

Uma visão geral sobre Redes de Pelotão e propostas de Transporte Automatizado

Igor Gonçalves de Souza
Mestrado em Telecomunicações
Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL
Santa Rita do Sapucaí/MG, Brasil
igor.souza@mtel.inatel.br

Abstract—This article provides an overview of the development, implementation, and evaluation of technologies for automated transportation systems in platoon networks, focusing on enhancing road safety, efficiency, and capacity. Various studies, experimental projects, and computer simulations validate the proposed technologies, which cover areas such as vehicular communication, automated control, and obstacle detection. The results highlight the potential of these innovations to transform urban and interurban mobility, emphasizing their benefits in reducing accidents, improving traffic flow, and lowering operational costs.

Index Terms—Automated transportation, platoon networks, road safety, traffic efficiency.

Resumo—Este artigo apresenta uma visão sobre desenvolvimento, implementação e avaliação de tecnologias voltadas para sistemas de transporte automatizado em redes de pelotão, com foco em aumentar a segurança, eficiência e capacidade das rodovias. Diferentes estudos, projetos experimentais e simulações computacionais validam as tecnologias propostas, que abrangem áreas como comunicação veicular, controle automatizado e detecção de obstáculos. Os resultados apontam para o potencial dessas inovações em transformar a mobilidade urbana e interurbana, destacando os benefícios em reduzir acidentes, melhorar o fluxo de tráfego e diminuir os custos operacionais.

Palavras Chave— Comunicação veicular, redes de pelotão, segurança rodoviária, transporte automatizado.

I. INTRODUÇÃO

Os acidentes de trânsito são uma das maiores causas de mortes em todo o mundo, representando uma séria preocupação para os governos, a segurança pública e a gestão rodoviária. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que, anualmente, cerca de 1,3 milhão de pessoas perdem suas vidas em decorrência de acidentes de trânsito. No Brasil, dados alarmantes reforçam a necessidade de mudanças urgentes. A imprudência, incluindo excesso de velocidade, direção sob efeito de álcool e a realização de ultrapassagens em locais indevidos, é responsável por aproximadamente 53% das fatalidades, afetando não apenas os motoristas, mas também pedestres (23%), ciclistas (6%) e usuários vulneráveis das vias [1]. Além disso, o aumento da demanda por transporte e a crescente quantidade de veículos nas estradas resultam em congestionamentos graves, contribuindo para um ambiente rodoviário inseguro, menos eficiente e com altos índices de poluição lançados na atmosfera [2].

Conforme dados do Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL) [3], o Brasil ocupa o terceiro lugar

global em óbitos por acidentes rodoviários, registrando, em média, 65.838 acidentes e 5.344 mortes anuais nas rodovias federais desde 2018. Como mostra a Figura 1, as causas predominantes incluem velocidade elevada, falta de distância segura entre veículos e atenção dos condutores. Em paralelo, a falta de infraestrutura adequada em muitas rodovias brasileiras também tem se mostrado uma barreira significativa para a redução de acidentes, com trechos mal sinalizados e condições de manutenção deficiente. Estudos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) indicam ainda um crescimento significativo nos acidentes fatais, com um salto de aproximadamente 8.000 casos em 2014 para 34.000 em 2021. Esses números evidenciam a urgência de adotar tecnologias que promovam maior segurança e eficiência nas rodovias, como sistemas inteligentes de transporte, controle automatizado de velocidade e redes de veículos cooperativos.

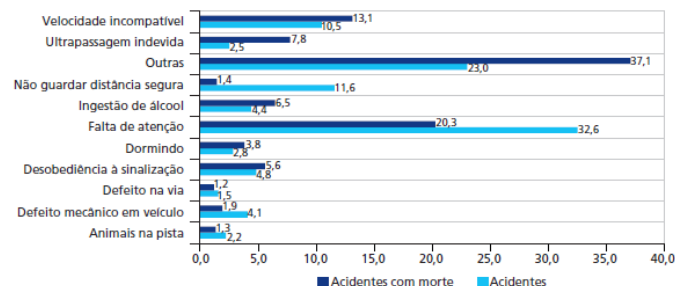


Figura 1. Causas de acidentes e fatalidades em rodovias federais no Brasil.

Diante desse cenário, soluções baseadas em condução autônoma e cooperativa têm ganhado destaque. Essas tecnologias não apenas visam reduzir os erros humanos no trânsito, mas também buscam otimizar o uso das infraestruturas rodoviárias, minimizando o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes. A condução autônoma permite que veículos operem sem intervenção humana, utilizando sistemas avançados de navegação que integram sensores, algoritmos e comunicação veicular. O controle combina ações longitudinais (aceleração e frenagem) e direção, além de protocolos que coordenam movimento e formação do tráfego.

