

CENTRO UNIVERSITÁRIO
PAULO EDUARDO DAL BON TONETTO

**COORDENAÇÃO ÓTIMA DE COMBOIOS BASEADA EM SISTEMA
DE SUGESTÃO DE PERFIL CINEMÁTICO**

São Bernardo do Campo

2022

PAULO EDUARDO DAL BON TONETO

**COORDENAÇÃO ÓTIMA DE COMBOIOS BASEADA EM SISTEMA
DE SUGESTÃO DE PERFIL CINEMÁTICO**

Dissertação de Mestrado, apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Orientado pelo Prof. Dr. Fabrizio Leonardi.

São Bernardo do Campo

2022

Dal Bon Tonetto, Paulo Eduardo.

Coordenação Ótima de Comboios Baseada em Sistema de Sugestão de Perfil Cinemático / Paulo Eduardo Dal Bon Tonetto. São Bernardo do Campo, 2023.

75 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Fabrizio Leonardi.

1. Controle ótimo. 2. Comboio de caminhões. 3. Consumo de combustível. 4. Perfil de velocidade. I. Leonardi, Fabrizio, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Aluno(a): Paulo Eduardo Dal Bon Tonetto

Matrícula: 221106-8

Título do Trabalho: Coordenação ótima de comboios baseada em sistema de sugestão de perfil cinemático

Área de Concentração: Sistemas Mecânicos

Orientador(a): Prof. Dr. Fabrizio Leonardi

Data da realização da defesa: 22/12/2022

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

Os membros da banca entendem que o trabalho trata de questões relevantes, está inserido em uma das linhas de pesquisas em consolidação do programa de pós-graduação, apresenta resultados interessantes e permite a continuidade da pesquisa.

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabrizio Leonardi

Prof. Dr. André de Souza Mendes

Prof. Dr. Bruno Augusto Angélico

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Dedico este trabalho à minha
esposa Natália, por todo incentivo,
paciência, companheirismo e
compreensão.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Ana e Roberto, por todo o esforço para que eu chegasse até aqui.
Meus irmãos Lucas e Tiago, por serem exemplo para mim.

A minha esposa Natália, que ao longo destes 17 anos foi a minha grande incentivadora.

Aos meus amigos, em especial Sylvio e Rodrigo, pela paciência que tiveram comigo nesta tarefa.

A FEI, por tornar tudo isto possível graças a uma bolsa de estudos.

Ao meu orientador, professor Fabrizio Leonardi, por toda ajuda. E ao professor André de Souza pelas sugestões e contribuições no trabalho.

“A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu tamanho
original”

Oliver Wendell Holmes Sr.

RESUMO

Órgãos internacionais como *United States Environmental Protection Agency* (EPA) e *European Environment Agency* (EEA) relatam que há tendência de crescimento das emissões dos veículos pesados para os próximos anos. Uma das possíveis explicações para isto é o fato de existir uma projeção indicando que a demanda pelo frete de carga continuará crescendo no mundo inteiro. A busca por novas tecnologias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa no segmento de transporte, especialmente para os veículos pesados, torna-se necessária, e a dificuldade para expandir a malha rodoviária faz buscar novas estratégias para otimizar o sistema atual visando uma melhora na eficiência energética. Para atingir tal meta, diversas frentes de estudo estão sendo exploradas. A estratégia do comboio de caminhões, na qual os veículos trafegam com pequenas distâncias entre si promovendo uma economia de combustível, vem mostrando que é uma opção viável na prática, reduzindo o consumo, os custos operacionais e a emissão de gases poluentes, sendo que o método de otimização do perfil de velocidade de forma colaborativa pode auxiliar ainda mais na economia. No presente trabalho os efeitos da inclusão de veículos que não dispõem da tecnologia necessária para a formação de comboio de forma autônoma serão estudados. Na formação, um veículo não autônomo recebe sugestões de velocidades que são calculadas através de uma estratégia de controle ótimo. Foi possível concluir que em média para o perfil ótimo de velocidade os veículos seguidores são 26,9% mais econômicos que um veículo trafegando sozinho utilizando somente a estratégia de controle de cruzeiro. Os veículos seguidores utilizando a estratégia de sugestão apresentam a mesma diferença percentual (26,9%). Portanto a inclusão de veículos HDV na formação do comboio se mostrou eficiente na economia, sendo que o consumo dos seguidores não é afetado e o do líder pouco se altera comparado com a estratégia de controle de cruzeiro.

Palavras-chave: Controle ótimo. Comboio de caminhões. Consumo de combustível. Perfil de velocidade.

