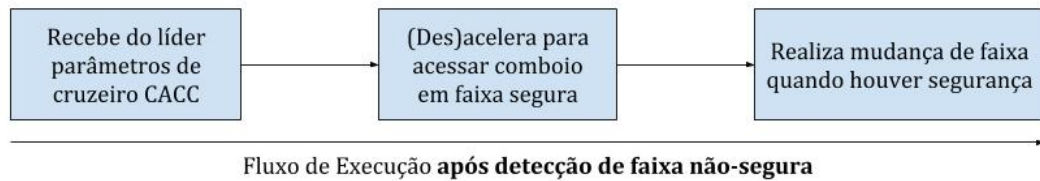


Figura 4.8: Fluxo de execução para seguidor em faixa não segura

#### 4.2.4.1

##### Alocação da Posição de Entrada

No modelo proposto, os veículos líderes de faixas seguras são responsáveis por sugerir a posição de entrada para veículos ingressantes em um comboio. Os veículos líderes observam a posição do veículo solicitante em relação ao seu comboio.

O critério de alocação de posições observa a posição longitudinal do veículo solicitante no momento da solicitação de entrada. A partir da posição deste veículo, calcula-se a distância euclidiana do veículo solicitante para início e final do comboio. A intenção é medir qual o ponto mais próximo para uma entrada segura, isto é, a distância euclidiana mínima para acesso à frota segura.

Um exemplo foi ilustrado na figura 4.9. Os veículos em formação de comboio  $V_0$ ,  $V_1$  e  $V_2$  criam lacunas numeradas de 0 a 3. Neste modelo proposto o ingresso de um veículo entre dois carros de um comboio não é tratado, portanto a entrada de um veículo somente será possível nas lacunas 0 ou 3, isto é, o ingresso deverá ser pela frente ou pela retaguarda da frota.



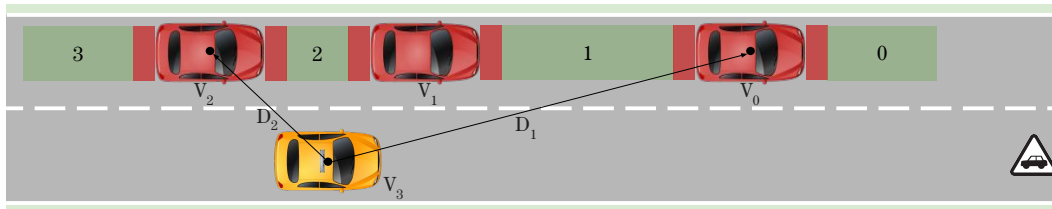


Figura 4.9: Posição sugerida pelo líder observa critério de distância euclidiana

Baseado nas distâncias euclidianas  $D_1$  e  $D_2$  calculadas pelo veículo  $V_0$  para entrada do veículo  $V_3$ , percebe-se que o líder deverá sugerir a entrada pela cauda do comboio (posição 3).

#### 4.2.4.2 Manobras

Em outras palavras, os ajustes longitudinal e lateral dos veículos ao ingressarem, saírem ou dissolverem comboios são também conhecidos como manobras.

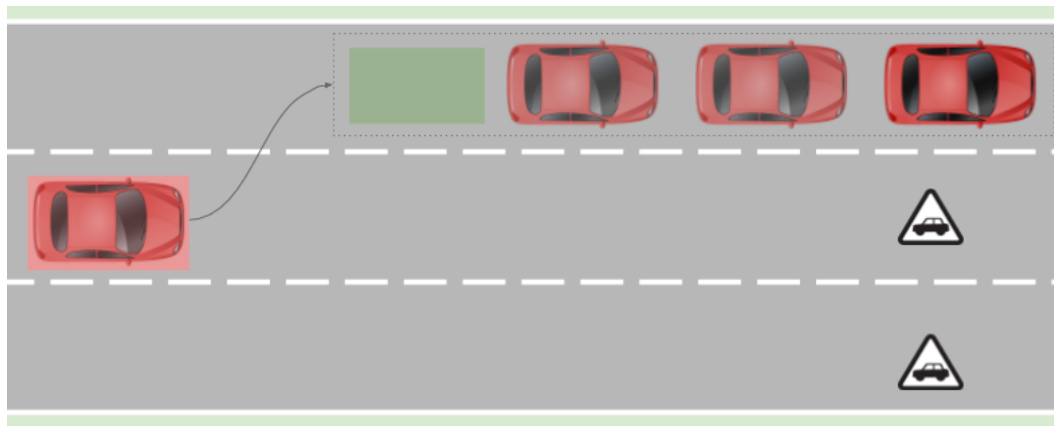
As manobras de entradas, de saída, de entrelaçamento e dissolução de comboios são discutidas em um aspecto mais voltado ao controle preditivo de trajetória em outros trabalhos [66, 61]. Este trabalho não tem por objetivo discorrer em detalhes sobre questões de trajetória e de controle lateral.

Conforme discutido por [66], embora algumas pesquisas e testes de campo tenham sido bem-sucedidos no que diz respeito a manobras laterais, ainda há necessidade de pesquisas mais abrangentes que ajudem a fortalecer a área e preparar o caminho para a padronização destas manobras. Este modelo proposto vai de encontro a esta necessidade, por isso este trabalho oferece um modelo para o gerenciamento de comboios que permite ao mesmo tempo a entrada pela frente (*Join at front*) e entrada pela retaguarda (*Join at Back*).

Nas próximas seções o funcionamento da manobra *Join at Front* e *Join at Back* é decrito em maiores detalhes.

#### 4.2.4.3 *Join at Back*

A manobra *Join at Back* consiste da entrada de um veículo na cauda do comboio. Deve haver uma autorização do líder da frota para que o ingresso do veículo seja possível. A figura 4.10 ilustra o espaçamento a ser ocupado (em cor verde) após a realização da manobra.

Figura 4.10: Cenário de manobra *Join at Back*

Considere um veículo  $S$  ingressando um comboio, em particular pela parte de trás. Apenas dois veículos estão envolvidos no procedimento: o líder  $L$ , responsável por coordenar os movimentos de manobra e o veículo ingressante  $S$ . O movimento pode ser descrito como segue:

1.  $S$  detecta um bloqueio na faixa em que está trafegando e solicita entrada em comboio liderado por  $L$ ;
2.  $L$ , baseado em algum critério, decide autorizar ou negar a entrada do veículo. Em caso de negação, uma mensagem é enviada e o procedimento termina. Em caso de permissão,  $L$  define a posição de entrada de  $S$  e autoriza a entrada do veículo  $S$  no final do comboio;
3.  $S$ , após receber a autorização para entrada pela cauda do comboio, ajusta uma aceleração fixa longitudinal positiva ou negativa para mudar de faixa de forma segura, de acordo com a distância para a posição;
4.  $S$  percebe que há segurança e realiza mudança de faixa.  $S$  informa a  $L$  que está pronto para realizar aproximação;
5.  $L$  autoriza  $M$  a se aproximar;
6.  $S$  se aproxima do comboio para permanecer na distância inter-veicular definida, ativa o controlador de cruzeiro e notifica  $L$ ;
7.  $L$  comunica uma atualização da formação do comboio para todos os integrantes.

## 4.2.4.4

**Join at Front**

A manobra *Join at Front* consiste da entrada de um veículo na primeira posição da frota. Nesta situação deve haver a transferência de liderança (passagem de bastão) do veículo mais à frente do comboio para o veículo ingressante na posição frontal. A Figura 4.11 ilustra em cor verde a posição a ser ocupada pelo veículo ingressante após a realização da manobra.

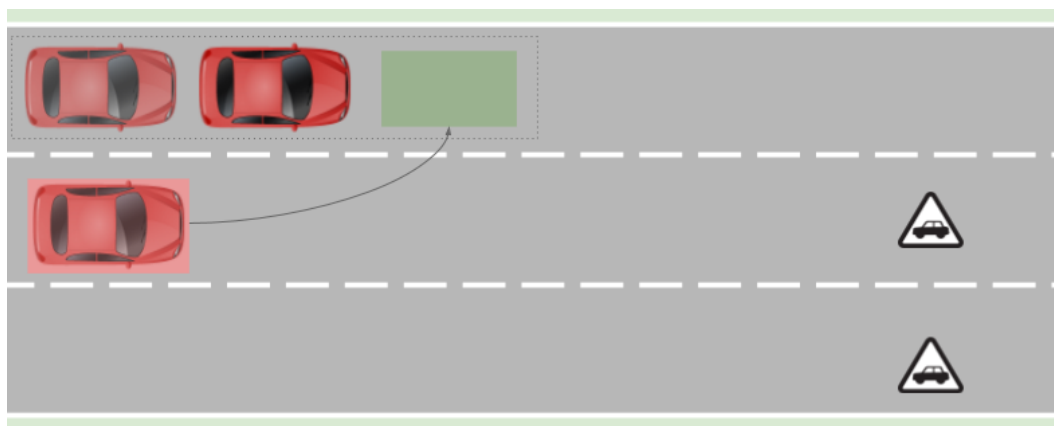


Figura 4.11: Cenário de manobra *Join at Front*

Considere um veículo ingressando um comboio pela parte de frente. Apenas dois veículos estão envolvidos no procedimento: o líder  $L$ , responsável por coordenar o movimento e o veículo ingressante  $S$ . O movimento pode ser descrito como segue:

1.  $S$  detecta um bloqueio na faixa em que está trafegando e solicita entrada em comboio liderado por  $L$ ;
2.  $L$ , baseado em algum critério, decide autorizar ou negar a entrada. Em caso de negação, uma mensagem é enviada e o procedimento termina. Em caso de permissão,  $L$  define a posição de entrada de  $S$  e autoriza a entrada de  $S$  na frente do comboio;
3.  $S$ , após detectar a autorização para entrada pela frente, ajusta (se necessário) uma aceleração fixa longitudinal para mudar de faixa de forma segura;
4.  $S$ , após o ajuste, percebe que há segurança e realiza mudança de faixa, acessando o comboio pela frente.  $S$  requisita  $L$  a entrega da liderança (passagem de bastão);
5.  $L$ , baseado em algum critério, autoriza ou nega a entrega de liderança. Caso seja negada, uma mensagem é disparada para  $M$  que pode seguir

seu percurso sem fazer parte do comboio. Caso contrário,  $L$  envia as informações do comboio para ajuste pelo novo líder;

6.  $S$  recebe as informações sobre o comboio, ajusta sua dinâmica longitudinal e atualiza sobre a mudança de líder e de formação aos outros integrantes;
7.  $L$  e outros veículos do comboio atualizam as informações da formação.  $L$  ativa o controlador de cruzeiro a passa a seguir o novo líder.

#### 4.2.4.5

##### Outras Manobras

Outras manobras utilizadas em comboios serão explicadas na sequência, porém estas não foram incorporadas ao modelo proposto.

A manobra *Join in the Middle* é realizada por um veículo ingressante que aguarda a orientação do líder para então acessar uma lacuna criada por outros veículos do comboio. A figura 4.12 ilustra o espaçamento a ser ocupado (em cor verde) pelo veículo ingressante após a realização da manobra. Um protocolo para realização desta manobra é descrito no trabalho de Segata et al. [58].

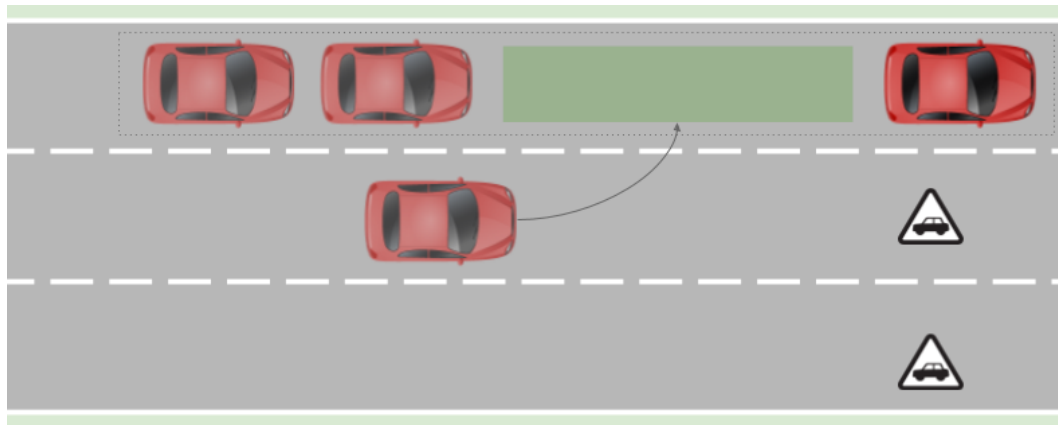


Figura 4.12: Cenário de manobra *Join in the Middle*

Outras movimentações longitudinais e laterais são descritas por Amoozadeh et al. [17], como as manobras de entrelaçamento (*Merge*) e divisão (*Split*). A manobra *Merge* é realizada por dois comboios trafegando a mesma faixa que formam um grande comboio. Na manobra de *Split* ocorre o inverso, um comboio separa-se em dois grupos menores.

Conforme discutido, o objetivo do modelo proposto, que incorpora as manobras *Join at Front* e *Join at Back*, é aumentar o potencial de auto-organização de um comboio por meio da uso de um processo de auto-organização e dos protocolos descritos. A agregação de outras manobras a este modelo ajudaria a aumentar o potencial de auto-organização do sistema.

### 4.2.5

#### Estabilização do Comboio

Definimos que a estabilização do comboio é alcançada após todos os seus membros estarem posicionados de forma segura em uma faixa não bloqueada, mantendo uma distância inter-veicular de resguardo em relação a veículos a frente.

Aqui vale uma diferenciação quanto à estabilidade de corda, conceito utilizado para sistemas interconectados que busca a não amplificação de uma oscilação de velocidade introduzida por um veículo parte do comboio.

É importante ressaltar que um modelo auto-organizável para o gerenciamento de comboios não demanda obrigatoriamente a qualidade de estabilidade de corda. Contudo, se for objetivo do modelo aumentar os níveis de reatividade em uma frota de veículos, esta propriedade é fortemente recomendada e deve ser perseguida durante ou após a estabilização do comboio.

A figura 4.13 sugere a estabilização do comboio antes da estabilidade de corda. Se o veículo  $V_3$  mantiver a trajetória projetada na realização da manobra *Join at Back*, a formação do comboio alcançará uma fase de estabilização inicial já que se observa que os espaçamentos inter-veiculares estão irregulares. Se for objetivo do sistema, uma fase subsequente de estabilização pode levar à manutenção de espaçamento regulares, trazendo estabilidade de corda ao comboio. Salienta-se a exigência pelo sistemas de controle longitudinal CACC para atuar nos ajustes necessários para alcançar tal qualidade.

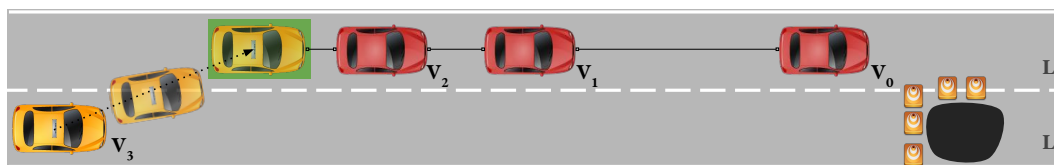


Figura 4.13: Estabilização do comboio não leva inicialmente à estabilidade de corda

### 4.3

#### Requisitos do Modelo

A fim de projetar este modelo, elicitamos os requisitos que abrangem aspectos de detecção, segurança, comunicação, controle, e dinâmica do protocolo de gerenciamento de comboios. Estes requisitos servem como norte para o desenvolvimento do modelo a ser apresentado no próximo capítulo.