Dentro do contexto da condução autônoma, as Redes de Platoon (ou Redes de Pelotão) se destacam como uma abordagem promissora. Neste modelo, exemplificado na Figura 2,

um veículo líder define a velocidade v e a direção, enquanto outros veículos do pelotão seguem automaticamente, formando uma cadeia de veículos sincronizada. Este conceito, explorado por projetos renomados como o *PATH (Partners for Advanced Transit and Highways)*, ou Parceiros para Transporte e Rodovias Avançadas) e o Projeto *SARTRE (Safe Road Trains for the Environment)*, ou Trens Rodoviários Seguros para o Meio Ambiente) apresentados em [4], oferece benefícios significativos. As Redes de Platoon promovem maior segurança, eliminando ultrapassagens perigosas e mantendo uma distância d segura entre veículos, o que reduz drasticamente o risco de colisões traseiras e laterais. Além disso, contribuem para a redução do consumo de combustível, já que o comportamento aerodinâmico dos veículos organizados em pelotão diminui o arrasto, resultando em maior eficiência energética. A circulação coordenada também melhora a eficiência do tráfego, otimizando o uso das vias, reduzindo congestionamentos e aumentando a capacidade das rodovias. Por fim, este modelo promove a sustentabilidade ambiental, com menores emissões de gases poluentes, contribuindo para um transporte mais limpo e sustentável.

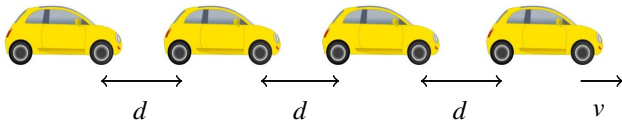


Figura 2. Movimento do pelotão a uma velocidade v separados por uma distância d .

A implementação desse modelo envolve a utilização de diferentes topologias de controle, que definem como os veículos interagem e trocam informações. Estas topologias variam de sistemas centralizados, em que o líder gerencia diretamente todos os membros do pelotão, a sistemas distribuídos, nos quais as decisões são tomadas localmente com base em dados dos sensores e da comunicação com veículos vizinhos.

Considerando os avanços tecnológicos recentes, a integração de Redes de Platoon em rodovias já não é apenas uma proposta teórica, mas uma solução realista que pode transformar o transporte rodoviário. Estes sistemas oferecem não apenas maior segurança e eficiência, mas também um caminho viável para um futuro mais sustentável. Este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão geral e descritiva sobre os projetos já desenvolvidos para as Redes de Pelotão e promover propostas para o seguimento das pesquisas em condução autônoma.

O trabalho está dividido em 6 capítulos, em que, além da Introdução, o capítulo II comenta sobre trabalhos relacionados ao tema; o capítulo III explica os conceitos-chave necessários para compreender as Redes de Pelotão e comenta sobre as estratégias já propostas; o capítulo IV apresenta soluções já existentes no mercado; o capítulo 6 expõe as conclusões.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Nos últimos anos, diversos estudos têm explorado avanços na condução autônoma em estradas, consolidando-se como uma promessa para a mobilidade do futuro. Esses trabalhos

abrangem aplicações em veículos de passeio, comerciais e de grande porte, empregando uma variedade de estratégias de controle e comunicação para aprimorar segurança, eficiência e autonomia.

Michaud et al. em [5] exploram estratégias de coordenação distribuída para pelotões de veículos automatizados, analisando diferentes níveis de comunicação entre os veículos para realizar manobras seguras, como entradas, saídas e recuperação de acidentes. Em vez de centralizar as decisões no líder, o estudo distribui as decisões localmente entre os veículos envolvidos na manobra. Ensaios com robôs confirmam que a coordenação distribuída é viável na prevenção de acidentes, mesmo em condições de comunicação restrita.

Santini et al. em [6] propõe um controlador longitudinal distribuído para gerenciar pelotões de veículos cooperativos, garantindo estabilidade e segurança em manobras. Um único algoritmo de controle simplifica o sistema e melhora a eficiência, eliminando a necessidade de alternar entre controladores. Utilizando simulações com comunicação interveicular (IVC) de última geração e considerando a dinâmica dos veículos bem como as características da rede de comunicação, os resultados mostram a viabilidade do sistema em diferentes manobras e cenários.

Milanés et. al. em [7] apresentam o desenvolvimento e testes de um sistema de controle de cruzeiro adaptativo cooperativo (CACC), que combina comunicação veículo-a-veículo (V2V) com sensores tradicionais para melhorar o desempenho do ACC convencional. O sistema usa dois controladores, sendo um para aproximação ao pelotão e outro para regular o acompanhamento. Testado em quatro veículos Infiniti M56s, o trabalho demonstra ganhos de eficiência e segurança em comparação aos sistemas ACC disponíveis comercialmente.

O conceito de condução autônoma pode ser alcançado por meio de diversas estratégias, como evidenciado pelos trabalhos analisados. A implementação de IVC e sistemas cooperativos, como CACC, permite a troca de informações entre veículos, aumentando a segurança e eficiência do tráfego. Além disso, estratégias de controle distribuído, com decisões locais e detecção limitada, mostram a viabilidade de manobras coordenadas, mesmo em cenários de comunicação restrita. Simulações e experimentos com protocolos avançados e algoritmos otimizados demonstram que a estabilidade, a integração dinâmica de veículos em pelotões e a prevenção de acidentes podem ser aprimoradas significativamente, consolidando a condução autônoma como uma solução prática e promissora para os desafios do transporte rodoviário.

III. FUNDAMENTOS DE CONTROLE E COMUNICAÇÃO

Nesta seção, serão apresentados conceitos a respeito de comunicação interveicular e controle de pelotão necessários para compreensão das propostas de desenvolvimento para este tipo de sistema.