ABSTRACT

International Agencies like United States Environmental Protection Agency (EPA) and European Environment Agency (EEA) shown a growing trend of heavy duty vehicles emissions for the next years. One of the possible explanations for this is the fact that there is a projection indicating that the demand for goods transportation will continue to grow worldwide. Looking for new technologies to reduce greenhouse gas emissions in the transport segment, especially for heavy duty vehicles, becomes necessary, and the difficulty in expanding the road network makes the search for new strategies to optimize the current system aimed at improving in energy efficiency. To achieve this goal, several research fronts are being explored. The truck platoon strategy, in which vehicles travel with small distances between each other, promoting fuel economy, has shown that it is a viable option in practice, reducing fuel consumption, operating costs and the emission of polluting gases, and the method of optimizing the speed profile in a collaborative way can help even more in the economy. In the present work, the effects of including vehicles that do not have the necessary technology for autonomous convoy formation will be studied. In formation, a non-autonomous vehicle receives speed suggestions that are calculated through an optimal control strategy. It was possible to conclude that on average for the optimal speed profile, following vehicles are 26.9% more economical than a vehicle traveling alone using only the cruise control strategy. The follower vehicles using the suggestion strategy show the same percentage difference (26.9%). Therefore, the inclusion of HDV vehicles in the formation of the convoy proved to be efficient in terms of economy, with the consumption of the followers not being affected and the leader changing little compared to the cruise control strategy.

Keywords: Optimal control. Platoon of trucks. Fuel consumption. Speed Profile.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Emissões de gases de efeito estufa do Brasil de 1990 a 2019.....	15
Figura 2 - Participação dos setores no perfil das emissões brasileiras	16
Figura 3 - Série histórica (1970-2019) de emissões de CO ₂ equivalente (t) por atividades do setor de energia	17
Figura 4 - Comboio projeto <i>Energy ITS</i>	18
Figura 5 - Demonstração de oito veículos em comboio (PATH program)	21
Figura 6 - Tela onde as velocidades sugeridas são mostradas	25
Figura 7 - Esquema de planejamento de velocidade baseado na probabilidade de verde em dois semáforos consecutivos.....	27
Figura 8 - Forças Atuantes sobre o veículo.....	32
Figura 9 - Fator de redução de arrasto	34
Figura 10 - Configuração do experimento realizado na UNCC	35
Figura 11 - Dados de velocidade atual e ajustada para alguns comandos de velocidade sugerida	36
Figura 12 - Freightliner/FLD120	38
Figura 13 - Perfil de elevação e inclinação do trajeto 3	39
Figura 14 - Perfil de elevação e inclinação do trajeto 4.....	40
Figura 15 - Variáveis relevo analisadas	47
Figura 16 - Resultado cenário A – Trajetória 01	49
Figura 17 - Resultado cenário A – Trajetória 02	49
Figura 18 - Resultado cenário A – Trajetória 03	50
Figura 19 - Resultado cenário A – Trajetória 04	50
Figura 20 - Resultado cenário B – Trajetória 01	51
Figura 21 - Resultado cenário B – Trajetória 02	52
Figura 22 - Resultado cenário B – Trajetória 03	52
Figura 23 - Resultado cenário B – Trajetória 04	53
Figura 24 - Resultado cenário C – Trajetória 01 – Dois veículos	54
Figura 25 - Resultado cenário C – Trajetória 02 – Dois veículos	54
Figura 26 - Resultado cenário C – Trajetória 03 – Dois veículos	55
Figura 27 - Resultado cenário C – Trajetória 04 – Dois veículos	55
Figura 28 - Resultado cenário C – Trajetória 01 – Quatro veículos.....	56
Figura 29 - Resultado cenário C – Trajetória 02 – Quatro veículos.....	56

Figura 30 - Resultado cenário C – Trajetória 03 – Quatro veículos.....	57
Figura 31 - Resultado cenário C – Trajetória 04 – Quatro veículos.....	57
Figura 32 - Perfil de potência – Trajetória 01, 03 e 04 – Veículos líder.....	58
Figura 33 - Análise sensibilidade – Trajetória 01 – Velocidade	62
Figura 34 - Análise Sensibilidade – Trajetória 01 – Consumo	62
Figura 35 - Análise sensibilidade – Trajetória 01 – Distância inter-veicular.....	63
Figura 36 - Análise sensibilidade – Trajetória 02 – Velocidade	64
Figura 37 - Análise sensibilidade – Trajetória 02 – Consumo	64
Figura 38 - Análise sensibilidade – Trajetória 02 – Distância inter-veicular.....	65
Figura 39 - Análise sensibilidade – Trajetória 03 – Líder.....	66
Figura 40 - Análise sensibilidade – Trajetória 03 – Seguidor	66
Figura 41 - Análise sensibilidade – Trajetória 04 – Líder.....	67
Figura 42 - Análise sensibilidade – Trajetória 04 – Seguidor	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cenário da introdução dos veículos em comboio	21
Tabela 2 - Parâmetros modelo de dinâmica longitudinal.....	34
Tabela 3 - Parâmetros modelo de consumo.....	38
Tabela 4 - Parâmetros trajetos fictícios.....	40
Tabela 5 - Parâmetros análise de sensibilidade	46
Tabela 6 - Consumo em litro cenário A.....	59
Tabela 7 - Consumo em litro cenário B	60
Tabela 8 - Consumo em litro cenário C	60
Tabela 9 - Diferença média percentual do consumo (Líder).....	70
Tabela 10 - Diferença média percentual do consumo (Seguidores)	70