Tabela 4.1: Requisitos do Modelo de Gerenciamento de Comboios Proposto

#	Requisito
1	O modelo deve permitir a inclusão de objetos de interesse que tenham o potencial de impactar e gerar mudança de comportamento dos veículos que os detectarem no meio rodoviário. Ex.: placas de regulamentação, objetos de sinalização (ex.: triângulo, barreiras).
2	O modelo deve possuir modelos de comunicação sem-fio, em especial modelos de comunicação inter-veicular IEEE 802.11p.
3	O modelo deve conter um dispositivo que permita detectar e sinalizar os objetos de interesse no meio rodoviário.
4	O modelo deve detectar faixas a serem bloqueadas.
5	O modelo deve permitir a troca de mensagens entre os veículos que fazem parte de um comboio.
6	O modelo deve permitir os veículos interagirem de forma periódica disseminando dados e estados que sejam de interesse de outros veículos que fazem parte de um comboio.
7	O modelo deve permitir a atribuição de papéis para os veículos que fazem parte de formação de comboios, levando em consideração as posições geográficas dos envolvidos.
8	O modelo deve levar em consideração as faixas das vias para formação e organização dos veículos.
9	O modelo deve optar por manobras que preservem a segurança dos veículos e não promovam acidentes ou engavetamentos.
10	O modelo deve ser capaz de executar a manobra <i>Join at Back</i> descrita neste capítulo.
11	O modelo deve ser capaz de executar a manobra <i>Join at Front</i> descrita neste capítulo.
12	O modelo deve ser capaz de promover a estabilidade de corda utilizando algum sistema de controle longitudinal (ex.: ACC, CACC).

#### 4.4

##### Requisitos de Auto-organização

Serugendo et al. [67] identificou um conjunto de garantias necessárias para projetar e construir sistemas auto-adaptativos e auto-organizáveis. Conforme considerado pelo autor, os sistemas auto-adaptativos avaliam o seu próprio comportamento global e o modificam caso não estejam cumprindo com o que foram destinados. Por entendermos que há convergência em vários aspectos de sistemas auto-adaptativos e sistemas auto-organizáveis, consideramos

relevante englobar também aspectos de sistemas auto-adaptativos para avaliar aspectos do modelo proposto. Logo, os componentes do modelo proposto serão verificados quanto à incorporação das garantias necessárias para o projeto e desenvolvimento de sistemas auto-organizáveis e auto-adaptativos. A Tabela 4.2 descreve as garantias a serem operacionalizadas no desenvolvimento de modelos auto-adaptativos e auto-organizáveis.

Tabela 4.2: Garantias necessárias para a construção de sistemas auto-organizáveis e auto-adaptativos

#	Tipo	Requisitos de Engenharia
R1	Componentes individuais autônomos	Os componentes devem ser desacoplados o máximo possível, para que seja possível detectar e responder à falha/indisponibilidade sem prejudicar fundamentalmente o sistema global.
R2	Interoperabilidade	Os componentes devem ser dissociados das descrições de suas capacidades, QoS, restrições, fluxos de execução, modos de interação ou políticas.
R3	Interoperabilidade	Os componentes devem ser desacoplados de qualquer infraestrutura subjacente de coordenação que suporte as interações dos componentes.
R4	Conscientização	Em tempo de execução: Capacidade de detecção/monitoramento de atividades realizadas em diferentes níveis (componentes individuais, parte ou todo o sistema).
R5	Conscientização	Em tempo de execução: Capacidade de raciocínio e de atuação/adaptação em diferentes níveis (componentes individuais, parte ou todo o sistema).
R6	Conscientização	Em tempo de execução: Disponibilidade e uso de políticas de detecção/monitoramento e de atuação/adaptação em diferentes níveis (componentes individuais, parte ou todo o sistema).
R7	Orientação e Limitação Comportamental	Em tempo de execução: Disponibilidade e uso de metas individuais e globais sob a forma de políticas.
R8	Orientação e Limitação Comportamental	Em tempo de execução: Disponibilidade e uso de políticas de restrição ambiental.
R9	Processo de desenvolvimento	Descrição em tempo de projeto das propriedades do sistema esperado/componentes.
R10	Processo de desenvolvimento	Descrição em tempo de projeto dos comportamentos autônomos.
R11	Processo de desenvolvimento	Descrição em tempo de projeto das diferentes políticas descritas em R6, R7, R8.
R12	Processo de desenvolvimento	Em tempo de execução: Aplicação das políticas descritas em R6, R7, R8.

As garantias são classificados em 5 tipos: (1) Componentes individuais autônomos, (2) Interoperabilidade, (3) Conscientização, (4) Orientação e Limitação de comportamentos e (5) Processo de desenvolvimento.

A garantia de componentes individuais autônomos reforça a busca por



modularidade e robustez necessária à sistemas auto-organizáveis e auto-adaptáveis.

As garantias de interoperabilidade permitem a sistemas auto-organizáveis e auto-adaptáveis a possibilidade de alcançar seus objetivos globais por meio da interações entre sistemas heterogêneos.

As garantias de conscientização propiciam que os componentes individuais, por eles mesmos, reconheçam novas condições ou falhas e intervenham sem a necessidade de interferência humana. O reconhecimento ocorre através de sensores que desencadeiam reações/aprendizados por parte destes sistemas.

As garantias que correspondem à orientação e a limitação comportamental ditam sobre as permissões e restrições que os integrantes de sistemas auto-organizáveis e auto-adaptáveis podem criar a fim de direcionar o seu comportamento para atingir seus objetivos.

E por fim, as garantias do processo de desenvolvimento são definições que examinam diferentes visões dos componentes incluindo desde descrições abstratas ao código do projeto.

O modelo proposto neste trabalho observou as garantidas descritas por Serugendo et al. [67] desde a fase de projeto até o desenvolvimento e validação do modelo auto-organizável para comboios dinâmicos. Justifica-se o cumprimento das garantias na tabela 4.3 e logo o modelo proposto é classificado como auto-organizável e auto-adaptável.

Tabela 4.3: Verificação do modelo proposto com garantias de auto-adaptação e auto-organização

#	Verificação com o modelo proposto
R1	O modelo proposto será individualmente acoplado a cada veículo. Subcomponentes em cada veículos também serão modularmente desacoplados.
R2	O modelo desacopla as descrições das suas capacidades, permitindo a heterogeneidade do sistema. O modelo também permite a interação dos componentes ocorrendo sob um protocolo de comunicação inter-veicular.
R3	O modelo proposto incorpora a interação inter-veicular por meio de rádios de comunicação. Não há estrutura compartilhada para a interação em que o modelo está sobreposto.
R4	O modelo proposto incorpora o uso de sensores acoplados aos veículos para coletar informações do contexto, rádio comunicador para interagir com veículos vizinhos, além de um módulo para detectar a presença de leis que atuam sobre o ambiente.
R5	O modelo proposto incorpora módulo que permite reagir às mudanças percebidas no ambiente, acionando atuadores de direção, aceleração e frenagem do veículo.
R6	O modelo proposto incorpora um sistema de sensoriamento com dados e os estados das variáveis e um sistema de atuação, em que os veículos são capazes de controlar a direção, aceleração e frenagem.
R7	O modelo proposto incorpora “políticas” na forma de manobras, isto é, a partir da posição dos veículos no ambiente rodoviário são sugeridas movimentações a serem realizadas para garantir a segurança e o fluxo do comboio.
R8	O modelo proposto incorpora um módulo de detecção de placas de sinalização, que permite perceber mudanças no ambiente a priori, deslocando-se de faixas não próprias para percurso.
R9	Descrevemos nas seções anteriores quais os requisitos e protocolos para manobras de entrada que o modelo deve conter.
R10	Descrevemos as decisões autônomas realizadas pelos veículos parte envolvidos na formação de comboios neste capítulo e no capítulo subsequente.
R11	Descrevemos os sensores e atuadores utilizados pelo modelo, que serão principalmente um sistema para detecção de objetos no ambiente rodoviário e um controlador de cruzamento CACC.
R12	Descrevemos o protocolo para gerenciamento da formação de comboio como uma política a ser aplicada no modelo auto-organizável proposto.

## 5 Implementação do modelo

Neste trabalho, aproveita-se de um conjunto de modelos realísticos implementados em *frameworks* de simulação para validação do modelo de gerenciamento de comboios proposto. Estes modelos são amplamente utilizados pela comunidade acadêmica para simulação de protocolos de interação inter-veicular [68].

Há que se mencionar que, conforme defendido por Sommer & Dressler [69], os modelos de mobilidade e comunicação devem estar bidirecionalmente acoplados para se garantir precisão ao avaliar protocolos de interação inter-veicular.

Os modelos utilizados para validar a simulação de comboios veiculares são: (1) Modelos de tráfego rodoviário e (2) Modelos de comunicação.

Introduzimos uma breve explicação sobre os modelos de simulação a serem utilizados na validação do protocolo proposto.

### 5.1 Simulação de Tráfego Rodoviário

A simulação de tráfego rodoviário permite observar fluxos rodoviários em ambiente virtual com o objetivo de prever os possíveis impactos dos padrões do tráfego no ambiente físico. Em outras palavras, a simulação proporciona avaliar os efeitos de mudanças no mundo físico muito antes destas serem implementadas no mundo real. Como um exemplo direto, a simulação pode medir os impactos do acréscimo de uma faixa no fluxo de veículos em uma rodovia, e assim ajudar a decidir se um possível investimento na ampliação da infraestrutura viária é válido.

#### 5.1.1 Modelos de Mobilidade

Os modelos de mobilidade rodoviária possuem diferentes níveis de granularidade, conforme detalhado por Krauss [70]. Os modelos de simulação de tráfego rodoviário são classificados tipicamente em:

- Macroscópico, em que o tráfego é modelado em larga escala, e o comportamento veicular é observado como um fluxo;

- Mesoscópico, em que o tráfego é modelado em grupos de veículos;
- Microscópico, em que os modelos descrevem a dinâmica veicular de forma individual;

As simulações microscópicas de tráfego são destinadas à avaliações em que a interação entre os veículos, seja por percepção ou comunicação, é tratada de forma individual. E tal simulação se faz necessária no caso dos veículos autônomos conectados, em que há a preocupação de que os modelos de mobilidade tenham exatidão em relação à velocidade e posição dos nós simulados. E conforme discutido por Sommer & Dressler [69], os níveis macroscópicos e mesoscópicos não podem oferecer o nível de detalhamento exigido para a simulação de veículos conectados. Estes mesmos autores também discutiram, sob aspecto histórico, a evolução das estratégias e técnicas de modelagem microscópica de simulação para a pesquisa de redes veiculares [71]. Estes defendem que se utilizem modelos realísticos de simulação ao avaliar os protocolos para redes ad hoc veiculares, para que estes protocolos possam apresentar maior grau de confiança.

Os principais modelos microscópicos de tráfego incluem o autômato celular [72] [73], o modelo *car-following* proposto por Stefan Krauß [70] e os modelos IBM/MOBIL [74]. Modelos mais recentes que incluem controladores de cruzamento, tecnologia utilizada para ajustar veículos à dinâmica da formação de comboios, foram propostos por Milanés & Shladover [75] e Xiao et al. [76] [77].

O trabalho de Harri et al. [68] revisa e discute diversos aspectos relacionados ao uso de modelos de mobilidade nas simulações de VANETs. A partir do contexto em que os veículos se encontram, diferentes modelos devem ser aplicados para garantir uma simulação realística, trazendo confiabilidade às avaliações. A tabela 5.1 descreve os requisitos mínimos para simulação de veículos autônomos conectados no contexto urbano e rodoviário.

Tabela 5.1: Requisitos Mínimos para simulação de CAVs

Ambiente	Requisitos Mínimos			Requisitos Opcionais	
	Car-following	Interseção	Mudança de Faixa	Obstáculos	Validação
Rodoviário	x		x		x
Urbano	x	x		x	x

Para realizar a simulação realística de tráfego, além de modelos de movimentação longitudinal, pode-se incluir modelos que levem em consideração a movimentação lateral, o que possibilita, por exemplo, realizar uma mudança de faixa realística para veículos em uma rodovia.

### 5.1.2

#### Simulator of Urban Mobility

O simulador SUMO (do inglês *Simulator of Urban MObility*), representado na Figura 5.1, será a ferramenta de simulação utilizada neste trabalho para reproduzir o ambiente rodoviário e simular a dinamicidade dos veículos.

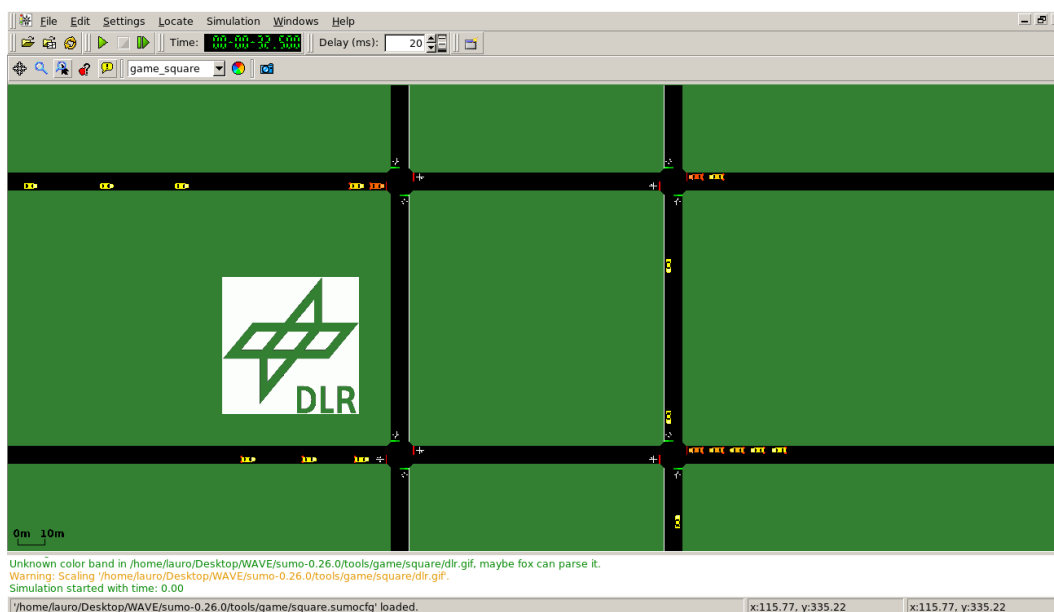


Figura 5.1: Interface do SUMO

O SUMO é um simulador de mobilidade desenvolvido pelo Centro Aeroespacial Alemão [78] e utilizado em grande parte para simulação de tráfego rodoviário de espaço contínuo. O SUMO contém modelos mesoscópicos e microscópico de mobilidade e é um sistema de código aberto, portátil e foi projetado para lidar com grandes redes rodoviárias.