A. Comunicação Interveicular (IVC)

A comunicação entre veículos (IVC, *Inter-Vehicle Communication*) permite que nós móveis interajam diretamente

com sistemas vizinhos utilizando redes sem fio. Por meio dessa comunicação, os veículos podem trocar e acessar informações, como dados de movimento e estado, essenciais para coordenação e segurança. Essa troca pode ocorrer de forma individual ou, em casos como as redes de pelotão, no formato um-para-muitos, como quando um veículo líder emite comandos para todos os veículos de uma formação [8].

Na exemplificação da Figura 2, o veículo líder desempenha o papel de definir o ritmo do pelotão e comunicar as manobras aos seguidores, que ajustam seus movimentos para manter uma distância constante em relação ao veículo diretamente à sua frente. Cada veículo coleta informações, como suas coordenadas de posição e dados de movimento, por meio de sensores locais, e transmite essas informações periodicamente ao veículo subsequente. Esses dados são utilizados por algoritmos para calcular a distância, velocidade e aceleração relativas ao antecessor, alimentando o controle de malha fechada de aceleração e frenagem, de forma a minimizar erros de espaçamento. Adicionalmente, o veículo líder transmite seus próprios dados de movimento a todo o pelotão, funcionando como uma referência global para evitar a amplificação de erros de espaçamento ao longo da formação [8]. Além disso, o líder também pode enviar mensagens de controle específicas, como reorganização do grupo ou alterações no plano de rota, garantindo a eficiência e segurança do sistema.

B. Sensores em redes veiculares

Para garantir a segurança na direção autônoma, veículos equipados com uma variedade de sensores, como os de movimento e detecção de obstáculos, conseguem mapear o ambiente rodoviário e monitorar as condições de tráfego [9]. Esses sensores podem ser categorizados em diferentes domínios de aplicação:

- **segurança:** sensores de distância, visão noturna, velocidade etc. auxiliam em funções como suporte à mudança de faixa e alertas de colisão frontal;
- **diagnóstico:** detectam mau funcionamento de componentes, emitindo alertas e otimizando tempo de manutenção;
- **monitoramento ambiental:** fornecem informações sobre condições climáticas, como temperatura e pressão, ajustando sistemas internos, como ar refrigerado.

Além de relatar congestionamentos e sugerir rotas para um centro de controle, esses sensores compartilham informações essenciais com outros veículos na rede. O monitoramento do ambiente oferece benefícios significativos; por exemplo, um acelerômetro pode identificar buracos e lombadas, permitindo que os veículos evitem essas rotas indesejadas [10].

Sensores LiDAR medem a distância entre veículos, garantindo uma condução segura. Esse tipo de equipamento detecta objetos através de um laser direcionado a ele. Cada ponto é calculado pelo tempo de reflexão do laser ao sensor a partir do contato com a superfície. Os dados processados podem encontrar objetos ao redor do veículo com distância e ângulo, conforme ilustrado na Figura 3, e o tipo de objeto pode ser determinado com câmera, se necessário, melhorando a visibilidade e a consciência situacional dos veículos. Um dado

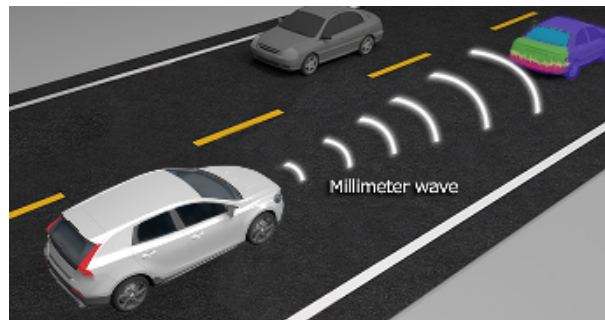


Figura 3. Princípio de funcionamento do sensor LiDAR.

fundido de câmera e LiDAR pode fornecer visão completa do ambiente [11].

Sensores de radar podem ser usados para medir velocidades ou integrados a outros medidores para aplicações em rastreamento de objetos e seres humanos e controle do tráfego de veículos. Especificamente em redes veiculares, o desenvolvimento de sistemas de assistência ao motorista incorpora sensores de radar para aceleração, desaceleração e distância para o veículo à frente [12].

C. Sistemas Cooperativos de Condução

O Controle de Cruzeiro Adaptativo Cooperativo (CACC) é uma extensão avançada do sistema de Controle de Cruzeiro Adaptativo (ACC), amplamente utilizado em veículos modernos. Enquanto o ACC utiliza sensores locais, como radares, para monitorar e ajustar automaticamente a velocidade e a distância em relação ao veículo diretamente à frente, o CACC introduz comunicação veicular (IVC) para compartilhar informações em tempo real entre veículos próximos. Essa capacidade cooperativa permite que os veículos ajustem suas manobras de forma coordenada, aumentando a eficiência e a segurança em redes de pelotão [13].

Nas redes de pelotão, o CACC desempenha um papel essencial ao permitir que um veículo líder transmita comandos e informações, como velocidade, aceleração e mudanças de trajetória, para todos os veículos seguidores. Cada veículo no pelotão combina essas informações compartilhadas com dados coletados por seus próprios sensores para calcular distâncias relativas e ajustar a aceleração e frenagem de maneira precisa. Isso minimiza erros de espaçamento entre os veículos e evita a propagação de oscilações indesejadas, conhecidas como “efeito sanfona”, que podem comprometer a estabilidade do pelotão [13].