LISTA DE ABREVIATURAS

EPA	United States Environmental Protection Agency
EEA	European Environment Agency
PIB	Produto Interno Bruto
SEEG	Sistema de Estimativas e Remoções de Gases de Efeito Estufa
GEE	Gases de efeito estufa
LAC	Look-ahead cruise control
CALTRANS	California Department of Transportation
PATH	The California Partners for Advanced Transportation Technology
SARTRE	Safe Road Trains for the Environment
COMPAION	Cooperative Dynamic Formation of Platoons for Safe and Energy-optimized Goods Transportation
CC	Controle de cruzeiro (cruise control)
ACC	Controle de cruzeiro adaptativo (adaptative cruise control)
GPS	Sistema de posicionamento global
CACC	Controle de cruzeiro adaptativo e colaborativo (cooperative adaptative cruise control)
CAV	Connected and automated vehicle
HDV	Human-driven vehicle
V2V	Comunicação veículo para veículo (Vehicle to Vehicle)
V2I	Comunicação veículo com infraestrutura (Vehicle to infrastructure)
UNCC	University of North Carolina Charlotte
IIT	Illinois Institute of Technology
EDO	Equações diferenciais ordinárias
VT-CPFM	Virginia Tech Comprehensive Power-based Fuel Model
CTB	Código de Trânsito Brasileiro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1 COMBOIO	19
2.2 ECO-DRIVING	23
2.3 MARCHA LENTA EM SEMÁFORO	26
2.4 VEÍCULOS HETEROGÊNEO (CAV E HDV)	27
2.5 CONCEITO DE COMUNICAÇÃO V2V E V2I	28
3 OBJETIVO.....	30
4 METODOLOGIA	31
4.1 MODELO DA DINÂMICA LONGITUDINAL	31
4.2 MODELO DE VELOCIDADE FUTURA PARA HDV	35
4.3 MODELO DE CONSUMO.....	37
4.4 TOPOGRAFIA	38
4.5 CONTROLE ÓTIMO	40
4.6 CENÁRIOS ESTUDADOS	41
4.6.1 Cenário A.....	43
4.6.2 Cenário B.....	44
4.6.3 Cenário C.....	45
4.7 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1 RESULTADOS CENÁRIO A.....	48
5.2 RESULTADOS CENÁRIO B.....	51
5.3 RESULTADOS CENÁRIO C	53
5.4 DISCUSSÕES	58
6 CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

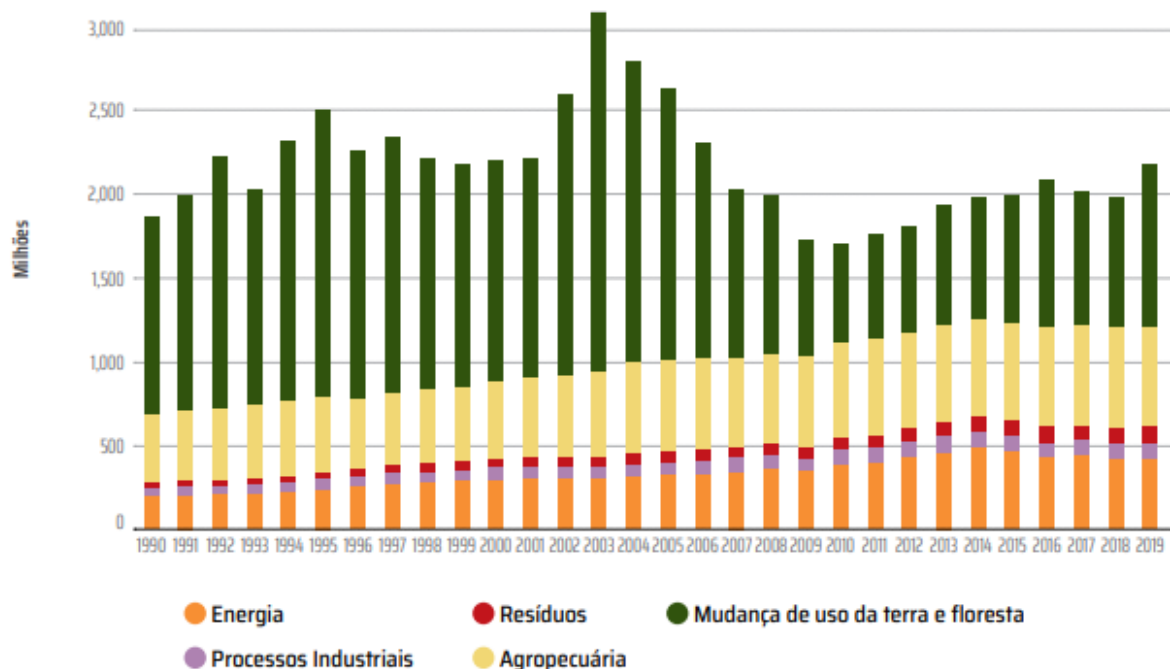
Como a população global continua a crescer e as projeções para a economia são de expansão, a demanda por transporte de bens tende a aumentar nas próximas décadas. De acordo com o Fórum Internacional de Transportes (2013) a previsão para o aumento dos transportes terrestres de mercadorias (rodoviário e ferroviário) é entre 40 e 125% até 2050 comparado com o ano de 2010. Para países em desenvolvimento um aumento de mais de 400% é previsto (ALAM, et al. 2014).