As bibliotecas do SUMO foram desenvolvidas majoritariamente utilizando a linguagem C++. Algumas ferramentas de apoio, que ajudam na criação da topologia da rede e na distribuição dos nós, foram codificadas utilizando outras linguagens como Python. Além disso, o simulador SUMO possui uma interface para controle de tráfego chamada TraCI (Traffic Control Interface) [79], que permite obter valores de objetos simulados e manipular o seu comportamento em tempo de execução.

## 5.2

### Simulação de Redes

As simulações de redes são utilizadas pela academia e indústria para modelar as configurações de redes de computadores antes de sua implantação no mundo real. A avaliação por simulação permite medir estatísticas e comparar

aspectos como taxa de erros, carga e disponibilidade de uma rede. Além disso, a simulação permite descobrir e tratar os problemas de desempenho da rede sem a necessidade de realizar onerosos testes de campo.

Geralmente, os protocolos de rede são analisados sob a ótica da simulação de eventos discretos, em que um evento marca uma mudança de estado do sistema e ocorre em um instante de tempo estabelecido. Há um número extenso de ferramentas de simulação de rede baseada na simulação de eventos discretos, como as ferramentas de código aberto ns-2, OMNET++ e JiST/SWANS e de licença comercial como o OPNET. A mecânica de funcionamento deste simuladores é muito similar no que diz respeito à escalabilidade do número de nós e o suporte da comunidade. A principal característica que os diferencia é o número de modelos realísticos disponíveis.

O OMNET++ dispõe de um extenso conjunto de modelos e protocolos de simulação de redes, sendo o *framework* INET a principal biblioteca. Exemplos de *frameworks* para o OMNET++ permitem a simulação de redes cabeadas, redes sem-fio, MANETs, VANETs, redes bluetooth, entre outras. Os modelos do OMNET++ são desenvolvidos e amplamente utilizados pela comunidade científica para avaliação de modelos e protocolos de comunicação. Suas bibliotecas e módulos foram desenvolvidos na linguagem C++. Os componentes do OMNET++ são organizados em módulos, sendo integrados por meio de em uma linguagem de alto nível chamada NED (Network Description).

### 5.2.1

#### Simulação de Redes Veiculares

O *framework* que contém os módulos de comunicação inter-veicular utilizados como base pelo protocolo de gerenciamento de comboios auto-organizáveis proposto neste trabalho é o VEINS (Vehicles in Network Simulation). O Veins [71] é um *framework* de código aberto para simulação de veículos conectados construído sobre a infraestrutura do OMNET++. Este *framework* utiliza uma estrutura de eventos e de rede provida pelo OMNET++ juntamente com a estrutura de mobilidade fornecida pelo SUMO para realizar simulações. Como pode ser visto na Figura 5.2, um módulo de mobilidade no Veins obtém informações dos nós móveis por meio da interface de controle de tráfego do SUMO (TraCI). Conforme demonstrado em [69], os modelos do Veins e do SUMO estão bidirecionalmente acoplados, trazendo maior confiabilidade às simulações de eventos.

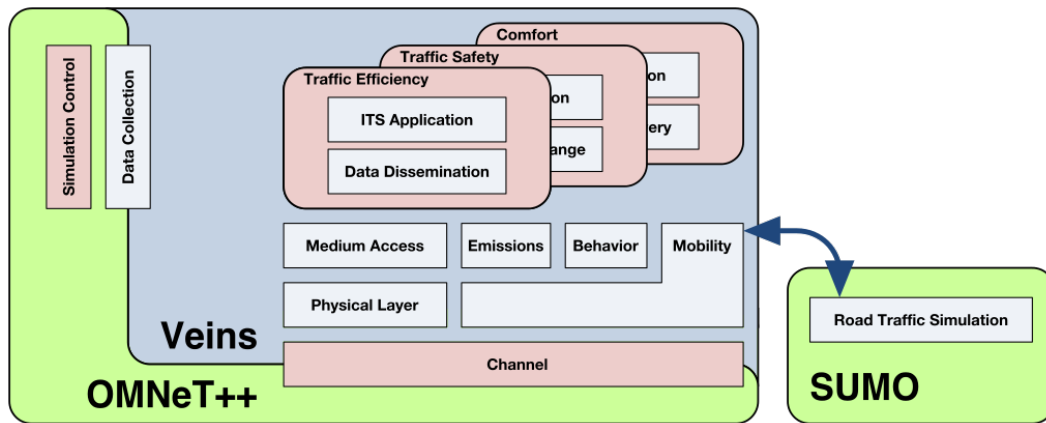


Figura 5.2: Comunicação bidirecional entre os *frameworks* Veins e SUMO

### 5.2.2

#### Simulação de Comboios

O *framework* Plexe [80] foi a plataforma escolhida para a simulação de comboios (Figura 5.3), pois apresenta uma dinâmica veicular realista e vários modelos de controladores de cruzeiro. O Plexe também permite a análise de sistemas de controle, a simulação de cenários de grande escala e de tráfego heterogêneo, bem como os protocolos de rede e de manobras cooperativas. Os módulos do Plexe foram construídos sobre a infraestrutura do Veins e modificaram em grande parte o código do SUMO para suportar a formação de comboios.

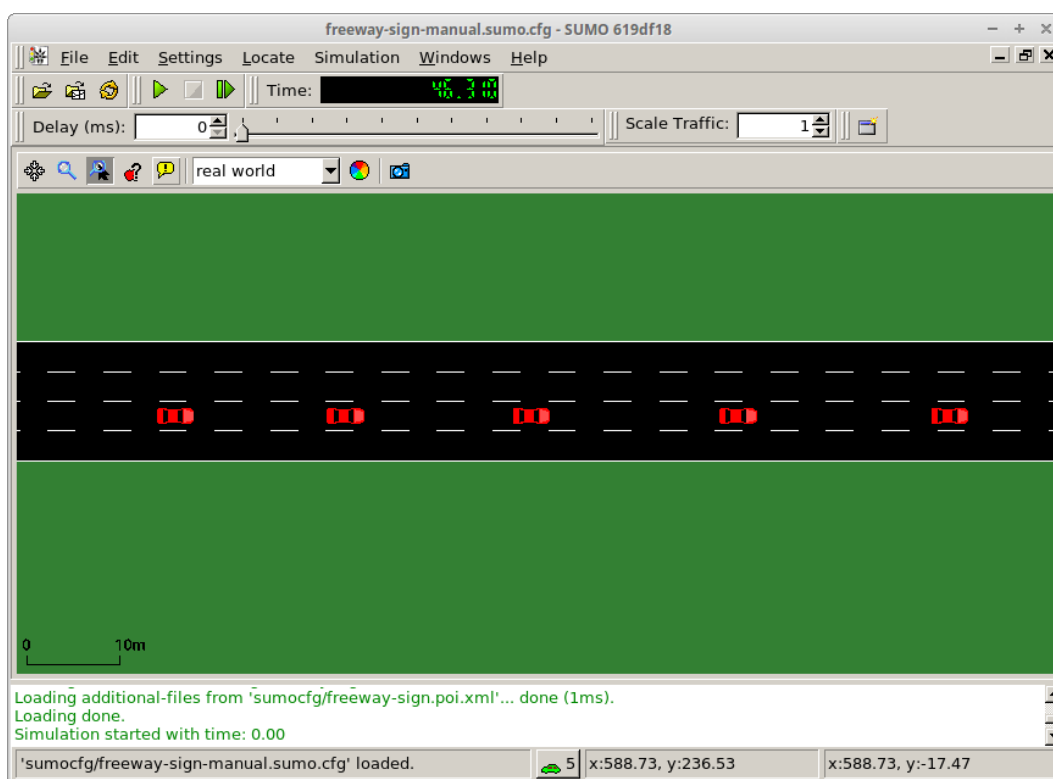


Figura 5.3: Simulação de comboios no *framework* Plexe

## 5.3

### Implementação do modelo

São realizadas amplas modificações e extensões ao código fonte do conjunto de simuladores SUMO, VEINS e Plexe para desenvolver o modelo proposto neste trabalho. Nas seções a seguir, são detalhadas as funcionalidades do modelo que cumprem as garantias de auto-organização e auto-adaptação descritas na Seção 4.3.

#### 5.3.1

#### Detector TSR para o SUMO

As tecnologias de Traffic-Sign Recognition (TSR), ou reconhecimento de placas de trânsito, são uma das principais funcionalidades demandadas pelos ADAS, ou Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor. Sistemas TSR utilizam algoritmos de reconhecimento de imagem e redes neurais treinadas em conjuntos de dados para detectar placas de sinalização, mesmo sob longas distâncias e com ruídos impactando a qualidade da imagem. Os conjuntos de dados são treinados para identificar as sinalizações definidas pela Convenção de Viena.

Para desenvolver um modelo TSR para simulação, o código fonte do SUMO foi analisado e foi identificado que este simulador permite o desenvolvi-



mento de novos dispositivos<sup>1</sup> a serem embarcados em veículos simulados. Estes dispositivos podem acessar todos os movimentos dos carros e interagir com outros objetos/dispositivos no cenário de simulação. Outro aspecto interessante dos dispositivos do SUMO é a possibilidade de embarcar apenas uma fração dos veículos simulados com tal equipamento.

O SUMO também permite a inserção de figuras<sup>2</sup> no cenário de experimento como arquivo adicional com o objetivo de melhorar a aparência da simulação e facilitar a depuração do código. Estas figuras podem ser adicionadas ao plano do cenário para sinalizar formas geométricas, como árvores e rios, ou pontos de interesse (POI, do inglês *Points of Interest*), como laços de indução para o tráfego [81]. No caso dos POIs, é possível vinculá-los tanto a faixas de rodovias como a qualquer ponto do cenário de experimento.

A partir destas características, um detector de Pontos de Interesse para o SUMO foi proposto com o objetivo de servir como um dispositivo TSR a ser embarcado em cada veículo. Os pontos de interesse a serem adicionados à grade de simulação serão placas de sinalização rodoviária, que podem indicar o prenúncio de uma mudança de contexto no ambiente rodoviário. É importante mencionar que o desenvolvimento deste dispositivo serve como uma contribuição<sup>3</sup> ao código fonte do SUMO e pode ser utilizado por outros usuários da comunidade.

O detector TSR para o SUMO funciona da seguinte maneira: o veículo equipado vasculha a redondeza (de forma similar às câmeras utilizadas em tecnologias TSR) e identifica os POIs que estejam dentro da distância euclidiana de detecção. Os POIs detectados são armazenados em um container em que o acesso é disponibilizado pela API TraCI. Além disso, outras informações como a faixa e o tipo de POI podem ser recuperadas via TraCI.

Os principais parâmetros estabelecidos no detector TSR para o SUMO estão descritos na tabela 5.2.

<sup>1</sup>[https://sumo.dlr.de/wiki/Developer/How\\_To/Device](https://sumo.dlr.de/wiki/Developer/How_To/Device)

<sup>2</sup><https://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Shapes>

<sup>3</sup><https://github.com/laurodelacerda/plex-selforganization>

Tabela 5.2: Parâmetros a serem definidos para simulação de dispositivo TSR no SUMO

Parâmetro	Descrição
range	A abrangência mínima de detecção do dispositivo TSR, que é calculada pela distância euclidiana do veículo ao ponto de interesse.
onlyPOIOutside	A detecção identifica apenas os pontos de interesse fora de vias públicas.
onlyPOILane	O dispositivo observa apenas pontos de interesse vinculados à faixas de vias públicas.
onlyCurrentLane	O dispositivo observa apenas pontos de interesse vinculados à faixa em que o veículo está trafegando.

### 5.3.2

#### Aplicação para Gerenciamento de Comboios

Além do detector TSR, outro fragmento fundamental para o modelo proposto neste trabalho é uma extensão ao conjunto de *frameworks* Plexe, Veins e OMNET++, que concentra a parte da interação entre os veículos-parceiros de um comboio.

Foi criado um grupo de mensagens, que sua representação indica o início de movimentos e alteração de estados. Estas mensagens foram descritas em detalhes no apêndice A.

Esta extensão concentra justamente o mapeamento contínuo de posições e estados dos veículos na vizinhança e os protocolos *Join at Front* e *Join at back* descritos na Seção 4.2.4.2.

Um diagrama de classes representando em alto nível a estrutura do sistema proposto é ilustrado pela figura 5.4. O código-fonte do modelo está disponível em <https://github.com/laurodelacerda/plexe-selforganization>.

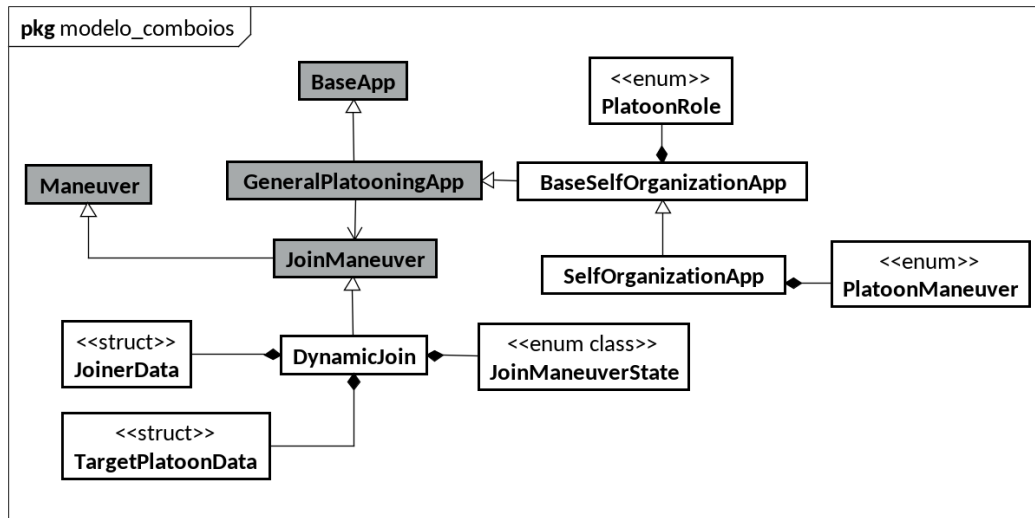


Figura 5.4: Diagrama de classes do modelo proposto

As classes do modelo estão representadas pelas caixas. As caixas em fundo cinza simbolizam as classes originais do *framework* Plexe que tiveram que passar por alguma modificação para ajustarem-se ao modelo proposto. As caixas em fundo branco são uma representação estática das classes originalmente criadas para este modelo.

A seguir, são descritos os principais procedimentos e as relações de três classes fundamentais para o modelo: BaseSelfOrganizationApp, SelfOrganizationApp, e DynamicJoin.

### BaseSelfOrganizationApp

A classe BaseSelfOrganizationApp representa a base para a auto-organização do modelo de gerenciamento de comboios proposto. Esta classe é responsável por armazenar informações sobre o geoposicionamento e outras variáveis de estados do próprio veículo e dos veículos na vizinhança. Conforme apontado por Dressler [23], para se agregar auto-organização a um sistema de interação próxima e espontânea (ex.: redes ad-hoc) com alta dinamicidade deve-se garantir mecanismos de gerenciamento da mobilidade que devem compreender o mapeamento da posição geográfica e dos estados dos nós participantes.