A principal vantagem do CACC está na sua capacidade de reduzir significativamente as lacunas entre veículos. Em comparação com o ACC tradicional, o uso de comunicação veicular permite que as distâncias sejam reduzidas a poucos metros, economizando até 15–20% de combustível devido à diminuição do arrasto aerodinâmico. Além disso, o CACC melhora a fluidez do tráfego, reduz o congestionamento e evita a necessidade de construir novas infraestruturas rodoviárias. O Projeto SARTRE, por exemplo, demonstrou experimentalmente esses benefícios ao implementar pelotões controlados

por CACC, validando tanto a eficiência energética quanto a capacidade de aumentar a segurança [13].

O CACC também é altamente flexível em diferentes topologias de controle. Em algumas abordagens, como no projeto California *PATH*, o CACC utiliza dados do veículo líder e do predecessor imediato. Em outras, como a proposta de Ploeg et al. [14], o sistema considera apenas o veículo diretamente à frente. Adicionalmente, há propostas baseadas em consenso, onde o padrão de controle é configurável em tempo real, permitindo adaptações às condições da rede veicular e às características do pelotão. Essa flexibilidade é crucial para garantir que o sistema permaneça eficiente e seguro, mesmo em situações em que há perda de pacotes ou atrasos na comunicação.

D. Controle Longitudinal e Direção

O controle longitudinal e lateral é essencial para o funcionamento eficiente e seguro das redes de pelotão, permitindo que os veículos mantenham alinhamento e distâncias adequadas em cenários dinâmicos de tráfego. Enquanto o controle longitudinal foca no espaçamento entre os veículos, ajustando aceleração e desaceleração para evitar colisões e garantir estabilidade, o controle lateral assegura o posicionamento correto dos veículos dentro da faixa, utilizando sensores como câmeras, marcadores magnéticos e mapas 3D. Esses dois aspectos trabalham de forma complementar para otimizar o desempenho das redes de transporte cooperativo [4], [7].

O controle longitudinal oferece vantagens como a prevenção de amplificação de erros entre os veículos, conhecida como estabilidade de corda, e a otimização do fluxo de tráfego em rodovias, especialmente em estratégias de espaçamento constante. No entanto, pode enfrentar dificuldades em condições de tráfego variáveis, como frenagens bruscas ou curvas, além de depender de sensores e comunicações precisas que podem ser vulneráveis em ambientes com baixa conectividade [4]. Já o controle lateral proporciona precisão no alinhamento dos veículos, mesmo em faixas estreitas ou trajetórias complexas, e oferece maior confiabilidade em rodovias equipadas com marcadores. Contudo, requer processamento computacional avançado e enfrenta limitações em ambientes urbanos densos ou com interferências visuais [7].

Nos Projetos *PATH* e o *SARTRE*, esses controles permitiram a operação coordenada de veículos em pistas de alta densidade, enquanto em cenários urbanos a integração entre controle longitudinal e lateral garantiu fluidez e precisão em trajetórias mais desafiadoras.

E. Controle centralizado vs. distribuído

O controle em redes de pelotão pode ser abordado de forma centralizada ou distribuída, dependendo da organização e do modelo de comunicação entre os veículos. No modelo centralizado, um único controlador central toma as decisões para o conjunto de veículos, o que permite um controle mais eficiente e coordenado. Este tipo de abordagem tem como vantagem a capacidade de otimizar a movimentação do pelotão de forma global, garantindo que todos os veículos sigam

a mesma estratégia de controle com base em informações compartilhadas. Além disso, um controlador centralizado pode processar dados de forma mais robusta, o que ajuda a lidar com situações de risco de forma mais precisa. Contudo, a desvantagem deste modelo é que ele depende de uma comunicação constante e confiável entre os veículos e o controlador central, o que pode ser um ponto crítico em ambientes de tráfego intenso ou quando a comunicação entre os veículos é instável. Se ocorrerem falhas de comunicação ou de rede, a coordenação pode ser comprometida, impactando a segurança e o desempenho do pelotão [4], [7].

Por outro lado, o modelo distribuído envolve a colaboração entre os veículos para tomar decisões localmente, baseadas em informações compartilhadas dentro do pelotão. Cada veículo pode, por exemplo, ajustar sua posição ou velocidade com base em dados recebidos de seus vizinhos mais próximos, sem depender de um controlador central. Uma das principais vantagens do controle distribuído é a resiliência e a flexibilidade. Como as decisões são tomadas localmente, a falha de um único veículo ou de uma parte da rede de comunicação não afeta todo o pelotão. Além disso, esse modelo pode ser mais adequado para pelotões em movimento dinâmico, já que cada veículo pode reagir rapidamente a mudanças nas condições locais de tráfego ou comportamento dos veículos à frente ou atrás. No entanto, a desvantagem principal é que o controle distribuído pode ser menos eficiente em termos de otimização global, já que as decisões tomadas de forma independente não levam em consideração o conjunto completo de dados disponíveis [4], [7].

Em aplicações práticas, o controle centralizado é geralmente mais adequado para cenários em que o pelotão precisa seguir um plano de movimento coordenado e otimizado, como em estradas de alta capacidade e sistemas de transporte em áreas urbanas. Já o controle distribuído pode ser vantajoso em cenários mais dinâmicos, em que os veículos precisam se adaptar rapidamente a mudanças no ambiente de tráfego, como em rodovias com condições variadas. A escolha entre os modelos de controle centralizado e distribuído depende fortemente do contexto específico do pelotão e das condições de operação.