No Brasil, o transporte rodoviário movimenta 62,6% do total de cargas e, segundo Oliveira (2019), em 2014 este modal consumiu 32,5% do total de energia demandada no país. Segundo Fleury (2003), a participação deste setor no Produto Interno Bruto (PIB) cresceu de 3,7% para 4,3% entre 1985 e 1999 e entre 1970 e 2000 o setor cresceu 400%, enquanto o PIB cresceu 250%.

Com esta demanda global por transportes, alguns aspectos ambientais se tornam muito relevantes. Segundo a divulgação da International Energy Agency (2015), este setor emite sozinho 46% do total de CO₂ na atmosfera pela queima de combustíveis. Para alguns países, a redução deste tipo de emissão se tornou muito importante. A União Europeia, adicionalmente à assinatura do protocolo de Kyoto, estipulou metas ambiciosas para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Até 2050, espera-se reduzir as emissões entre 80 e 90% em comparação com os níveis de 1990 e, para que isso seja possível, seria necessário reduzir em pelo menos 60% as emissões do setor de transportes (ALAM, et al. 2014).

De acordo com o Sistema de Estimativas e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), no Brasil, houve um aumento de 11% nas emissões brutas de gases de efeito estufa (GEE) entre 1990 e 2018. Apenas em 2019, o aumento das emissões brutas de gases de efeito estufa foi de 9,6%, onde o país lançou na atmosfera 2,17 bilhões de toneladas de dióxido de carbono, contra 1,98 bilhão em 2018. Estes dados podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 - Emissões de gases de efeito estufa do Brasil de 1990 a 2019

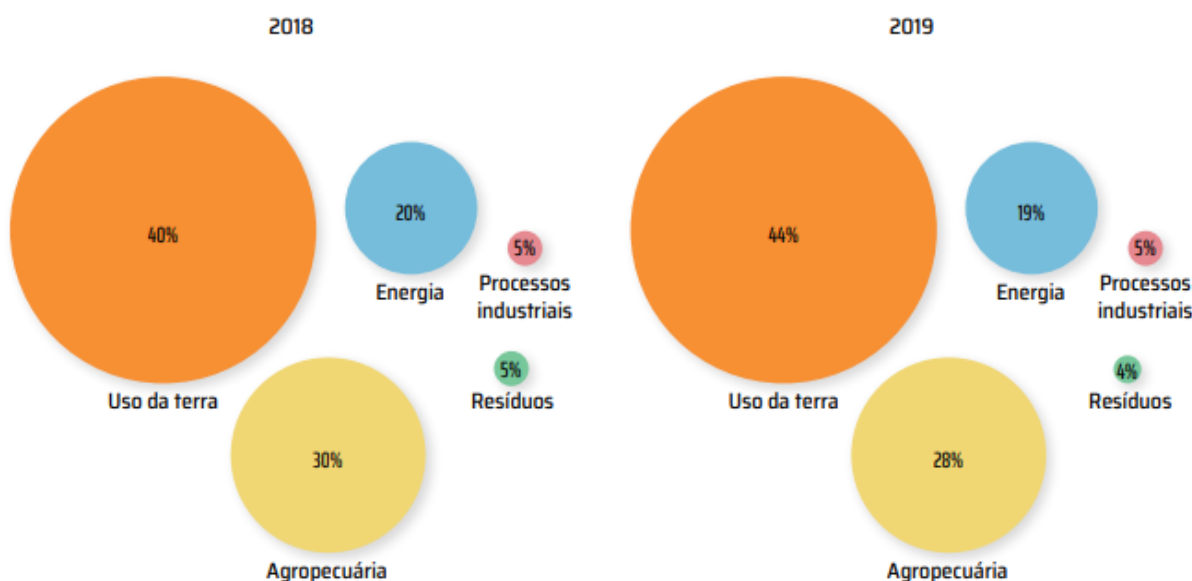


Fonte: Observatório do Clima, 2020

O dado apresentado pelo SEEG, consolida uma franca reversão da tendência de redução das emissões no Brasil verificada entre 2004 e 2010. Fazendo uma análise dos dados do SEEG, podemos ver que o desmatamento puxou o crescimento das emissões no último ano, onde esta atividade segue sendo a principal responsável por emissões no Brasil com 44% do total. A agropecuária vem em segundo lugar com 598,7 milhões de toneladas de CO₂ e, em 2019, um aumento de 1,1% em relação às 592,3 milhões de toneladas emitidas em 2018. Conclui-se que a atividade rural contribuiu com 72% das emissões do Brasil no ano passado.