Por isso, armazena-se a última posição conhecida e estado dos nós vizinhos e do veículo atual para ser possível retornar informações como:

- a orientação geográfica global de uma frota de veículos;
- o espaçamento entre dois veículos;
- a lacuna média entre os membros de uma formação de comboio;
- a distância euclidiana de um veículo para outro;

- o tamanho total de uma formação de comboio adjacente;

Além do mapeamento em relação aos vizinhos, a classe `BaseSelfOrganizationApp` recebe informações sinalizadas pelo dispositivo detector TSR sobre objetos no contexto rodoviário. No caso de um veículo detectar objetos que indiquem a modificação das condições ambientais (ex.: surgimento de uma placa indicando a redução do número de faixas), a classe armazena tal informação, notifica outros veículos (aumentando a conscientização do evento) e verifica se há a necessidade de formação de um comboio seguro, dadas as condições viárias.

Esta classe, por conter uma estrutura de dados que armazena as posições dos nós, também se responsabiliza por atribuir papéis a cada um dos nós interessados em formar comboios. Os papéis podem ser de líderes e seguidores, sendo discriminados quanto à ocupação de uma faixa livre ou bloqueada, conforme já discutido na Seção 4.2.3. Enumera-se quatro possíveis estados para o papel de um veículo em uma formação de comboio:

- líder em faixa livre;
- líder em faixa bloqueada;
- seguidor em faixa livre;
- seguidor em faixa bloqueada.

A classe base para a interação entre os veículos-parte de uma possível formação de comboio auto-organizável foi inspirada em modelos de redes de sensores sem-fio bioinspiradas [82], que mantêm um conhecimento sobre a topologia para atribuir papéis e orientar as decisões sobre a transmissão de eventos. Conforme mencionado, na classe `BaseSelfOrganizationApp` utiliza-se a informação sobre o posicionamento e os estados dos nós para atribuir os papéis na formação de comboios seguros.

### **SelfOrganizationApp**

A classe contempla os mecanismos de negociação e atuação para a formação de comboios auto-organizáveis. Esta classe tem responsabilidade de, a depender do contexto e papel de cada veículo-parte, iniciar a formação de um comboio ou solicitar a entrada em um comboio seguro.

No contexto do modelo proposto, a classe `SelfOrganizationApp` se baseia na relação hierárquica que tem com a classe `BaseSelfOrganizationApp` para observar o mapa geográfico dos nós vizinhos, detectar uma posição de entrada (início ou fim de um comboio), e iniciar a negociação e os ajustes quanto à cinética veicular (movimentação longitudinal e lateral), isto é, as manobras a serem desempenhadas por veículos-parte de um comboio seguro.

Os principais procedimentos contidos nesta classe do modelo contém:

- verificação de melhor posição para entrada (se for líder em faixa segura);
- início da negociação entre os veículos-parte (protocolos de manobras de entrada);
- configuração de diversas manobras enumeradas (ex.: *Join at Back*, *Join at Front*, *Split*, etc.);
- verificação da segurança para se mudar de faixa para uma lacuna desejada;
- realização de ajustes longitudinais necessários para entrada em posição do comboio;

Resumimos que a classe *SelfOrganizationApp* tem por objetivo permitir o início da coordenação entre os veículos-parte em uma formação de comboios. Esta classe pode ser facilmente estendida por desenvolvedores para suportar, por exemplo, diferentes algoritmos de decisão para indicar a posição de entrada de veículos-parte em uma formação de comboio segura.

### DynamicJoin

A classe *DynamicJoin* é responsável pela negociação entre os veículos-parte envolvidos em uma formação de comboio. Nela se concentram os protocolos de coordenação *Join at Front* e *Join at Back* discutidos na Seção 4.2.4.2.

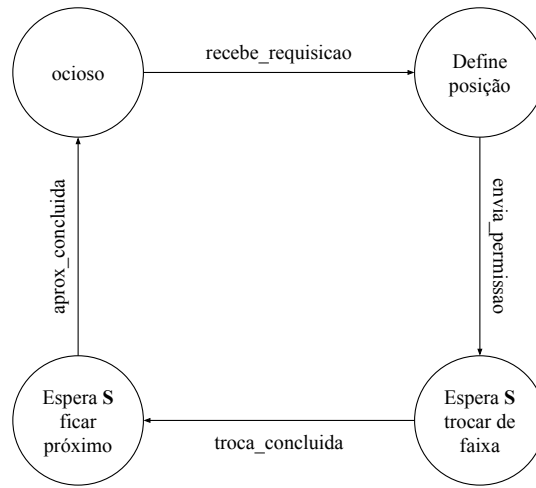
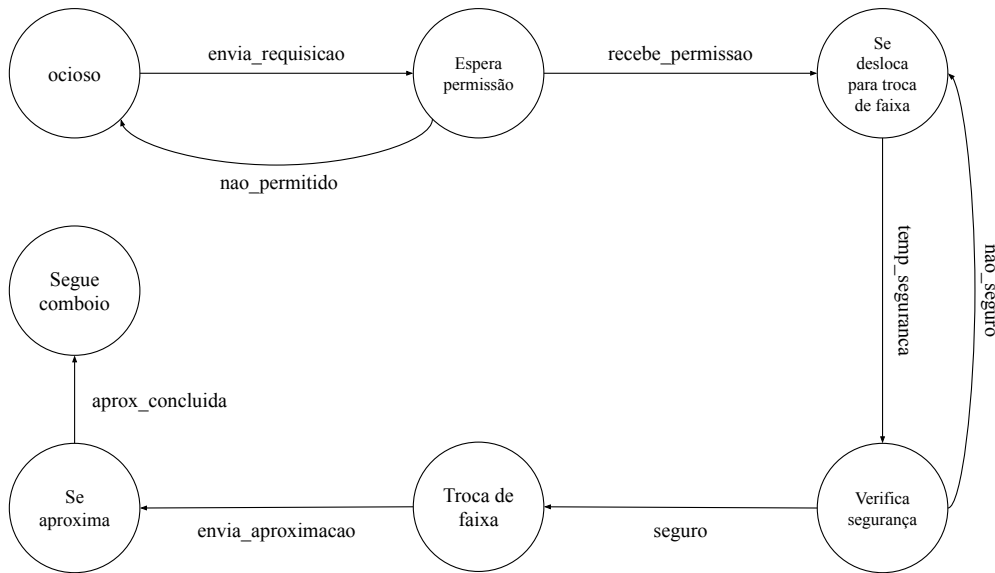
Esta classe contém uma estrutura orientada à eventos que dispara ações que os veículos-parte envolvidos em manobras devem realizar a partir do recebimento de mensagens de rede.

A classe também possui um tipo enumerável para indicar a mudança de estados de um veículo em uma manobra de entrada, além de informações armazenadas sobre um veículo solicitante (gravada pelo líder do comboio) e o comboio de entrada (gravada pelo veículo em manobra).

Os diagramas a seguir descrevem a troca de estados acionada pelos protocolos *Join at Back* e *Join at Front*, que é responsabilidade da classe *DynamicJoin*. Esta troca de estados é a materialização direta e em alto nível destes protocolos descritos na Seção 4.2.4.2 para ações dos veículos líder e o solicitante, que estão envolvidos nestas respectivas manobras.

As sequências de ações de manobra serão representadas para efeito de clareza, sem incluir procedimentos para detecção ou reação à falhas ou deficiências na comunicação.

A manobra *Join at Back* é descrita na visão dos veículos líder e solicitante nos diagramas da figura 5.5.

(a) Líder  $L$ (b) Solicitante  $S$ Figura 5.5: Trocas de estados dos veículos envolvidos na manobra *Join at Back*

Na perspectiva do líder  $L$ , a partir da chegada de uma solicitação de entrada **JoinPlatoonRequest** em uma formação de comboio, este define a posição e envia a autorização de entrada (mensagem **JoinPlatoonResponse**) ao solicitante  $S$  com o índice correspondente à cauda do comboio (mensagem **MoveToPosition**). O líder  $L$  então espera o ajuste longitudinal do solicitante  $S$  e o envio da mensagem que sinaliza a mudança de faixa. Após receber a mensagem **MoveToPositionAck**, o líder  $L$  envia uma mensagem **JoinFormation** autorizando a aproximação do solicitante ao comboio (com os parâmetros de velocidade e aceleração)  $S$  e aguarda pela resposta. Finalmente, o líder receberá uma mensagem **JoinFormationAck** que indica a conclusão da

aproximação e por consequência, a finalização da manobra.

Na perspectiva do solicitante  $S$ , o mesmo envia uma requisição de entrada **JoinPlatoonRequest** e aguarda pela autorização do líder  $L$ . O líder responde positivamente, o que faz o solicitante deslocar-se para a posição de entrada, verificando a segurança lateral a cada passo de tempo definido como *temp\_seguranca*. Quando for suficientemente seguro mudar de faixa, o solicitante  $S$  realiza a movimentação lateral e envia uma mensagem **MoveTo-PositionAck** indicando a troca e iniciando a aproximação para ativação do controlador de cruzeiro. Ao receber a mensagem **JoinFormation** do líder contendo a autorização para aproximação e os parâmetros da cinética do comboio, o solicitante  $S$  finalmente ativa o controlador CACC, envia a mensagem de confirmação **JoinFormationAck** e passa a repetir os movimentos da frota.

A manobra *Join at Front* é descrita na visão do líder e do solicitante nos diagramas da figura 5.5.

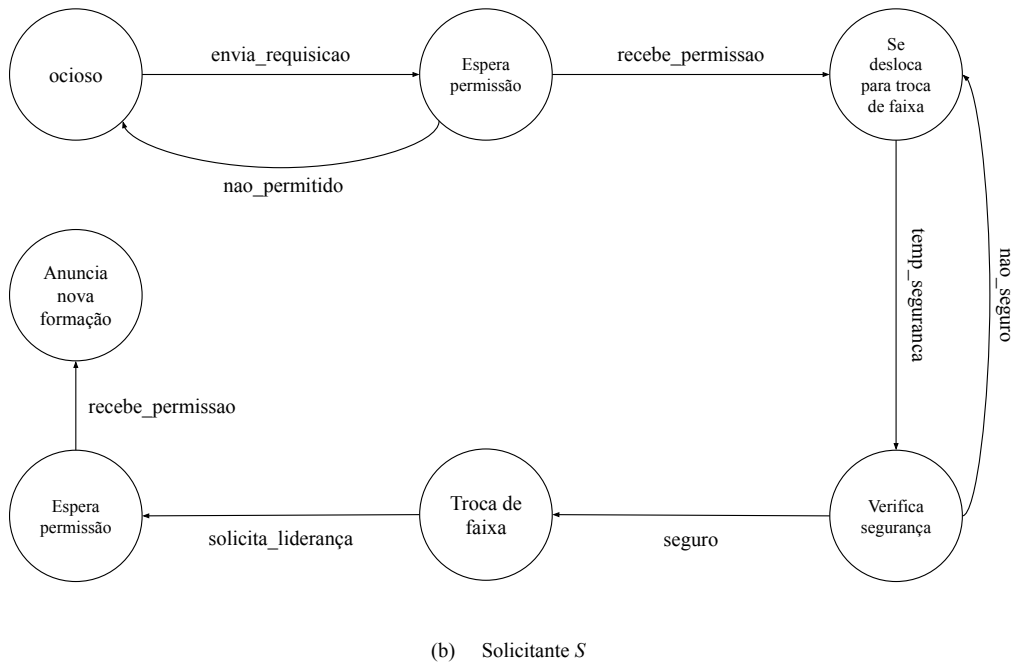
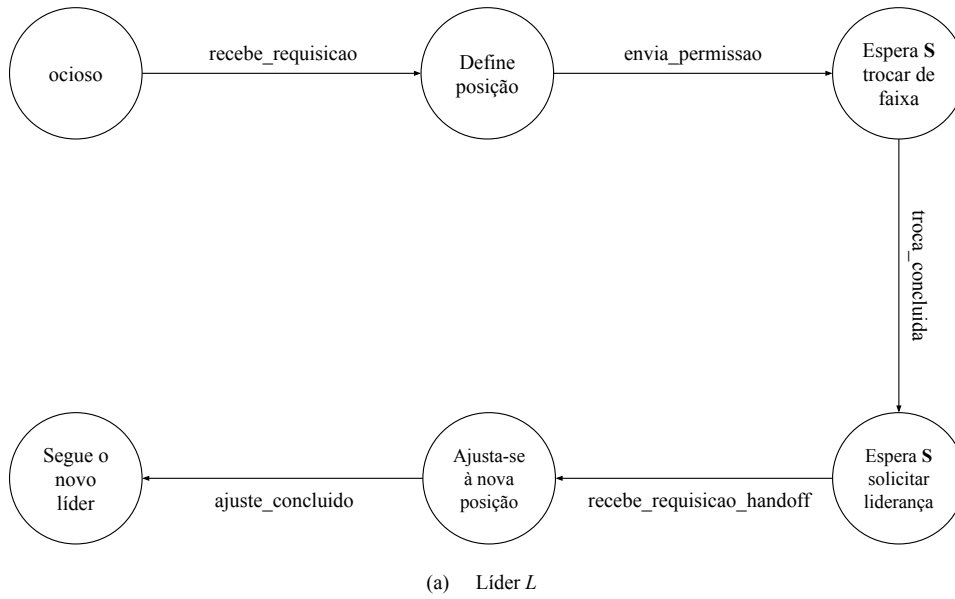


Figura 5.6: Trocas de estados dos veículos envolvidos na manobra *Join at Front*

Na perspectiva do líder  $L$ , ao receber a requisição **JoinPlatoonRequest** do solicitante  $S$ , o mesmo define uma posição de entrada conforme mencionado na Seção 4.2.4.1. Ao enviar as mensagens de permissão de entrada *JoinPlatoonResponse* e a posição à frente do comboio (**MoveToPosition**), o então líder  $L$  aguarda pela finalização do movimento lateral do solicitante  $S$ . Ao receber a mensagem **MoveToPositionAck** indicando a troca de faixa concluída, o líder  $L$  aguarda pela passagem de bastão na liderança. Quando a mensagem **HandoffLeadershipRequest** é recebida pelo então líder  $L$ , este envia uma



resposta positiva **HandoffLeadershipResponse** e já ajusta os parâmetros de controle para um referencial à frente, ativando o controlador CACC. Ao finalizar os ajustes longitudinais, o agora ex-líder passa a atuar como seguidor do novo líder do comboio.

Na perspectiva do solicitante  $S$ , este envia a solicitação **JoinPlatoonRequest** e aguarda a permissão para entrada no comboio. Ao receber do líder  $L$  a permissão (**JoinPlatoonResponse**) e a posição de entrada (**MoveToPosition**) à frente no comboio, o solicitante ajusta a posição longitudinal verificando a segurança lateral a cada passo de tempo definido como *temp\_seguranca*. Ao perceber que há segurança, o veículo movimenta-se lateralmente e dispara uma mensagem (**MoveToPositionAck**) indicando a mudança de faixa. Além disso, o solicitante envia uma requisição (**HandoffLeadershipRequest**) de passagem de bastão da liderança do comboio. Ao receber a permissão (**HandoffLeadershipResponse**) e os parâmetros de controle e formação do comboio por meio de mensagem, o novo líder passa a ajustar sua velocidade em conformidade com o padrão do comboio e por fim anuncia a nova formação enviando a mensagem **LeadershipUpdate** aos integrantes do comboio.