IV. ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES

Nesta seção, serão apresentadas soluções propostas em diversos trabalhos, comparando aspectos como eficiência no uso de recursos, estabilidade do sistema e facilidade de integração com veículos comerciais. Por fim, a seção apresenta em mais detalhes os Projetos *SARTRE* e *PATH*.

A. Cruise Control Adaptativo em Situações Reais de Trânsito

O trabalho de Milanés et. al em [7] apresenta uma solução inovadora baseada em CACC, voltada para melhorar a segurança, a eficiência e a estabilidade no tráfego, especialmente em cenários envolvendo veículos conectados. A proposta se destaca por abordar questões críticas relacionadas ao controle cooperativo, como a manutenção de uma separação segura e constante entre veículos em movimento e a resposta

eficiente a condições dinâmicas, como aceleração e frenagem simultâneas. A solução combina controladores PID otimizados com comunicação veicular via protocolo DSRC (*Dedicated Short-Range Communication - Comunicação Dedicada de Curto Alcance*), permitindo interações rápidas e precisas entre os veículos participantes.

A abordagem adotada neste estudo foi comparada a sistemas convencionais de controle de cruzeiro e controle cooperativo tradicional (ACC). Para validar a proposta, foram conduzidos experimentos com dois veículos (um líder e um seguidor) conectados, simulando cenários reais de tráfego. Os veículos compartilharam dados de posição e velocidade, enquanto o controlador PID ajustava dinamicamente o comportamento dos veículos seguidores para reduzir oscilações e garantir a separação desejada.

O primeiro ensaio utiliza um veículo como líder e outro executando o controle CACC com o objetivo de manter a distância entre eles constante. Os Gráficos superior, central e inferior da Figura 4 ilustram, respectivamente, a velocidade e aceleração de ambos os veículos, e a distância entre eles em segundos. Nos instantes em que há mudança no *gap* entre os veículos, é notório a mudança no comportamento do seguidor, com variações de aceleração e velocidade que o aproximam ou afastam do líder, dependendo do degrau de referência.

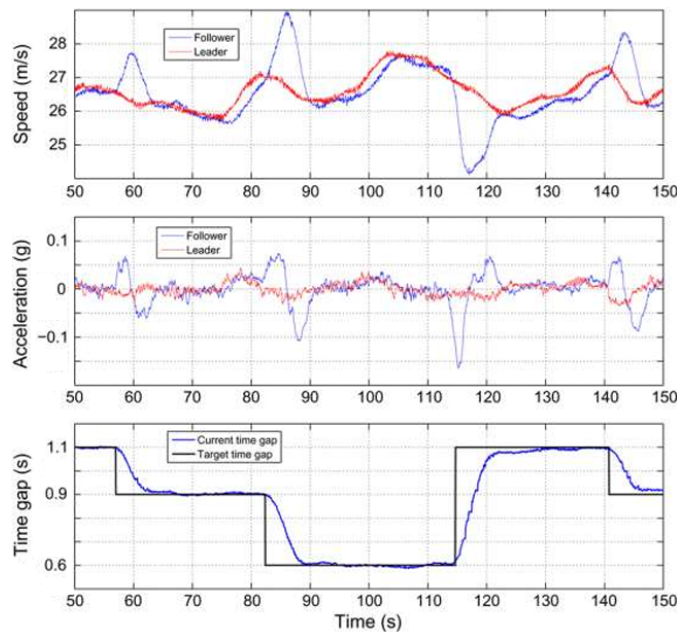


Figura 4. Ensaio de distância constante entre dois veículos com controle CACC e PID adaptativo [7].

O segundo ensaio simula os contextos das manobras *cut-in* e *cut-out*, que referem-se a situações específicas de mudança de faixa no trânsito. *Cut-in* ocorre quando um veículo externo entra abruptamente na faixa de tráfego ocupada pelos veículos conectados, posicionando-se à frente de um veículo seguidor ou do líder. No caso destas manobras, o sistema precisa reestabelecer o espaçamento adequado sem criar flutuações ou oscilações desnecessárias. Já a manobra de *cut-out* ocorre

quando um veículo do comboio conectado sai abruptamente da faixa de tráfego, deixando um espaço vazio no fluxo controlado. Em manobras *cut-out*, o sistema deve reagir rapidamente para desacelerar o veículo seguidor, garantindo que a nova distância de segurança seja respeitada. No Gráfico da Figura 5, quando ocorre a manobra de *cut-in*, a velocidade do veículo seguidor é reduzida e a aceleração é controlada até que o *gap* de interesse seja atingido. No caso da manobra *cut-out*, a velocidade do líder é reduzida, até que o veículo seguidor o alcance.