Na Figura 2, podemos ver a participação de cada setor nas emissões brasileiras. O setor de energia respondeu por 19 % nas emissões de 2019 com um aumento discreto de 1,1 % em relação ao ano de 2018. Isto ocorreu pelo aumento do consumo de energia elétrica, o que resultou no acionamento das usinas termoeletricas e um aumento no consumo de diesel pela recuperação do setor de transportes de carga, principal consumidor de combustíveis fósseis do país.

Figura 2 - Participação dos setores no perfil das emissões brasileiras



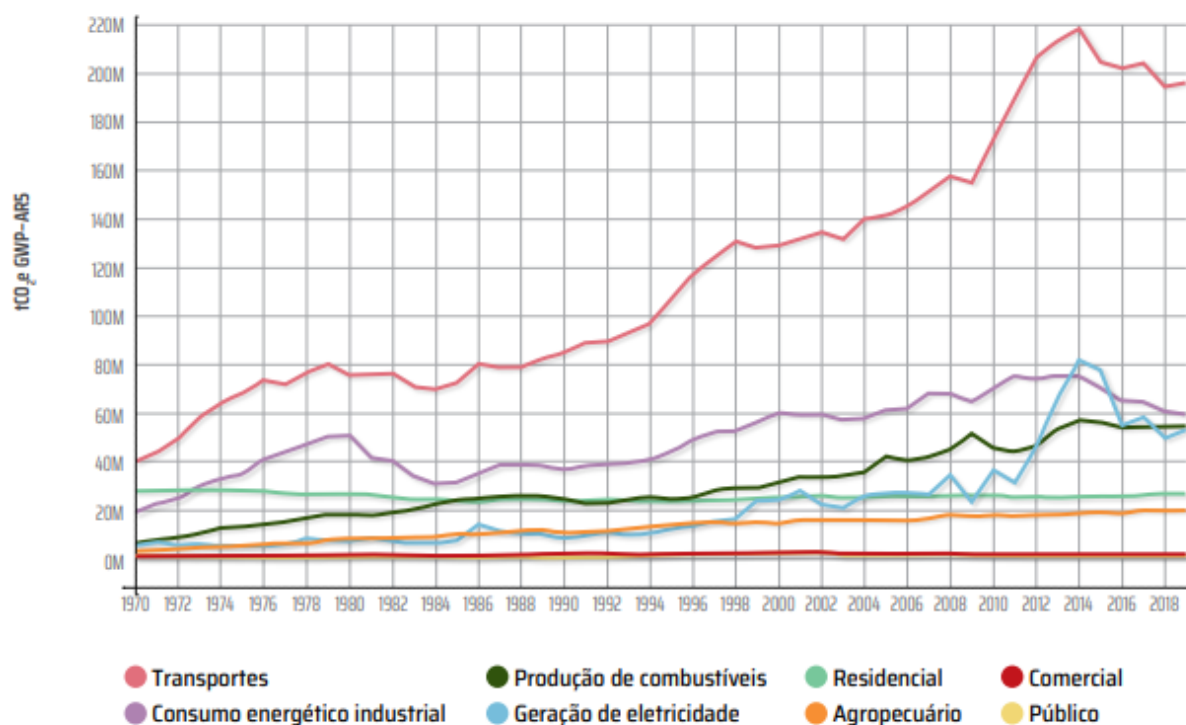
Fonte: Observatório do Clima, 2020

O setor de energia é dividido em diversas atividades como: Transporte, Consumo energético industrial, Produção de combustíveis, Geração de eletricidade, Residencial, Agropecuário, Comercial e Público. A Figura 3 mostra a evolução das emissões no setor energia dividida por atividades. Nota-se que a atividade de transporte tem a maior participação dentro do setor afastando-se consideravelmente das curvas observadas em outras atividades.

Em 2019, as emissões no setor de transportes mantiveram-se praticamente estáveis, tendo uma elevação de 1% quando comparada a 2018. Os caminhões e automóveis são as principais fontes poluidoras do setor de transportes, contribuindo com, respectivamente, 40% e 31% dos GEE emitidos nesta atividade (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2020). Este setor teve seu pico de emissão em 2014 e, a partir daí, tem apresentado níveis consideravelmente menores, o que se deve a uma desaceleração econômica no país, fazendo com que houvesse uma redução na intensidade da movimentação de cargas e consequentemente o consumo de combustíveis fósseis. É importante ressaltar o crescimento de 139% comparado com os resultados de 1990, quando foi registrada a emissão de 85,2 milhões de toneladas de GEE.