## 6

### Estudo de Caso

Este capítulo descreve o cenário base para um estudo de caso, a realização e avaliação de um experimento para a validação do protocolo de gerenciamento proposto neste trabalho, e finaliza destacando as lições aprendidas.

#### 6.1

##### Cenário

A seguir, o modelo proposto será avaliado em estudo de caso em cenário rodoviário. O trecho da rodovia é composto inicialmente por 4 faixas e, em seguida, a capacidade é diminuída para 2 faixas. Em determinado ponto da rodovia foram colocadas placas de sinalização anunciando o estreitamento da pista. A figura 6.1 apresenta o cenário projetado no simulador SUMO, com a visão aérea e a visão detalhada do trecho da rodovia.

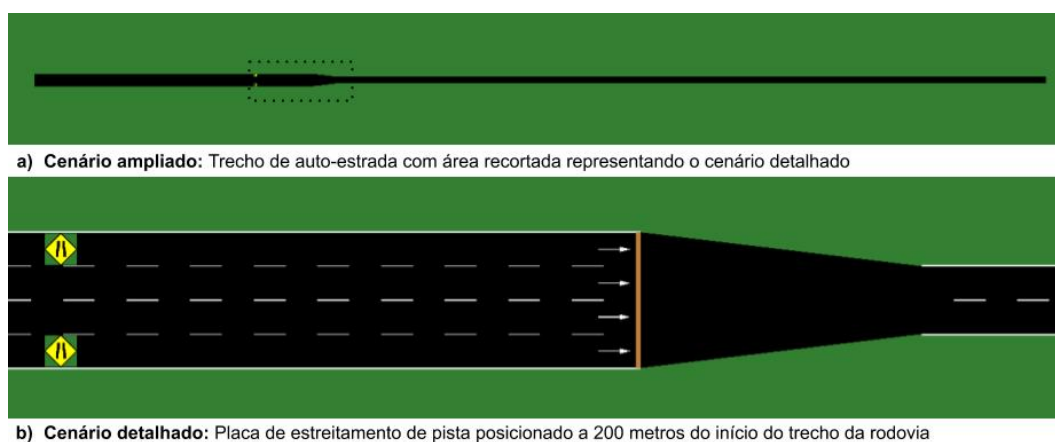


Figura 6.1: Cenário rodoviário para estudo de caso do modelo proposto

A tabela 6.1 dispõe das informações sobre os simuladores e suas versões utilizadas na execução dos experimentos.

Tabela 6.1: Versões dos simuladores utilizados no experimento

Simulador	Versão
SUMO	0.32.0
OMNET++	5.1.1
Veins	4.7
Plexe	2.1

A tabela 6.2 contém as informações sobre os parâmetros de simulação do tráfego do cenário. As configurações foram realizadas no arquivos de rede viária (\*.net.xml), de rotas (\*.rou.xml), e de pontos de interesse (\*.poi.xml) do SUMO para ter ao mesmo tempo efeito no cenário projetado e impacto na simulação dos eventos.

Tabela 6.2: Parâmetros de Simulação de Tráfego

Parâmetro	Valor
Comprimento da auto-estrada	1 km
Número inicial de faixas	4
Número final de faixas	2
Velocidade permitida da rodovia	120 km/h
Número de veículos	3
Comprimento dos veículos	4 m
Fator de velocidade dos veículos	1
Desvio Padrão da Velocidade	0.2
Posição das placas (eixo x)	200m
Início do estreitamento (eixo x)	250m
Fim do estreitamento (eixo x)	300m
Alcance do detector TSR	120m
Duração máxima da mudança de faixa	4.6s
Modelo Car-Following	CC

Definimos a duração máxima das mudanças de faixa para 4.6s com base no estudo empírico de Toledo e Zohar [83]. Segundo o estudo, o tempo para mudança de faixa de um veículo apresenta alta variabilidade e é impactado por aspectos como o tipo de veículo (passeio, caminhão, ônibus, etc), direção da mudança (esquerda, direita), densidade do tráfego, presença de rampas, idade e experiência do motorista, entre outros parâmetros. O tempo definido foi baseado na média de tempo mudança de faixa de um veículo de passeio movimentando-se para a esquerda em velocidade de 16,7 m/s.

É importante ressaltar que o modelo proposto conferiu um novo significado aos pontos de interesse<sup>1</sup> para o SUMO, tornando possível a interpretação de placas de sinalização. Além disso, foi desenvolvido e disponibilizado um detector para este pontos de interesse, o que permite, após a percepção da placa de sinalização, ajustar o comportamento de veículos em tempo de execução.

Além disso, cabe mencionar que não há quaisquer normas ou convenções de tráfego a serem observadas pelos veículos a partir do trecho estreitado. Até poderia ser adotado o conhecido método “zipper” [84], que é uma convenção comumente aplicada na engenharia de tráfego com o objetivo de aumentar a vazão do fluxo. Contudo, foi optado por conferir ao modelo proposto a responsabilidade de definir a prioridade de mudança de faixa e posicionamento dos veículos de acordo com seus critérios.

A tabela 6.3 contém os valores atribuídos aos parâmetros de configuração da rede veicular. Um arquivo de configuração foi definido para o cenário em experimento no simulador OMNET++.

Tabela 6.3: Parâmetros de simulação da rede

Parâmetro	Valor
Modelo de Atenuação	Espaço Livre
Modelo Camada Física	IEEE 802.11p
Modelo Camada Enlace	IEEE 1609.4
Frequência	5.89 GHz
Bitrate	6 Mbit/s
Potência de Transmissão	100 mW
Periodicidade de <i>beacons</i>	0.1 s
Aplicação	SelfOrganizationApp
Espaçamento Seguro	5m

Cabe ressaltar que não o impacto dos atrasos de comunicação no envio de dados de controle de cruzeiro [85] não está sendo medido, o que poderia comprometer consideravelmente a estabilidade de corda, afetando o desempenho do comboio.

O parâmetro chamado de “espaçamento seguro” significa a distância de afastamento segura que um veículo deve respeitar ao realizar a mudança de faixa. A variação de tal parâmetro pode ter como consequência direta, por exemplo, a mudança tardia de faixa de um veículo ingressante no comboio ou mesmo causar um engavetamento entre os veículos

<sup>1</sup><https://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Shapes>

## 6.2

### Experimento

No experimento, a capacidade de auto-organização dos veículos será medida a partir do modelo proposto, que contempla o gerenciamento de comboios. Três carros com características homogêneas percorrerão o trecho de rodovia exposto no cenário apresentado na seção anterior, tendo aplicados os parâmetros das tabelas 6.2 e 6.3 para respectivamente o cenário e os rádios embarcados em cada veículo. Todos os veículos partirão em repouso de seus pontos de partida. Dois veículos (com índices 0 e 1), em cores respectivamente azul e vermelha, partem da faixa mais à direita, que detém uma sinalização de estreitamento de pista em um ponto futuro. Um veículo (índice 2) em cor amarela parte da faixa central da pista e será o responsável por orquestrar a entrada dos outros dois veículos solicitantes na formação do comboio. A figura 6.2 ilustra o cenário.

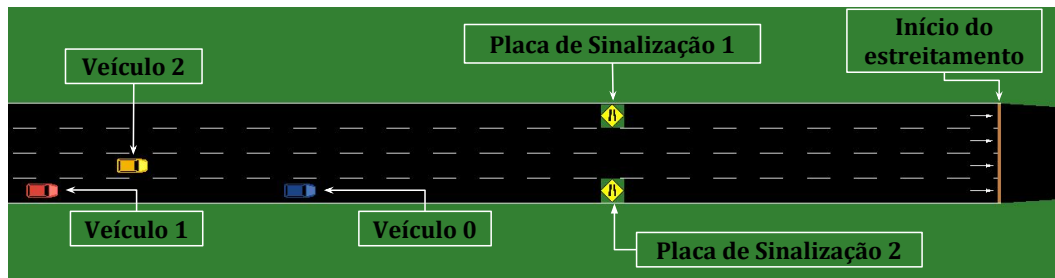


Figura 6.2: Momento da detecção da placa de estreitamento de pista, prenúncio da modificação do ambiente

Foram realizadas simulações no experimento, que consistiu da formação de comboio dos veículos 0, 1 e 2 em virtude do estreitamento de pista. Para termos intervalos de confiança, repetimos os experimentos 30 vezes. Foram coletadas estatísticas da cinética e do tráfego de rede em cada veículo. Os resultados serão discutidos na próxima seção.

### 6.2.1

#### Resultados e Discussões

As figuras 6.3 e 6.4 apresentam respectivamente os gráficos de variação da aceleração e da velocidade dos veículos em função do tempo. Destaca-se no gráfico os símbolos de estrela, círculo e quadrado marcando respectivamente os momentos de detecção da placa, início e final da mudança de faixa.

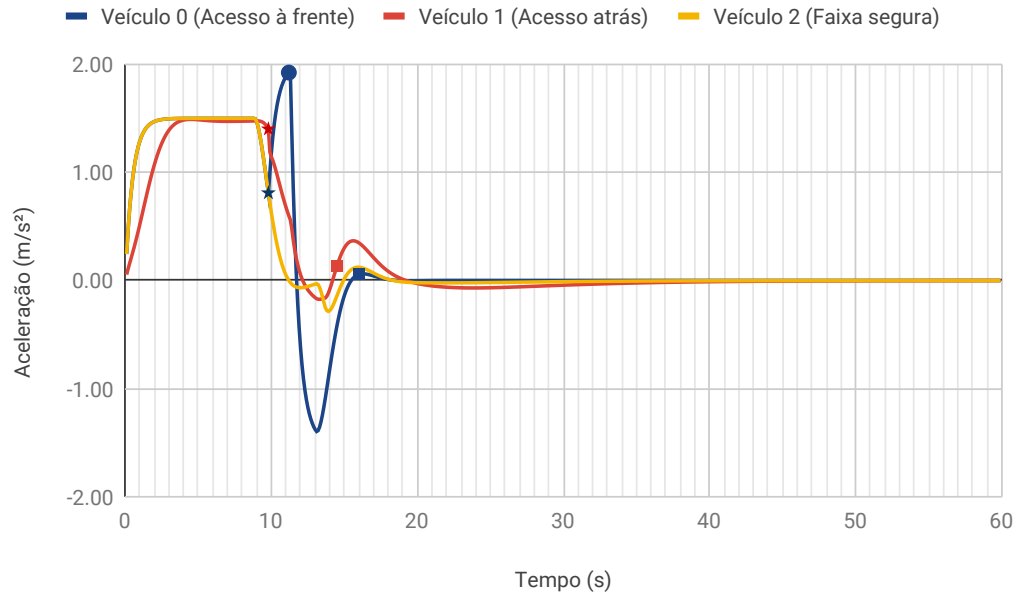


Figura 6.3: Aceleração dos veículos em formação de comboio

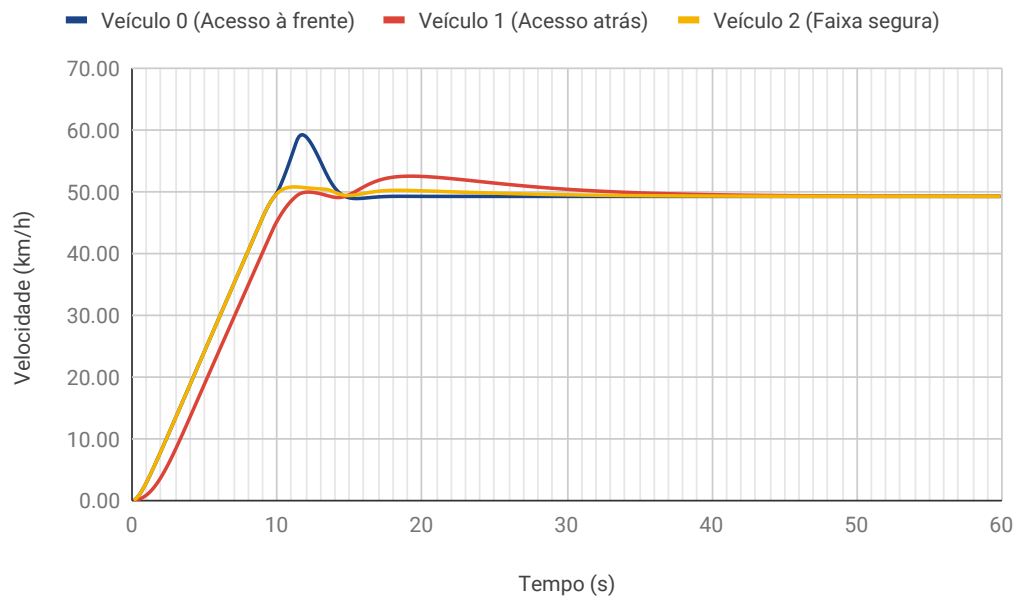


Figura 6.4: Velocidade dos veículos em formação de comboio

A partir da detecção de redução do número de faixas por meio da placa de sinalização, os veículos 0 e 1 (faixa mais à direita) solicitam ao veículo 2 acesso à faixa no tempo aproximado de 9.8s. A diferença de detecção entre os veículos 0 e 1 é de aproximadamente 0.0013s, que evidencia o tempo aproximado de retransmissão da mensagem a partir da detecção de placa partindo do veículo 0 (mais à frente) para o veículo 1 (mais atrás). A mensagem de rede informa

precocemente o bloqueio, o que beneficia o veículo 1 no ganho extra de “espaço” para realizar os ajustes longitudinais e laterais.

Para o veículo 1, que realiza entrada pela retaguarda do comboio, a detecção e início da mudança de faixa são muito próximos devido ao espaçamento seguro existente para acesso ao comboio, logo o símbolo de estrela no gráfico também marca para o veículo 1, além da detecção de mudança no contexto, o início da mudança de faixa. Nota-se que a partir do instante 9,8s o veículo 1 percebe o espaço livre que existe atrás do veículo 2, antecipa a mudança de faixa e finaliza a manobra aproximadamente no instante 14,5s. Reforça-se que o veículo 1, por ter detectado precocemente a mudança de contexto devido ao anúncio feito pelo veículo 0, foi capaz de finalizar mais cedo sua manobra de entrada devido a não ter necessidade de realizar ajustes longitudinais. Percebe-se também que a partir da aproximação do veículo 1 em relação ao veículo da frente (veículo 2), a troca de *beacons* CACC permitiu que o veículo 1 adaptasse seus parâmetros de aceleração para acompanhar o veículo frontal de forma mais próxima. Nota-se que a aceleração do veículo entrante é maior do que a do veículo 2 a partir do instante 13,4s, pois o objetivo do veículo 0 é reduzir a lacuna para o espaçamento padrão do comboio (5 metros).

Para o veículo 0, que realiza entrada à frente do comboio, houve a necessidade de ajuste longitudinal para aproveitamento da posição frontal do comboio. Conforme mencionado no capítulo anterior, a aceleração para ajuste foi mantida de forma fixa e o veículo alcançou aproximadamente no instante 11,2s uma aceleração de  $1,9 \text{ m/s}^2$ , tempo ao qual iniciou a mudança de faixa. A partir do início da mudança de faixa, o veículo 0 iniciou a negociação para ser o líder do comboio. Ao receber a transferência da liderança junto com os parâmetros de velocidade definidos pelo comboio, o veículo 0 (novo líder) iniciou o ajustes em relação à movimentação longitudinal, adaptando sua velocidade para a aproximação dos outros membros do comboio. Até concluir a manobra no instante 16,1s, o veículo 0 acelera gradativamente até a estabilização da velocidade.