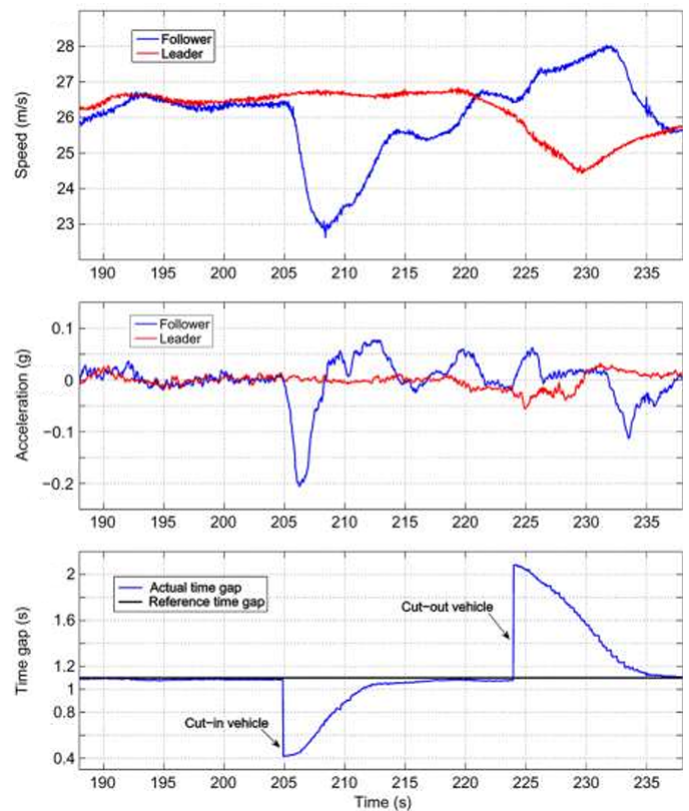


Figura 5. Ensaio de manobras *cut-in* e *cut-out* entre dois veículos com controle CACC e PID adaptativo [7].

A solução CACC proposta representa um avanço significativo em relação a sistemas de controle tradicionais e ao controle cooperativo convencional. Suas principais vantagens, citadas na Tabela I, incluem maior eficiência energética, melhor estabilidade do fluxo de tráfego e alta compatibilidade com veículos comerciais. Apesar disso, a implementação enfrenta desafios relacionados ao custo inicial e à dependência de infraestrutura de comunicação confiável.

B. O Impacto do Controle de Cruzeiro Adaptativo Cooperativo nas Características do Fluxo de Tráfego

O trabalho de Arem em [2] analisa o impacto de sistemas avançados de direção autônoma (ADA) e CACC no tráfego rodoviário, propondo o modelo de simulação MIXIC como ferramenta para avaliação de cenários envolvendo veículos convencionais e automatizados. O MIXIC integra comportamentos lateral e longitudinal e simula interações entre

Tabela I
COMPARAÇÃO DA PROPOSTA EM [7] COM MÉTODOS TRADICIONAIS.

	Controle Convencional	ACC Tradicional	Proposta CACC
Eficiência de recursos	Médio	Médio	Alto 15% ↓
Estabilidade no sistema	Baixa	Média	Alta 40% ↓ oscilações
Facilidade de integração	Alta	Média	Alta

veículos, permitindo análise detalhada de situações de tráfego mistas. A metodologia baseia na aplicação do MIXIC em diferentes configurações de trânsito, variando a densidade de veículos e o nível de automação. O modelo considera forças de aceleração, desaceleração e comportamento humano no controle de veículos convencionais, enquanto o comportamento de veículos automatizados é governado por algoritmos de CACC. Simulações focaram em dois aspectos principais: a estabilidade do sistema diante de variações de velocidade e a eficiência energética proporcionada pelo CACC.

O modelo CACC adotado denota uma velocidade resultante através de uma aceleração de referência e tem parâmetros K_d , K_v e K_a configuráveis que influenciam a velocidade relativa que um veículo equipado com CACC se aproxima de outro mais lento. A parametrização proposta foi feita com $K_d = 0.1$, $K_v = 0.58$ e $K_a = 1.0$, resultando em uma configuração mais suave e rápida do controlador sem levar a situações inseguras em comparação com outros conjuntos de valores. Os testes consideram um pelotão com 5 veículos, sendo um líder e quatro seguidores. O líder mantém uma velocidade de 80 [km/h]. Os Gráficos da Figura 6 mostram o comportamento da velocidade dos seguidores nas situações de controle manual e por CACC, respectivamente.

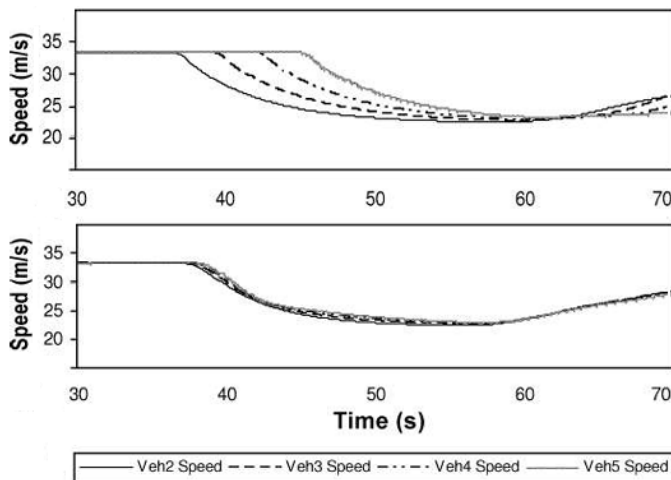


Figura 6. Ensaios para aplicação MIXIC em modelos CACC [2].