Órgãos internacionais como EPA e EEA relatam que há tendência de crescimento das emissões dos veículos pesados para próximos anos. Uma das possíveis explicações para isto é o fato de existir uma projeção indicando que a demanda pelo frete de carga continuará crescendo no mundo inteiro (LIANG; MÅRTENSSON; JOHANSSON; KARL H., 2016).

Figura 3 - Série histórica (1970-2019) de emissões de CO₂ equivalente (t) por atividades do setor de energia



Fonte: Observatório do Clima, 2020

As soluções normalmente buscadas pelas montadoras para reduzir o consumo que são: Motores mais eficientes, pneus com menores coeficientes de resistência ao rolamento, redução de peso, aerodinâmica, combustíveis alternativos, motorização híbrida ou elétrica. A combinação destes métodos tem o potencial de reduzir em até 30% o nível de emissões, portanto a busca por alternativas para a redução do consumo se justifica (ALAM, et al. 2014).

Para os veículos pesados esta redução torna-se necessária, e a dificuldade para expandir a malha rodoviária nos faz buscar novas estratégias para otimizar o sistema atual visando uma melhora na eficiência energética (TSUGAWA; JESCHKE; SHLA DOVER, 2016).

Uma recente solução proposta é a formação de comboio, onde os trabalhos sobre este tema são frutos de parcerias entre governos, indústria e o meio acadêmico (FLEURY; et al., 2017) e, de acordo com Oliveira (2019), a formação de comboios poderia contribuir com aproximadamente 7,3% de economia nos custos operacionais de um veículo seguidor. O comboio é uma estratégia na qual os veículos trafegam com pequenas distâncias entre si promovendo uma economia de combustível através da redução da força resistiva aerodinâmica e muitos experimentos mostram que a formação de comboio é

viável na prática (ALAM, et al. 2014). Um exemplo de comboio pode ser visto na Figura 4, no qual três veículos totalmente autônomos trafegam a 80 km/h com uma distância de 10 m.

Outro tópico importante é que o motorista é um fator que muitas vezes é esquecido na eficiência do veículo e a direção ecológica (*eco-driving*) é uma solução que contribui com a redução do consumo de combustível (HUANG, et al. 2018).

Esta dissertação segue a seguinte estrutura. A seção 2 apresenta a revisão da literatura, no qual a formação de comboio e a direção ecológica serão temas principais. O objetivo será detalhado na sequência. Na seção 4 os métodos são apresentados e o perfil ótimo de velocidade resultante de diversos cenários serão apresentados na seção 5. Nesta seção observa-se também a análise de sensibilidade de alguns parâmetros. Por fim a seção 6 conclui a dissertação com sugestões de trabalhos futuros.

Figura 4 - Comboio projeto *Energy ITS*



Fonte: Tsugawa, Kato e Aoki, 2011

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura deste trabalho segue a estrutura descrita a seguir. Na seção 2.1 a formação de comboio como um dos métodos para reduzir as emissões será apresentada.

Na sequência a evolução do tema ao longo da história e as tecnologias disponíveis para aplicação desta solução, assim como a estratégia de *Look-ahead cruise control* (LAC). O *eco-driving*, que são decisões que o motorista poderia fazer para reduzir o consumo, encontra-se na seção 2.2.

A seção 2.3 mostra uma das vertentes de *eco-driving*: Meios de reduzir o tempo em marcha lenta. Neste tópico foi apresentado o artigo de Baby, et al. (2022) que foi utilizado como base para o tema deste trabalho.

O tema desta pesquisa envolve a formação de comboio de veículos heterogêneos, nos quais as velocidades são sugeridas para o veículo que não dispõe da tecnologia necessária para formar o comboio de forma autônoma. As seções 2.4 e 2.5 introduzem os conceitos de comboio heterogêneo e as formas de comunicação entre veículos e entre veículo e infraestrutura, que são postos-chave no desenvolvimento da dissertação.

2.1 COMBOIO

Andar próximo ao veículo à frente requer menos esforço do trem de força, pois nota-se que o uso do pedal do acelerador é menor e o consumo de combustível diminui (ALAM, et al. 2014). Isto se dá pela redução da força resistiva aerodinâmica por conta da redução do coeficiente de arrasto. Esta formação é chamada de comboio (*platooning*), como pode ser visto na Figura 4. Trata-se de uma estratégia na qual os veículos trafegam com pequenas distâncias entre si promovendo uma economia de combustível (ALAM, et al. 2014).