Para entender como os protocolos propostos abrangem o aspecto da auto-organização, considera-se a métrica coletada da distância inter-veicular, medida pelo radar dos veículos. Temos que para um número  $n$  de veículos, há notoriamente um número de  $n - 1$  distâncias inter-veiculares.

Convém relembrar que a estabilidade de corda é uma propriedade emergente de um sistema auto-organizável, isto é, é uma característica percebida em um sistema inter-conectável no ajuntamento de suas partes. Bem, como o desvio padrão é uma medida estatística que demonstra o grau de dispersão de um conjunto de dados, entende-se que a partir dos valores das lacunas

inter-veiculares pode-se medir o quão afastados estão os veículos entre si em uma formação de comboio. Logo, conclui-se que é possível observar um tipo de “coeficiente” de estabilidade de corda a partir de um desvio padrão das distâncias inter-veiculares. Se este desvio estiver próximo de zero ao longo do tempo, significa que as distâncias inter-veiculares têm pouca variação entre si e portanto o sistema possui uma estabilidade de corda, o que promove sua auto-organização. Logicamente, conforme mencionado nos capítulos anteriores, para agregar os benefícios da estabilidade de corda à aerodinâmica dos veículos (ex.: economia de combustível, menor emissão de gases) deve-se também manter um curto espaçamento inter-veicular.

Na figura 6.5, foi desenhado o gráfico das distâncias inter-veiculares medidas pelo radar dos veículos 1 e 2 ao longo do tempo. Desconsidera-se o veículo 0 nesta medição por conta deste não possuir veículo à frente.

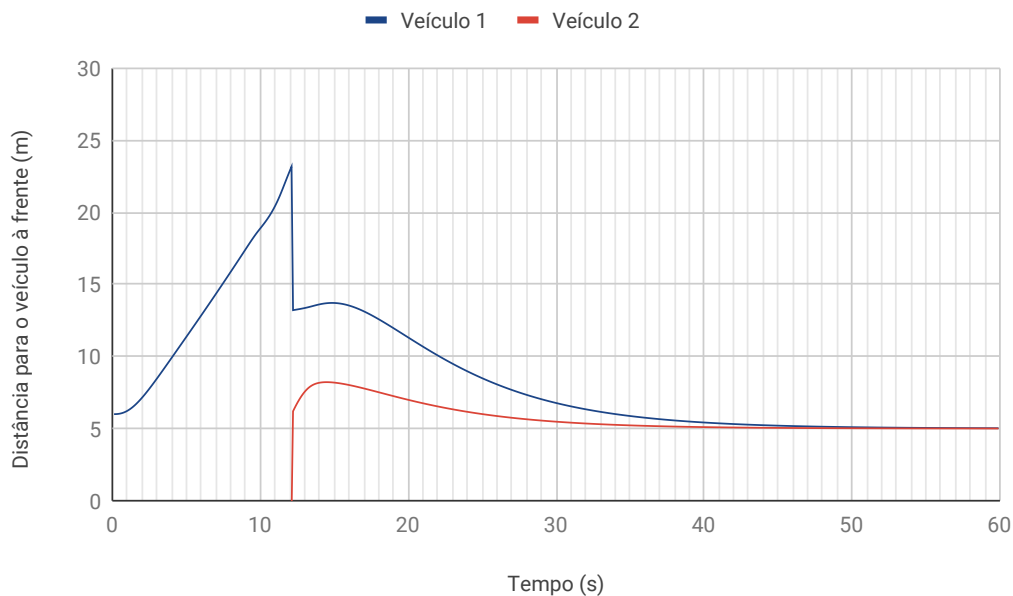


Figura 6.5: Gráfico de distâncias inter-veiculares do comboio ao longo do tempo

Percebe-se que, ao longo do tempo, a distância do veículo 1 para um veículo à frente oscila, especialmente no instante 12.1s em que o referencial deixa de ser o veículo 0 e passa a ser o veículo 2. No caso do veículo 2, após a marcação de 12s o radar detecta a presença de um veículo à frente (veículo 0) e inicia a medição da distância de afastamento. A partir deste momento em que forma-se um comboio com 3 veículos, considera-se a medição do desvio padrão para o vetor das distâncias inter-veiculares.

A partir dos dados de distâncias inter-veiculares captados, calcula-se o desvio padrão destas distâncias para uma medir o impacto do protocolo



proposto na estabilidade de corda do comboio. A figura 6.6 demonstra que, mesmo com a finalização das manobras do veículo 0 (marcado pela estrela azul) e veículo 1 (marcado pelo quadrado vermelho), o sistema tende a reduzir a variação de distância inter-veicular e promover a estabilidade de corda. A partir do instante 40s no gráfico da figura 6.6, o sistema está bem próximo ao valor de 0 no desvio padrão das distâncias inter-veiculares.

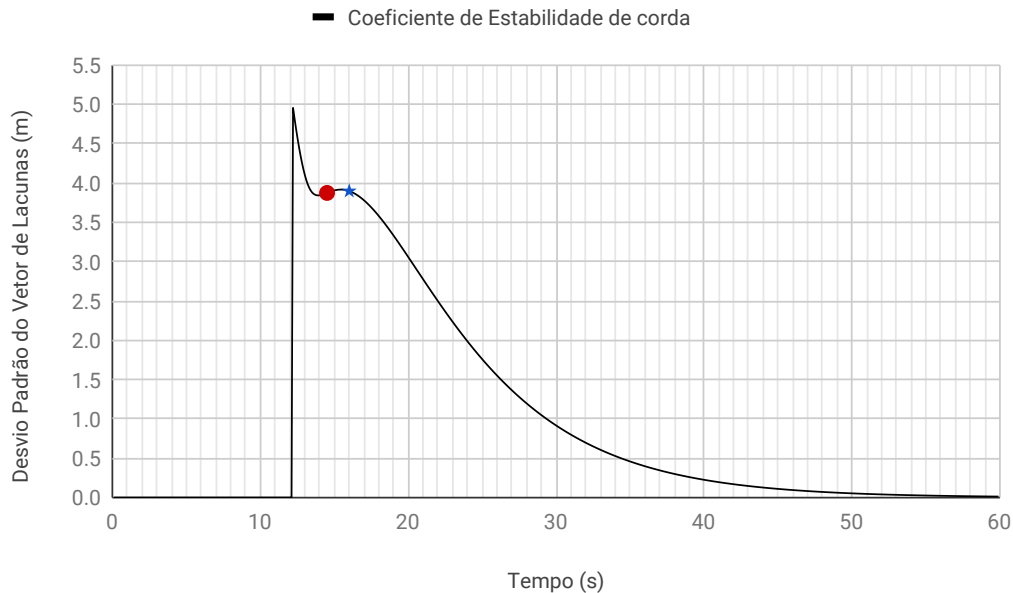


Figura 6.6: Gráfico de desvio padrão das lacunas inter-veiculares na formação de comboio ao longo do tempo

A intenção deste gráfico é medir se como um todo o mecanismo de auto-organização converge para atingir a estabilidade de corda. O coeficiente de estabilidade de corda minimiza a ocorrência dos *outliers*, isto é, os integrantes que não estiverem convergindo para o acoplamento.

### 6.3

#### Lições aprendidas

Ao longo do desenvolvimento do modelo e da realização dos experimentos, foram aprendidas lições que podem ser do interesse de outros pesquisadores. Destaca-se os seguintes itens:

- Com relação ao protocolo *Join at Front*, foi percebido que ao realizar a passagem de bastão de um líder para um solicitante, há que se ter uma atenção especial à movimentação lateral para não se forçar a frenagem brusca dos que passarão a ser seguidores do novo veículo líder. Portanto, uma distância segura maior que o padrão de espaçamento inter-veicular do comboio deve ser respeitada.

- Indiscutivelmente, a aceleração/desaceleração para ajuste longitudinal do veículo solicitante é um parâmetro que tem impacto na verificação de segurança lateral e no tempo de manobra. Optamos por não evoluir profundamente no cálculo deste parâmetro, já que é algo amplamente discutido em teoria de controle, e definimos uma aceleração/desaceleração fixa padrão para ajuste de respectivamente 1 e -1  $m/s^2$ .

## 6.4

### Conclusão

A partir do experimento realizado foi possível oportunizar a formação dinâmica de um comboio auto-organizável a partir de mudanças de contexto (ex.: estreitamento da pista).

Concluimos que o modelo de gerenciamento de comboios proposto neste trabalho permitiu a estabilidade no que diz respeito aos ajustes longitudinais e laterais na formação de um comboio a partir da modificação do ambiente. Além disso, foi garantida a estabilidade de corda inerente à sistemas que integram o controlador de cruzeiro CACC na realização do experimento.

A partir deste ajuntamento promovendo um sistema auto-organizável de comboio, pode-se derivar diversas conclusões baseadas em descobertas da literatura. Como exemplo, a aproximação estreita dos veículos traz melhor vazão do fluxo de veículos (demonstrado por Horowitz [42]), melhor aerodinâmica e por consequência economia de combustível e menor emissão de gases do efeito estufa (demonstrado pelo projeto SARTRE [52]).

A mobilidade urbana tem sido fortemente impactada nos últimos anos por novas formas mais inteligentes de se utilizar e dividir meios de transporte. O uso de carros compartilhados, carros particulares e aplicativos de carona já tem mostrado um efeito positivo na redução do trânsito nas cidades. A expectativa de impacto é ainda maior no que diz respeito ao uso de comboios veiculares e outras aplicações dos Sistemas Inteligentes de Transporte. Espera-se que a auto-organização dos veículos em frotas traga benefícios tanto em ambientes isolados (ex.: estreitamento de vias públicas) quanto na incorporação desta aplicação no amplo contexto das Cidades Inteligentes. Os benefícios esperados pelo uso de aplicações de comboio são a promoção de um trânsito mais eficiente, menor número de acidentes e menor poluição atmosférica.

Neste trabalho de dissertação, foram discutidos aspectos de auto-organização que trazem benefícios para nortear o desenvolvimento de aplicações para formação de comboios. Correlaciona-se conceitos como fenômeno emergente e estabilidade de corda, enfatizando que a formação de comboios trata-se de um sistema auto-organizável. Observa-se também o aspecto da interação que pode ocorrer neste sistema por meio de redes ad-hoc veiculares. Além disso, entendemos como a direção cooperativa pode ser ativada pela interação entre os veículos-parte de um comboio.

Como contribuição, propusemos um processo de auto-organização para nortear a formação de comboios em cenários de redução de faixas, o que ajudou a facilitar o desenvolvimento do modelo proposto. Também desenvolvemos um modelo de protocolo para gerenciamento de comboios e seu uso é iniciado em tempo de execução, a partir da detecção de mudanças no contexto rodoviário (ex.: estreitamento de pista). O modelo, disponibilizado em código-aberto, é capaz de realizar manobras de entrada tanto pela frente como pela cauda de frotas de forma segura. A posição de entrada é sempre direcionada pelo líder atual, que observa um critério simples de alocação de posições a partir da medição da distância euclidiana dos veículos solicitantes para a posição de destino.

O modelo de gerenciamento de comboios proposto é avaliado em um estudo de caso. Outro estudo de caso aplicado a um cenário realístico é

adicionado ao apêndice B. O protocolo desenvolvido manteve a estabilidade do comboio e foi capaz de negociar manobras simultâneas de entrada à frente (Join at Front) e entrada atrás (Join at Back), fazendo com que os veículos se adaptassem às modificações no ambiente rodoviário, além de beneficiar-se da formação para outros fins a que ela se propõe.

Ainda há muitos desafios a serem enfrentados no desenvolvimento de tecnologias para direção cooperativa, especialmente na aplicação de formação de comboios. A fim de estender este trabalho, poderíamos conferir maior autonomia aos veículos-parte de comboios formados a partir de mudanças no ambiente. É o caso, por exemplo, dos veículos que fazem o acesso pela retaguarda da frota. Estes poderiam apenas sinalizar sua entrada ao líder para que este armazene a formação, sem ter a necessidade de trocar mensagens de negociação. Além disso, a troca de mensagens entre os membros poderia ser reduzida a partir da aproximação de um limiar de estabilidade de corda desejado, caso os veículos estiverem próximos à distância inter-veicular de segurança do comboio e as condições da via estiverem estáveis não havendo oscilação da aceleração. Desta forma, o líder do comboio poderia fixar uma velocidade a ser aplicada por todos os membros, que deverão ajustar seus controladores de acordo com os dados percebidos pelo radar.

Outra possível extensão a este trabalho visa agregar novas manobras para serem executadas em outros contextos. Como exemplo, a manobra *Split* pode ser utilizada em contexto de alargamento de pista com o objetivo de melhorar a vazão do fluxo rodoviário. A possibilidade de mapear os contextos que ativem a formação de comboios também desperta o interesse de novas pesquisas. Como exemplo, a partir de um coeficiente de densidade de tráfego, uma formação de comboios pode ser aplicada para trazer maior segurança dos movimentos longitudinais e laterais e melhorar o congestionamento de veículos. Seria possível medir a evolução deste coeficiente a partir do início da formação de comboios e variar a quantidade de veículos que fariam parte das formações.

Além disso, a posição de entrada é outro aspecto que pode ser evoluído no futuro. A decisão sobre a posição de entrada de veículos pode considerar outros parâmetros como velocidade, aceleração, tipo de veículo, etc. Os trabalhos de Nilsson et al. [60, 61], que consideram a cinética veicular, podem auxiliar o desenvolvimento de novos algoritmos mais sofisticados para alocação de posição de entrada em uma formação de comboios.

Finalmente, imagina-se que muitos destes desafios relacionados à formação de comboios sejam tratados pela comunidade científica em um futuro próximo. Além disso, espera-se que os esforços somados por indústria e academia possam gerar tecnologias (sensores, sistemas ADAS, protocolos de cooperação,

etc) com custos de produção acessíveis a fim de que sociedade possa colher os frutos de uma mobilidade inteligente. Acreditamos que os estudos em direção cooperativa, assim como este que se propõe, ajudam a escrever o futuro da mobilidade urbana para as próximas décadas e cooperam para o desenvolvimento de novas aplicações úteis à sociedade.