Os veículos equipados com CACC que se aproximam reagem mais rapidamente no antecessor em desaceleração do que no cenário em que todos os veículos são conduzidos manualmente. As linhas nos diagramas do pelotão equipado com

CACC ficam próximas, o que indica que o tempo entre uma ação de aceleração ou desaceleração do antecessor e a mesma ação do sucessor é menor do que no cenário de veículos conduzidos manualmente. As curvas do pelotão equipado com CACC são mais suaves. Assim, os resultados mostraram que o uso do CACC melhora significativamente a estabilidade do tráfego, reduzindo flutuações de velocidade e mantendo distâncias seguras entre veículos, sendo capazes de se recuperar mais rapidamente de situações de desaceleração súbita e minimizar perturbações no fluxo de tráfego. No entanto, a dependência do modelo para os parâmetros K_d , K_v e K_a pode comprometer sua aplicabilidade em diferentes contextos rodoviários sem adaptações significativas. A comparação entre as soluções analisadas destaca o CACC como uma abordagem eficiente no uso de recursos e altamente estável, embora a integração com veículos comerciais dependa da infraestrutura de comunicação e da compatibilidade tecnológica.

C. Projeto PATH

O Projeto PATH é uma das iniciativas mais abrangentes no campo da automação veicular e transporte inteligente, destacando-se por sua abordagem no transporte rodoviário [16]. O PATH tem como objetivo central integrar veículos automatizados com infraestrutura inteligente para criar sistemas de transporte mais eficientes, seguros e sustentáveis, buscando abordar questões como congestionamento, acidentes de trânsito e impactos ambientais causados pelo transporte rodoviário.

O projeto utiliza pelotões automatizados como solução principal, nos quais um conjunto de veículos opera de forma coordenada e com espaçamentos reduzidos, seguindo um veículo líder. Essa configuração permite otimizar o uso das rodovias, aumentando significativamente a capacidade de tráfego. A base técnica do projeto inclui sensores avançados embarcados nos veículos, como radares, câmeras e sistemas de proximidade, aliados a tecnologias de comunicação V2V e V2I. A infraestrutura rodoviária também é equipada com sensores fixos, incluindo detectores magnéticos e sistemas de monitoramento em tempo real, que fornecem dados cruciais para a coordenação do fluxo veicular. As Figuras 7 e 8 mostram o processamento de imagens realizado pelo algoritmo para guiar os veículos com as informações coletadas.

Os experimentos práticos realizados no âmbito do PATH demonstram que os veículos podem operar em velocidades de até 100 [km/h], mantendo espaçamentos inferiores a dois metros entre si, sem comprometer a segurança. A automação permite uma operação suave, com resposta coordenada a eventos críticos, como frenagens repentinas ou mudanças de densidade no tráfego. Além disso, o modelo reduz substancialmente o consumo de combustível, em virtude da redução do arrasto aerodinâmico proporcionada pela formação dos pelotões. Estudos também indicam que a automação elimina erros humanos comuns, como reações tardias e decisões imprudentes, contribuindo para a redução de acidentes.

Apesar dos avanços técnicos e das demonstrações bem-sucedidas, o projeto enfrenta desafios relacionados à sua



Figura 7. Visão da câmera dos veículos [16].



Figura 8. Processamento dos dados de imagem bruta obtidos. [16].

Tabela II
COMPARAÇÃO DO *PATH* COM OUTROS MODELOS DE PELOTÃO.

	PATH	Outros
Tecnologia utilizada	Comunicação V2V Infraestrutura adaptada	Sensores locais
Estabilidade do sistema	Alta Infraestrutura dedicada	Condições externas
Implementação	Custos elevados Infraestrutura avançada	Custos Menores Menos robusto

implementação em larga escala. A principal limitação está no alto custo associado à instalação e manutenção de infraestrutura rodoviária avançada.

D. Projeto SARTRE

O projeto *SARTRE* explorou a viabilidade técnica e operacional de “trens de estrada” compostos por veículos au-

tomatizados [15]. O conceito visa desenvolver estratégias e tecnologias para permitir que pelotões de veículos operem em vias públicas normais, trazendo benefícios ambientais, de segurança e conforto. A proposta consiste em um grupo de veículos dirigindo juntos, sendo um veículo líder conduzido manualmente e os veículos seguintes operados de forma totalmente automatizada, com pequenos espaçamentos longitudinais. O sistema desenvolvido inclui um demonstrador composto por cinco veículos: um caminhão líder, um caminhão seguidor e três carros seguidores.

A comunicação entre os veículos é realizada por um sistema V2V, permitindo o intercâmbio em tempo real de informações, como aceleração, frenagem e mudanças de faixa. Essa conectividade é essencial para garantir a sincronização do comboio e possibilitar respostas rápidas a eventos na estrada, como obstáculos ou desaceleração do veículo líder. Testes práticos foram realizados em rodovias europeias, envolvendo veículos reais equipados com sensores, câmeras e radares. Esses dispositivos permitiram monitorar a posição e o comportamento dos veículos no comboio, enquanto algoritmos de controle ajustavam automaticamente velocidade, direção e espaçamento. Os experimentos demonstraram benefícios descritos na Tabela III.

Tabela III
COMPARAÇÃO DO PROJETO *SARTRE* COM MÉTODOS TRADICIONAIS.

	Projeto SARTRE	CACC	Platooning MIXIC
Eficiência de recursos	Alta ↓ combustível	Média Cenário controle	Alta ↓ combustível
Estabilidade no sistema	Boa V2V robusta	Boa Sensível a falhas	Alta ↑ estabilidade
Facilidade de integração	Alta	Alta ↑ compatibilidade	Média Cenários virtuais

Embora promissor, o projeto enfrentou desafios. A comunicação V2V dependia de sistemas confiáveis e de alta velocidade, vulneráveis a falhas técnicas ou interferências externa. Ainda assim, o *SARTRE* se consolidou por não exigir mudanças significativas na infraestrutura viária existente, o que o torna uma solução viável para implementação em curto prazo, especialmente em corredores de transporte ou frotas comerciais.