O grande crescimento das rodovias da Califórnia ocorreu entre os anos de 1950 e 1970. Em meados da década de 1980 o CALTRANS (*California Department of Transportation*) percebeu que eles precisavam determinar como eles seriam capazes de atender às necessidades de transporte continuamente crescentes de um estado com uma população e economia em rápido crescimento (SHLADOVER, 2007).

Em 1986 foi fundado o “*The California Partners for Advanced Transportation Technology (PATH) program*” como o primeiro programa de pesquisas norte americano

focado em estudar o que futuramente iria se chamar de sistemas inteligentes de transporte. Neste programa, em 1997, foi mostrado seu projeto mais conhecido, um comboio formado por oito veículos de passeio, como pode ser visto na Figura 5, que utilizava uma combinação de controladores longitudinal e lateral (SHLADOVER, 2007).

Com o auxílio de um programa governamental japonês de desenvolvimento de sistemas inteligentes de transporte, chamado de *Energy ITS*, que tinha como principal objetivo a economia de energia e prevenção do aquecimento global. Foi apresentado um comboio formado por três veículos autônomos dirigidos a 80 km/h e espaçados de 10 m, no qual seu consumo foi melhorado em 14%.

Este comboio foi testado em uma pista de testes e em uma via expressa e concluiu-se que o projeto tem uma alta confiabilidade (TSUGAWA; KATO; AOKI, 2011).

Outras contribuições do programa foram: O desenvolvimento de um método de avaliação da efetividade de sistemas inteligentes de transporte (ITS) na redução das emissões de gás carbônico e um cenário futuro da introdução das tecnologias de ITS, como pode ser visto na Tabela 1, na qual a solução é dividida em três fases:

- a) No futuro próximo o comboio será formado por dois ou três caminhões, sendo que todos teriam motoristas e dividiriam a faixa de rodagem com outros veículos. A estratégia para o controle da velocidade seria o controle de cruzeiro adaptativo com o objetivo de economizar energia visando a segurança e a redução da carga de trabalho.
- b) A médio prazo a comunicação de veículo para veículo seria introduzida, possibilitando a estratégia de controle adaptativo de velocidade colaborativo. Portanto, é esperado uma economia, devido à redução do coeficiente de arrasto aerodinâmico, entre 8 e 15% e um tráfego 5% mais suave.
- c) A longo prazo os comboios se formariam em faixas dedicadas e apenas no caminhão líder seria necessário um motorista. Eles poderiam ser formados por até quatro veículos, visando uma logística mais eficiente. É esperada uma economia devido redução na resistência aerodinâmica de 18% e outros 10% devido às estratégias de direção ecológica.

Figura 5 - Demonstração de oito veículos em comboio (PATH program)



Fonte: Shladover, 2007

Tabela 1 - Cenário da introdução dos veículos em comboio

	Futuro Próximo	Futuro Médio	Futuro Distante
Conceito	Eco Driving com ACC	Comboio com CACC (ACC + V2V)	Comboio com CACC (ACC + V2V)
Objetivos	Economia de energia com ACC	Economia de Energia Trafego mais suave	Logística Eficiente
Trafego	Misto	Misto	Faixa dedicada
Economia de Energia	Eco Driving Segurança Redução carga trabalho	Redução resistência aerodinâmica (8 - 15%) Trafego mais suave 5%	Redução resistência aerodinâmica (18%) Eco driving 10%
Comboio	2 ou 3 caminhões	3 caminhões	3 ou 4 caminhões
Motorista	Em cada caminhão	Em cada caminhão	Somente no lider

Fonte: Adaptado de Tsugawa, Kato e Aoki, 2011

O primeiro projeto europeu foi o Chauffeur I, que investigava o potencial de economia de combustível do comboio (BONNET; FRITZ, 2000). O Chauffeur II aprimorou o sistema de controle para reduzir a distância inter-veicular (FRITZ; et al., 2004). Outros grupos de pesquisa como o KONVOI (KUNZE; et al., 2011) e *Safe Road Trains for the Environment* (SARTRE) (CHAN, 2016), estudaram a viabilidade comercial e a interação com os motoristas do comboio e o projeto *Cooperative Dynamic Formation of Platoons for Safe and Energy-optimized Goods Transportation* (COMPANION) focou em projetos de coordenação e operação do comboio (EILERS; et al., 2015).

Alguns sistemas, antes desenvolvidos com o objetivo de melhorar o conforto e a segurança (MOSEK; et al., 2017), foram adotados para a formação do comboio. O primeiro foi o controle de cruzeiro (CC), que atua no torque do motor para manter uma velocidade constante (TEETOR, 1950). Uma evolução do CC foi o controle de cruzeiro adaptativo (ACC), que incorporou um radar para medir a distância dos obstáculos à frente e é capaz de ajustar a velocidade para manter um espaçamento desejado (RAJAMANI, 2015).