## Referências bibliográficas

- [1] EIGEN, M.; SCHUSTER, P.. **A principle of natural self-organization.** Naturwissenschaften, 64(11):541–565, 1977.
- [2] DRESSLER, F.. **A study of self-organization mechanisms in ad hoc and sensor networks.** Computer Communications, 31(13):3018 – 3029, 2008. Special Issue:Self-organization and self-management in communications as applied to autonomic networks.
- [3] GORODETSKII, V. I.. **Self-organization and multiagent systems: I. models of multiagent self-organization.** Journal of Computer and Systems Sciences International, 51(2):256–281, Apr 2012.
- [4] YE, D.; ZHANG, M. ; VASILAKOS, A. V.. **A survey of self-organization mechanisms in multiagent systems.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 47(3):441–461, March 2017.
- [5] PFEIFER, R.; LUNGARELLA, M. ; IIDA, F.. **Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics.** science, 318(5853):1088–1093, 2007.
- [6] BONNEAU, V.; YI, H.; PROBST, L.; PEDERSEN, B. ; LONKEU, O.. **Autonomous cars: a big opportunity for european industry.** Digital Transformation Monitor, 2017.
- [7] KOOPMAN, P.; WAGNER, M.. **Autonomous vehicle safety: An interdisciplinary challenge.** IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 9(1):90–96, Spring 2017.
- [8] BROWN, A.; GONDER, J. ; REPAC, B.. **An analysis of possible energy impacts of automated vehicles.** In: ROAD VEHICLE AUTOMATION, p. 137–153. Springer, 2014.
- [9] LU, X.-Y.; SHLADOVER, S. E.. **Automated truck platoon control and field test.** In: ROAD VEHICLE AUTOMATION, p. 247–261. Springer, 2014.
- [10] BAGLOEE, S. A.; TAVANA, M.; ASADI, M. ; OLIVER, T.. **Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for**

- transportation policies. *Journal of Modern Transportation*, 24(4):284–303, Dec 2016.
- [11] KRUPITZER, C.; SEGATA, M.; BREITBACH, M.; EL-TAWAB, S.; TOMFORDE, S. ; BECKER, C.. **Towards infrastructure-aided self-organized hybrid platooning**. In: 2018 IEEE GLOBAL CONFERENCE ON INTERNET OF THINGS (GCIOT), p. 1–6, Dec 2018.
- [12] SINGH, S.. **Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey**. Technical report, 2015.
- [13] JOHANSSON, G.; RUMAR, K.. **Drivers' brake reaction times**. *Human Factors*, 13(1):23–27, 1971. PMID: 5542208.
- [14] GERSHENSON, C.; HEYLIGHEN, F.. **When can we call a system self-organizing?** In: EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE, p. 606–614. Springer, 2003.
- [15] HEYLIGHEN, F.; OTHERS. **The science of self-organization and adaptivity**. *The encyclopedia of life support systems*, 5(3):253–280, 2001.
- [16] NAUS, G. J. L.; VUGTS, R. P. A.; PLOEG, J.; VAN DE MOLENGRAFT, M. J. G. ; STEINBUCH, M.. **String-stable cacc design and experimental validation: A frequency-domain approach**. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(9):4268–4279, Nov 2010.
- [17] AMOOZADEH, M.; DENG, H.; CHUAH, C.-N.; ZHANG, H. M. ; GHOSAL, D.. **Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by vanet**. *Vehicular communications*, 2(2):110–123, 2015.
- [18] SEGATA, M.; JOERER, S.; BLOESSL, B.; SOMMER, C.; DRESSLER, F. ; CIGNO, R. L.. **Plexe: A platooning extension for veins**. In: 2014 IEEE VEHICULAR NETWORKING CONFERENCE (VNC), p. 53–60. IEEE, 2014.
- [19] HAKEN, H.. **Synergetics: introduction and advanced topics**. Springer Science & Business Media, 2013.
- [20] ASHBY, W. R.. **Principles of the self-organizing system**. *Modern systems research for the behavioral scientist*, p. 108–118, 1968.
- [21] DE WOLF, T.; HOLVOET, T.. **Emergence and self-organisation: a statement of similarities and differences**. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENGINEERING SELF-ORGANISING APPLICATIONS 2004, p. 96–110, 2004.

- [22] PREHOFER, C.; BETTSTETTER, C.. **Self-organization in communication networks: Principles and design paradigms**. *Comm. Mag.*, 43(7):78–85, July 2005.
- [23] DRESSLER, F.. **Self-organization in ad hoc networks: Overview and classification**. University of Erlangen, Dept. of Computer Science, 7:1–12, 2006.
- [24] WEISS, G.. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. MIT press, 1999.
- [25] SERUGENDO, G. D. M.; IRIT, M.-P. ; KARAGEORGOS, A.. **Self-organisation and emergence in mas: An overview**. *Informatica*, 30(1), 2006.
- [26] HEYLIGHEN, F.. **Stigmergy as a universal coordination mechanism i: Definition and components**. *Cognitive Systems Research*, 38:4–13, 2016.
- [27] **IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**. IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), p. 1–3534, Dec 2016.
- [28] CAETANO, L. L.; SOARES, A. A. Z. ; DA SILVA, V. B.. **Redes veiculares: Uma proposta de aplicação para veículos de resgate**. In: XIII WORKSHOP DE REDES P2P, DINÂMICAS, SOCIAIS E ORIENTADAS A CONTEÚDO (WP2P+), p. 2–7, 2017.
- [29] **Wireless Access in Vehicular Environments**. IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009), p. 1–51, July 2010.
- [30] **IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Architecture**. IEEE Std 1609.0-2019 (Revision of IEEE Std 1609.0-2013).
- [31] **Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager**. IEEE Std 1609.1-2006, p. 1–71, Oct 2006.



- [32] **IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments— Security Services for Applications and Management Messages.** IEEE Std 1609.2-2016 (Revision of IEEE Std 1609.2-2013), p. 1–240, March 2016.
- [33] **IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Networking Services.** IEEE Std 1609.3-2016 (Revision of IEEE Std 1609.3-2010), p. 1–160, April 2016.
- [34] **IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Multi-Channel Operation.** IEEE Std 1609.4-2016 (Revision of IEEE Std 1609.4-2010), p. 1–94, March 2016.
- [35] **IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)— Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for Intelligent Transportation Systems (ITS).** IEEE Std 1609.11-2010, p. 1–62, Jan 2011.
- [36] **IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Identifier Allocations.** IEEE Std 1609.12-2012, p. 1–20, Sep. 2012.
- [37] CAETANO, L. L.; SOARES, A. A. Z.. **Redes Veiculares: Tendências e Estudo de Caso**, 2016. Monografia (Bacharelado em Sistemas de Informação), IFF (Instituto Federal Fluminense), Campos dos Goytacazes, Brazil.
- [38] WILLKE, T. L.; TIENTRAKOOL, P. ; MAXEMCHUK, N. F.. **A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications.** IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11(2):3–20, 2009.
- [39] MEJRI, M. N.; BEN-OTHTMAN, J. ; HAMDI, M.. **Survey on vanet security challenges and possible cryptographic solutions.** Vehicular Communications, 1(2):53–66, 2014.
- [40] AMOOZADEH, M.; RAGHURAMU, A.; CHUAH, C.; GHOSAL, D.; ZHANG, H. M.; ROWE, J. ; LEVITT, K.. **Security vulnerabilities of connected vehicle streams and their impact on cooperative driving.** IEEE Communications Magazine, 53(6):126–132, June 2015.
- [41] WOLF, M.; GENDRULLIS, T.. **Design, implementation, and evaluation of a vehicular hardware security module.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SECURITY AND CRYPTOLOGY, p. 302–318. Springer, 2011.

- [42] HOROWITZ, R.; VARAIYA, P.. **Control design of an automated highway system.** Proceedings of the IEEE, 88(7):913–925, 2000.
- [43] SHLADOVER, S. E.. **Path at 20—history and major milestones.** IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 8(4):584–592, 2007.
- [44] HALLÉ, S.; GILBERT, F.; LAUMONIER, J. ; CHAIB-DRAA, B.. **Architectures for collaborative driving vehicles: From a review to a proposal.** 2003.
- [45] VARUYA, P.. **Smart carts on smart roads: Problems of control.** IEEE Transactions on Automatic Control, 43(2):195–207, 1998.
- [46] HAN-SHUE TAN; RAJAMANI, R. ; WEI-BIN ZHANG. **Demonstration of an automated highway platoon system.** In: PROCEEDINGS OF THE 1998 AMERICAN CONTROL CONFERENCE. ACC (IEEE CAT. NO.98CH36207), volumen 3, p. 1823–1827 vol.3, June 1998.
- [47] TSUGAWA, S.; KATO, S.; MATSUI, T.; NAGANAWA, H. ; FUJII, H.. **An architecture for cooperative driving of automated vehicles.** In: ITSC2000. 2000 IEEE INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS. PROCEEDINGS (CAT. NO.00TH8493), p. 422–427, Oct 2000.
- [48] TSUGAWA, S.; KATO, S.; TOKUDA, K.; MATSUI, T. ; FUJII, H.. **A cooperative driving system with automated vehicles and inter-vehicle communications in demo 2000.** In: ITSC 2001. 2001 IEEE INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS. PROCEEDINGS (CAT. NO. 01TH8585), p. 918–923. IEEE, 2001.
- [49] SWAROOP, D.; HEDRICK, J. K.. **String stability of interconnected systems.** IEEE transactions on automatic control, 41(3):349–357, 1996.
- [50] RAJAMANI, R.. **Vehicle dynamics and control.** Springer Science & Business Media, 2011.
- [51] RAJAMANI, R.; TAN, H.-S.; LAW, B. K. ; ZHANG, W.-B.. **Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons.** IEEE Transactions on Control Systems Technology, 8(4):695–708, 2000.
- [52] BERGENHEM, C.; HUANG, Q.; BENMIMOUN, A. ; ROBINSON, T.. **Challenges of platooning on public motorways.** In: 17TH WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS, p. 1–12, 2010.

- [53] SEGATA, M.. **Safe and efficient communication protocols for platooning control**. PhD thesis, University of Trento, 2016.
- [54] **J3016B: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles**. Sae standard j3016, Society of Automotive Engineers, June 2018.
- [55] HALLE, S.; LAUMONIER, J. ; CHAIB-DRAA, B.. **A decentralized approach to collaborative driving coordination**. In: PROCEEDINGS. THE 7TH INTERNATIONAL IEEE CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS (IEEE CAT. NO.04TH8749), p. 453–458, Oct 2004.
- [56] MICHAUD, F.; LEPAGE, P.; FRENETTE, P.; LETOURNEAU, D. ; GAUBERT, N.. **Coordinated maneuvering of automated vehicles in platoons**. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 7(4):437–447, Dec 2006.
- [57] SEGATA, M.; DRESSLER, F.; LO CIGNO, R. ; GERLA, M.. **A simulation tool for automated platooning in mixed highway scenarios**. SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev., 16(4):46–49, Feb. 2013.
- [58] SEGATA, M.; BLOESSL, B.; JOERER, S.; DRESSLER, F. ; CIGNO, R. L.. **Supporting platooning maneuvers through ivc: An initial protocol analysis for the join maneuver**. In: 2014 11TH ANNUAL CONFERENCE ON WIRELESS ON-DEMAND NETWORK SYSTEMS AND SERVICES (WONS), p. 130–137, April 2014.
- [59] KAZEROONI, E. S.; PLOEG, J.. **Interaction protocols for cooperative merging and lane reduction scenarios**. In: 2015 IEEE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, p. 1964–1970. IEEE, 2015.
- [60] NILSSON, J.; BRÄNNSTRÖM, M.; COELINGH, E. ; FREDRIKSSON, J.. **Longitudinal and lateral control for automated lane change maneuvers**. In: 2015 AMERICAN CONTROL CONFERENCE (ACC), p. 1399–1404. IEEE, 2015.
- [61] NILSSON, J.; SILVLIN, J.; BRANNSTROM, M.; COELINGH, E. ; FREDRIKSSON, J.. **If, when, and how to perform lane change maneuvers on highways**. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 8(4):68–78, winter 2016.

- [62] ZEHANG SUN; BEBIS, G. ; MILLER, R.. **On-road vehicle detection: a review**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 28(5):694–711, May 2006.
- [63] **Autopilot | Tesla UK**. [https://www.tesla.com/en\\_GB/autopilot](https://www.tesla.com/en_GB/autopilot). Acessado em 10/09/2019.
- [64] **IntelliSafe Assist | Volvo Cars**. <https://www.volvocars.com/br/porque-volvo/inovacao-humana/futuro-da-conducao/seguranca/intellisafe-assist>. Acessado em 10/09/2019.
- [65] BERGENHEM, C.; SHLADOVER, S.; COELINGH, E.; ENGLUND, C. ; TSUGAWA, S.. **Overview of platooning systems**. In: PROCEEDINGS OF THE 19TH ITS WORLD CONGRESS, OCT 22-26, VIENNA, AUSTRIA (2012), 2012.
- [66] BEVLY, D.; CAO, X.; GORDON, M.; OZBILGIN, G.; KARI, D.; NELSON, B.; WOODRUFF, J.; BARTH, M.; MURRAY, C.; KURT, A.; REDMILL, K. ; OZGUNER, U.. **Lane change and merge maneuvers for connected and automated vehicles: A survey**. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 1(1):105–120, March 2016.
- [67] SERUGENDO, G. D. M.; FITZGERALD, J. S.; ROMANOVSKY, A. B. ; GUELF, N.. **A generic framework for the engineering of self-adaptive and self-organising systems**. Organic Computing-Controlled Self-organization, (08141):165–189, 2008.
- [68] HARRI, J.; FILALI, F. ; BONNET, C.. **Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy**. IEEE Communications Surveys Tutorials, 11(4):19–41, Fourth 2009.
- [69] SOMMER, C.; GERMAN, R. ; DRESSLER, F.. **Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis**. IEEE Transactions on Mobile Computing, 10(1):3–15, January 2011.
- [70] KRAUSS, S.. **Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics**. PhD thesis, Dt. Zentrum für Luft-und Raumfahrt eV, Abt. Unternehmensorganisation und . . . , 1998.
- [71] SOMMER, C.; DRESSLER, F.. **Progressing Toward Realistic Mobility Models in VANET Simulations**. IEEE Communications Magazine, 46(11):132–137, November 2008.

- [72] NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M.. **A cellular automaton model for freeway traffic.** *Journal de physique I*, 2(12):2221–2229, 1992.
- [73] TONGUZ, O. K.; VIRIYASITAVAT, W. ; BAI, F.. **Modeling urban traffic: A cellular automata approach.** *IEEE Communications Magazine*, 47(5):142–150, May 2009.
- [74] TREIBER, M.; HENNECKE, A. ; HELBING, D.. **Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations.** *Physical review E*, 62(2):1805, 2000.
- [75] MILANÉS, V.; SHLADOVER, S. E.. **Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data.** *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48:285 – 300, 2014.
- [76] XIAO, L.; WANG, M. ; VAN AREM, B.. **Realistic car-following models for microscopic simulation of adaptive and cooperative adaptive cruise control vehicles.** *Transportation Research Record*, 2623(1):1–9, 2017.
- [77] XIAO, L.; WANG, M.; SCHAKEL, W. ; VAN AREM, B.. **Unravelling effects of cooperative adaptive cruise control deactivation on traffic flow characteristics at merging bottlenecks.** *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 96:380 – 397, 2018.
- [78] LOPEZ, P. A.; BEHRISCH, M.; BIEKER-WALZ, L.; ERDMANN, J.; FLÖTTERÖD, Y.-P.; HILBRICH, R.; LÜCKEN, L.; RUMMEL, J.; WAGNER, P. ; WIESSNER, E.. **Microscopic traffic simulation using sumo.** In: *THE 21ST IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*. IEEE, 2018.
- [79] WEGENER, A.; PIORKOWSKI, M.; RAYA, M.; HELLBRÜCK, H.; FISCHER, S. ; HUBAUX, J.-P.. **Traci: An interface for coupling road traffic and network simulators.** *11th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS)*, 2008.
- [80] SEGATA, M.. **Platooning in sumo: an open source implementation.** In: *SUMO USER CONFERENCE*, p. 51–62, 2017.
- [81] **Chapter 2, Traffic Detector Handbook: Third Edition—Volume I - FHWA-HRT-06-108.** <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/02.cfm>. Acessado em 10/08/2019.