V. CONCLUSÃO

As soluções apresentadas nesta visão confirmam que os objetivos estabelecidos foram alcançados, com as tecnologias desenvolvidas mostrando eficácia na solução de problemas críticos em sistemas de transporte. Testes realizados demonstram um impacto positivo significativo na eficiência e segurança das rodovias, além de evidenciar a viabilidade de implementação em larga escala. No entanto, é ressaltada a necessidade de mais estudos para consolidar as aplicações em ambientes reais, garantindo a robustez e a confiabilidade das soluções propostas. Futuras implementações podem integrar essas tecnologias a infraestruturas rodoviárias inteligentes, equipadas com sensores e sistemas de monitoramento, que complementem a automação veicular com dados em tempo real sobre condições da via e fluxo de tráfego. Além disso, o

desenvolvimento de padrões globais para comunicação entre veículos e entre veículos e infraestrutura pode acelerar a adoção e garantir interoperabilidade em diferentes contextos.

Projetos de redes de pelotão têm uma visão de futuro voltada para a transformação do transporte, em que rodovias se tornam espaços altamente otimizados, com veículos automatizados operando em sincronia para maximizar o uso da infraestrutura e minimizar impactos ambientais. Esses sistemas prometem reduzir drasticamente acidentes, aumentar a capacidade de tráfego sem necessidade de expansão física das vias e oferecer maior conforto e produtividade aos motoristas, que poderiam dedicar seu tempo a outras atividades durante as viagens. A convergência dessas inovações com a eletrificação de veículos e o uso de fontes de energia renovável também projeta um futuro mais sustentável para a mobilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] “Segurança no trânsito - OPAS/OMS | Organização Pan-Americana da Saúde,” <https://www.paho.org/pt/topicos/seguranca-no-transito>.
- [2] B. van Arem, C. J. G. van Driel, and R. Visser, “The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 429–436, Dec. 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2006.884615>.
- [3] ONTL e INFRA S.A., “Perfil da Acidentalidade do Modo Rodoviário no Brasil”, julho de 2023. Acesso em: 25 de novembro de 2024. Psicol. Disponível: https://ontl.infra.gov.br/publicacoes/boletins-de-logistica/#flipbook-df_57377/38/
- [4] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, “The Flatbed Platoon Towing Model for Safe and Dense Platooning on Highways,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 7, no. 1, pp. 58–68, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/its.2014.2328670>.
- [5] F. Michaud, P. Lepage, P. Frenette, D. Létourneau, and N. Gaubert, “Coordinated Maneuvering of Automated Vehicles in Platoons,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 437–447, Dec. 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2006.883939>.
- [6] S. Santini, A. Salvi, A. S. Valente, A. Pescapè, M. Segata, and R. L. Cigno, “Platooning Maneuvers in Vehicular Networks: A Distributed and Consensus-Based Approach,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 4, no. 1, pp. 59–72, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/tiv.2018.2886677>.
- [7] V. Milanés, S. E. Shladover, J. Spring, C. Nowakowski, H. Kawazoe, and M. Nakamura, “Cooperative Adaptive Cruise Control in Real Traffic Situations,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 296–305, Feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2278494>.
- [8] T. Willke, P. Tientrakool, and N. Maxemchuk, “A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 2, pp. 3–20, 2009, doi: <https://doi.org/10.1109/surv.2009.090202>.
- [9] N. Hasan et al., “Vehicle Sensing and Localization in Vehicular Networks”, *International Journal of Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 641–653, May 2024.
- [10] H. (Harrison) Jeong, Y. (Chris) Shen, J. (Paul) Jeong, and T. (Tom) Oh, “A comprehensive survey on vehicular networking for safe and efficient driving in smart transportation: A focus on systems, protocols, and applications,” *Vehicular Communications*, vol. 31, p. 100349, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100349>.
- [11] K. Lim and K. M. Tuladhar, “LIDAR: Lidar Information based Dynamic V2V Authentication for Roadside Infrastructure-less Vehicular Networks,” *IEEE Xplore*, Jan. 01, 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8651684> (accessed May 24, 2020).
- [12] F. Viadero-Monasterio, L. Alonso-Rentería, J. Pérez-Oria, and F. Viadero-Rueda, “Radar-Based Pedestrian and Vehicle Detection and Identification for Driving Assistance,” *Vehicles*, vol. 6, no. 3, pp. 1185–1199, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/vehicles6030056>.
- [13] D. Bevilacqua et al., “Lane Change and Merge Maneuvers for Connected and Automated Vehicles: A Survey,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 105–120, Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/tiv.2015.2503342>.
- [14] T. J. Zellmer, P. T. Freeman, J. R. Wagner, K. E. Alexander and P. Pidgeon, “A mobile tailgating detection system for law enforcement surveillance”, *Proc. ASME Dyn. Syst. Control Conf.*, pp. 1-10, 2014.
- [15] “CORDIS — European Commission,” *Europa.eu*, 2023. <https://cordis.europa.eu/project/id/233683/reporting>
- [16] “California PATH, Partners for Advanced Transit and Highways”, *University of California, Berkeley, Richmond, CA, EUA*. <http://www.path.berkeley.edu>