- [82] DRESSLER, F.; KRÜGER, B.; FUCHS, G. ; GERMAN, R.. **Self-organization in sensor networks using bio-inspired mechanisms.**
- [83] TOLEDO, T.; ZOHAR, D.. **Modeling duration of lane changes.** Transportation Research Record, 1999(1):71–78, 2007.
- [84] **Zipper Merge - MnDOT.** <http://www.dot.state.mn.us/zippermerge/index.html>. Acessado em 12/08/2019.
- [85] XIANGHENG LIU; GOLDSMITH, A.; MAHAL, S. S. ; HEDRICK, J. K.. **Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons.** In: ITSC 2001. 2001 IEEE INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS. PROCEEDINGS (CAT. NO.01TH8585), p. 625–630, Aug 2001.

## A

### Mensagens de rede

Para a interação entre os veículos-parte de um comboio, definimos um conjunto de mensagens a serem trocadas para que haja a correta coordenação entre os membros do comboio. Os veículos-parte trocarão mensagens periódicas (*beacons*) e um conjunto de mensagens a será utilizado nos protocolos *Join at Back* e *Join at Front*.

#### Formato do *Beacon*

A troca de parâmetros entre os membros de um comboio é realizada por meio de *beacons*. Os *beacons* são mensagens de *broadcast* de único salto disseminadas por cada veículo na rede e comumente utilizadas em aplicações de sistemas distribuídos. O intervalo para transmissão de cada *beacon* pode variar, mas para as aplicações de comboios tende a ser de 100ms. A fim de evitar colisões de pacotes na camada física, os veículos produzem um tempo aleatório para o início da transmissão destas mensagens.

O formato do pacote de *beacon* a ser utilizado pelo protocolo de gerenciamento está ilustrado na figura A.1.

Cabeçalho WSMP	Emissor	Aceleração CC	Aceleração	Velocidade	Pos X	Pos Y	Comprimento	Ângulo	Faixa	Outros campos
-------------------	---------	------------------	------------	------------	-------	-------	-------------	--------	-------	---------------

Figura A.1: Formato do *beacon* utilizado pelo protocolo de gerenciamento

Os campos do pacote de *beacon* incluem:

- **Endereço do Emissário:** O endereço do emissor da mensagem. Serve para identificar o veículo na rede.
- **Aceleração do Controlador:** Importante para veículos do comboio realizarem ajustes para manter a estabilidade de corda.
- **Aceleração do Veículo**
- **Velocidade do Veículo**
- **Posição em X:** Informa a posição do veículo no eixo das abscissas em plano cartesiano.

- **Posição em Y:** Informa a posição do veículo no eixo das ordenadas em plano cartesiano.
- **Comprimento do veículo:** Informação relevante para realizar o cálculo de entrada em um comboio.
- **Ângulo:** Dado importante para diferenciar veículos trafegando em sentidos reversos.
- **Índice da faixa:** Dado essencial para organização do comboio por faixas.
- Outros campos que podem ser utilizados incluem endereço do retransmissor, *timestamp*, número de sequência, velocidade em X, velocidade em y, etc.

Outros trabalhos não consideram a faixa atual do veículo como um campo essencial na troca de informações entre veículos de um comboio. Entendemos que a formação dos comboios poderia se beneficiar da divisão da infraestrutura viária em faixas para fins de melhor organização e formação das frotas de veículos em direção cooperativa. Logo, decidimos inserir o campo de índice da faixa no formato do *beacon* pelos seguintes motivos:

- O conhecimento da faixa atual de um veículo torna possível para um veículo vizinho entender melhor a formação dos veículos nas suas redondezas;
- Descobrir a faixa atual de um veículo que solicita entrada em um comboio auxilia o líder a definir a ordem de prioridade que tal veículo terá na entrada. Ex.: Veículos em faixas mais à esquerda podem ter prioridade no acesso a comboios formados por veículos de passeio;
- É mais intuitivo e possivelmente mais barato aproveitar a infraestrutura de faixas das vias para organizar a formação de comboios ao invés de desenvolver algoritmos que calculem uma ocupação lateral eficiente.

### Outras mensagens

Na tabela A.1, lista-se outras mensagens criadas para a interação entre os veículos-parte do modelo e detalha-se o seu tipo (*broadcast*, *multicast* ou *unicast*), a sua função e os emissores/destinatários.

Enfatiza-se que as mensagens *broadcast* são destinadas a todos os nós, as de **multicast** são enviadas a alguns nós vizinhos, e as de **unicast** são enviadas a apenas um veículo.



Tabela A.1: Mensagens criadas para os protocolos Join-at-Back e Join-at-Front

Mensagem	Descrição	Emissor / Destinatário
1 RoadSignWarning (B)	Anuncia uma placa de sinalização à frente	Veículo detector para veículos vizinhos
2 PlatooningBeacon (B)	Anuncia as variáveis atuais do veículo	Veículo atual para veículos vizinhos
3 JoinPlatoonRequest (U)	Solicitação de entrada em comboio	Veículo solicitante para o veículo líder
4 JoinPlatoonResponse (U)	Resposta à solicitação de entrada	Veículo líder para o veículo solicitante
5 MoveToPosition (U)	Mensagem contém a posição de acesso ao comboio	Veículo líder para o veículo solicitante
6 MoveToPositionAck (U)	Confirmação de chegada da mensagem anterior	Veículo solicitante para o veículo líder
7 JoinFormation (U)	Solicitação de aproximação à formação de comboio	Veículo líder para o veículo solicitante
8 JoinFormationAck (U)	Aceitação ao pedido de aproximação	Veículo solicitante para o veículo líder
9 HandoffLeadershipRequest (U)	Solicitação da liderança do comboio	Veículo solicitante para o atual líder
10 HandoffLeadershipResponse (U)	Autorização para transferência de liderança	Líder atual para o novo líder
11 LeadershipUpdate (M)	Atualização na formação do comboio	Veículo líder para veículos seguidores
12 InitPlatoon (M)	Anuncia o início da formação de comboio.	Líder para veículos na retaguarda

## B

### Estudo de Caso: Ponte Rio-Niterói

Como uma forma de aprender sobre as funcionalidades do conjunto de arcabouços Plexe/OMNET/SUMO, desenvolvemos um cenário de teste para aprender sobre os seguintes eventos:

- a formação de comboios em tempo de execução;
- a realização das manobras Join-at-Back.

O principal objetivo ao realizar este experimento é verificar se a formação de veículos em comboios realmente coopera para a redução do tempo perdido em congestionamentos. Ao final da simulação, coletaremos o tempo total de trajeto de cada um dos veículos envolvidos no cenário.

#### B.1

##### Cenário

O cenário de testes a ser simulado é uma das principais vias expressas do Brasil, a ponte Presidente Costa e Silva. Popularmente conhecida como Ponte Rio-Niterói, o trecho da rodovia BR-101 que conecta os municípios de Niterói e Rio de Janeiro é ponto de passagem de milhares de veículos por dia. Apesar de ser um trecho de rodovia e permitir velocidades acima da média dos centros urbanos, a ponte concentra período de grandes congestionamentos em diversos horários representando um considerável gargalo para o fluxo de veículos na região metropolitana do Rio de Janeiro.

Utilizando a ferramenta OpenStreetMap, recortamos o principal trecho de congestionamento que fica a partir do vão central ponte, representando um comprimento total de 11,03 quilômetros. Tal trecho da ponte possui um total de 4 faixas com velocidade máxima permitida de 80 km/h e, segundo o Código de Trânsito Brasileiro, velocidade mínima de 40 km/h. Simularemos o fluxo de veículos partindo do sentido Rio de Janeiro com destino a Niterói. Com propósito de facilitar a percepção da simulação, removemos a praça de pedágio ao final do trecho para compreender apenas o fluxo e as oscilações geradas pela velocidade e aceleração dos veículos.

O volume de tráfego foi estimado a partir de dados da concessionária Ecoponte no Twitter <sup>1</sup>, que disponibiliza o tempo médio de travessia a cada hora. A partir de um cálculo de saturação do trecho citado, estima-se um fluxo de 2935 veículos. O volume estimado foi baseado no tempo médio de travessia de 34 minutos, dentro do período de 17:30 e 18:30 de um dia de sexta-feira. Consideramos o tamanho médio de um carro como sendo de 4 metros de comprimento e garantimos também um espaçamento seguro entre os veículos. Reproduzimos o fluxo de veículos no simulador SUMO.

Considera-se um experimento base (*baseline*), em que os veículos não podem utilizar quaisquer aplicações em uma rede veicular e outro experimento (Comboio) em que os veículos se beneficiam de uma aplicação de formação de comboios com controlador CACC, que permite o ajuntamento a partir da faixa mais à direita (Faixa 0). A aplicação permite apenas a execução da manobra de entrada pela cauda (Join at Back). Isto é, ao notar o anúncio de um comboio nas redondezas, os veículos interessados ajustarão suas posições longitudinais e laterais para acessar o comboio pela cauda. É importante ressaltar que limitamos os comboios a um número máximo de 8 veículos e definimos o espaçamento inter-veicular padrão para 5 metros.

Considera-se uma taxa de penetração para rádios de comunicação 802.11p para 25% dos carros do fluxo. Não consideramos falhas na transmissão de pacotes de mensagens para este experimento.

Reproduzimos 10 repetições de cada experimento, introduzindo aleatoriedade através do algoritmo *Mersenne Twister* implementado no SUMO<sup>2</sup>.

## B.2

### Resultados

Os resultados do tempo médio de trajetória foram comparados no gráfico da figura B.1. Em relação ao conjunto de veículos, percebemos que a introdução de uma faixa destinada à formação de comboios reduziu o tempo de trajeto do conjunto completo em 5,5%. Isto se deve principalmente à velocidades mais altas e espaçamentos "apertados" dos veículos na faixa mais à direita.

<sup>1</sup>[https://twitter.com/\\_ecoponte](https://twitter.com/_ecoponte)

<sup>2</sup><https://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Randomness>

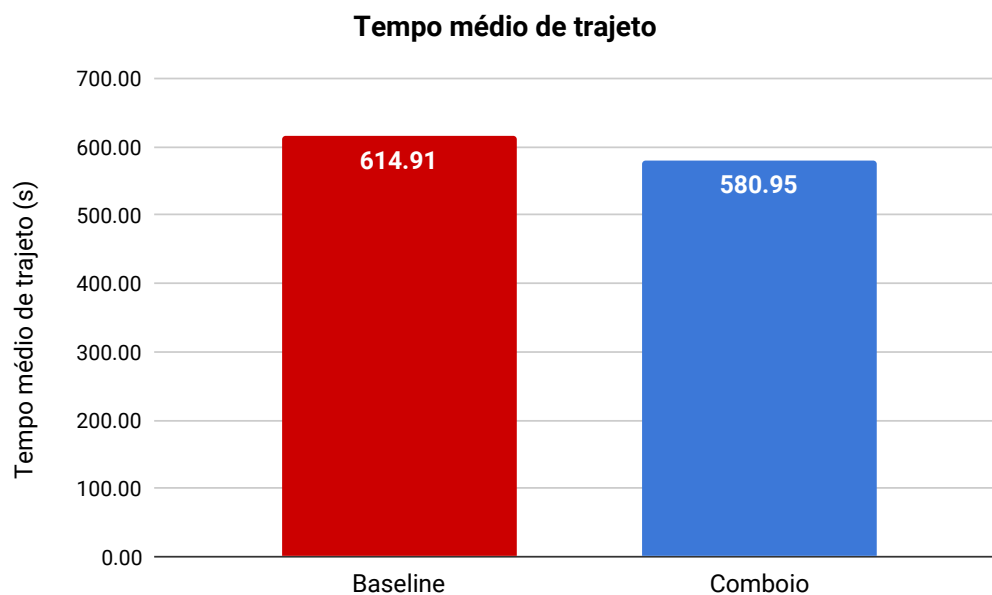


Figura B.1: Comparação do tempo médio de trajeto dos experimentos *baseline* e comboio

O tempo médio de trajetória dos veículos na faixa 0 também é observado, coletando esta métrica nos experimentos *baseline* e comboio. A figura B.2 compara o tempo médio de travessia para os veículos que trafegaram na faixa mais à direita, reservada para a formação de comboios.

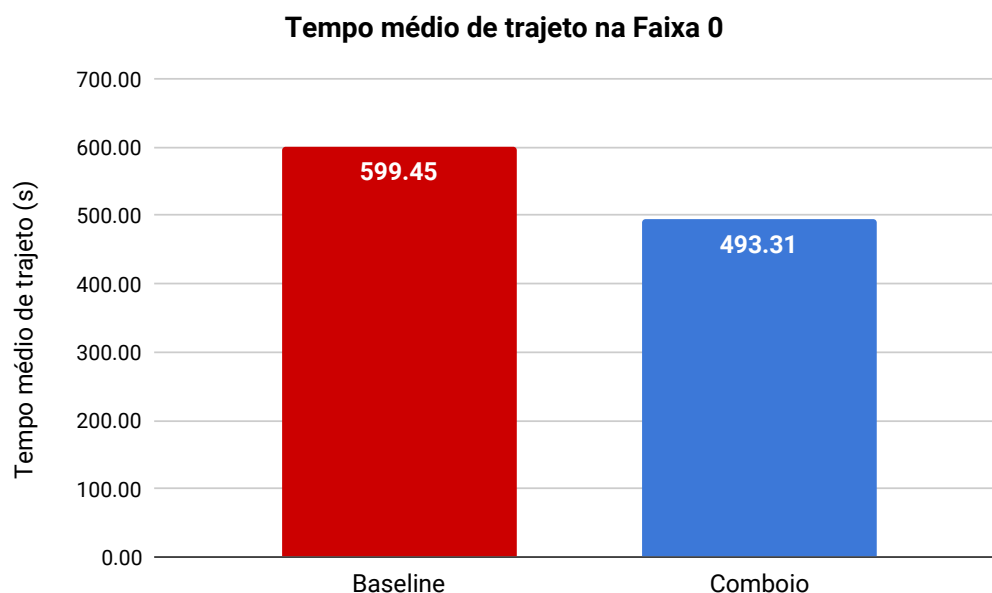


Figura B.2: Comparação do tempo médio de trajeto dos experimentos *baseline* e comboio na faixa 0

Para os veículos trafegando na faixa 0, o experimento com a formação

de comboios demonstrou uma redução no tempo de trajeto em mais de 100 segundos, o que representa uma economia de tempo de 17,7%. Isto é, a permissão de formar comboios na faixa mais à direita representou para estes veículos uma economia de 1 minuto e 46 segundos no tempo de viagem.

Atribuímos a economia de tempo ao uso do controlador CACC, que permitiu aos veículos a desempenharem uma velocidade média de 80 km/h, máxima permitida pela via. Além disso, a densidade veicular na faixa aumentou devido à possibilidade de espaçamento mais estreito ativada pelo controlador de cruzeiro.

Concluimos este breve estudo de caso percebendo um benefício direto da utilização do controlador de cruzeiro CACC aliado a uma aplicação para gerenciar a formação de comboios. Os tempos de trajeto médio da malha de veículos foi reduzido, sendo possível mitigar o congestionamento dos veículos.