A combinação de sistemas como o CC e um sistema de posicionamento global deram origem a estratégia LAC, que utiliza um banco de dados e uma unidade de sistema de posicionamento global (GPS) com informações sobre a topologia da via à frente (HELLSTRÖM; et al., 2009). Estes dados são utilizados em uma análise de otimização do perfil de velocidade com objetivos que ponderam entre o consumo de combustível e o tempo de viagem. Uma estratégia possível para isso é utilizar um controle preditivo que constantemente alimenta o CC. De acordo com o teste realizado por Hellström, et al. (2009), houve uma redução de 3,5% no consumo de combustível para um trajeto de 120 km e uma redução de 42% nas trocas de marchas.

Recentemente, com o aprimoramento da comunicação veículo para veículo (V2V) o sistema de controle de cruzeiro adaptativo e colaborativo (CACC) foi apresentado (VAN AREM; et al., 2006). Este sistema se beneficia de comunicação para compartilhar informações com os integrantes, como desacelerações e acelerações, diminuindo assim o tempo de resposta e aumentando a estabilidade da formação. Entretanto, para que se tenha um melhor aproveitamento do comboio, é primordial que vários veículos trafeguem próximos uns aos outros e que consigam trocar informações (ZHENG; et al., 2017). Atualmente, pela idade da frota em circulação no Brasil, que segundo Tedesco (2014) era de aproximadamente 18 anos, isso raramente aconteceria na prática.

Os benefícios do comboio são proporcionais à distância que eles trafegam. Quanto menor for a distância entre eles maior será a redução do coeficiente de arrasto aerodinâmico e menor será o espaço ocupado pelo comboio na rodovia. Entretanto, quanto menor a distância, maiores os riscos com a segurança dos participantes. Sendo assim, a automação é uma ferramenta que auxilia na segurança (AXELSSON, 2017).

Segundo Alam, et al. (2014) em condições normais de operação a distância de 1,2 m pode ser mantida. Isto seria o suficiente para que uma colisão possa ser evitada para dois veículos idênticos que se comuniquem. Esta distância deveria ser considerada de 2

m quanto um atraso na comunicação de 500 ms estiver presente no sistema. Isto é maior do que os valores utilizados atualmente.

Uma capacidade de frenagem maior é recomendada para os veículos seguidores, tendo em vista que isto favorece a menor distância entre eles (ALAM; et al., 2014).

2.2 ECO-DRIVING

Como vimos anteriormente o transporte rodoviário consome uma grande quantidade de combustível e consequentemente é responsável por uma grande porção das emissões de poluentes. O motorista é um fator principal e muitas vezes esquecido na análise de eficiência do veículo e o *eco-driving* é uma solução que contribui com a redução do consumo de combustível (HUANG; et al., 2018).

Sivak e Schoettle (2012) definiram *eco-driving* como decisões que os motoristas poderiam fazer que influenciariam na economia de combustível. Os principais fatores são: Velocidade, aceleração e desaceleração, escolha de rota e a marcha lenta.

Segundo Zhou, Jin e Wang (2016) o investimento necessário para o desenvolvimento de novos motores e novas tecnologias é alto e demorado e têm um potencial de melhoria na eficiência entre 4-10% e 2-8% respectivamente. Contudo, a implementação do *eco-driving* é rápida e barata e pode melhorar a eficiência energética (SIVAK; SCHOETTLE, 2012). Alguns exemplos são: Marcha lenta pode melhorar o consumo em 19%, a velocidade em até 33%, agressividade do condutor em 31%, escolha da roda em 9% e a combinação de todos os métodos de *eco-driving* pode melhorar a eficiência em até 45% (SIVAK; SCHOETTLE, 2012).

Segundo Chang e Morlok (2005), velocidade constante é o perfil ótimo visando a economia de combustível para rodovias que sejam niveladas ou que tenham pouca inclinação ascendente ou descendente. Portanto, utilizar o controle de cruzeiro quando possível é recomendado para o *eco-driving* e pode gerar uma economia de até 7 % (SIVAK; SCHOETTLE, 2012), pois a variação da velocidade influencia na economia de combustível.

Em se tratando de mundo real, não é possível manter a velocidade constante o tempo todo por conta de fatores como: Limite de velocidade, topologia da rodovia, tráfego e sinais de trânsito (MENSING; et. al., 2013). Portanto, muito estudos foram feitos para estimar o perfil de velocidade ótimo em diversas situações, mesmo em casos em é eficiente manter a velocidade constante. Os estudos elaborados foram: Topologia da

rodovia (D'AMATO; et al., 2017), cenário de formação de comboio (LI; et al., 2017), congestionamento (WANG; et al., 2014).

Segundo Huang, et al. (2018) uma regra geral para o *eco-driving* é mudar drasticamente a forma de dirigir, o que implica em mudar para um modo mais suave de direção, que minimize as acelerações e desacelerações bruscas. A função da aceleração e desaceleração é aumentar e diminuir a velocidade ou parar e arrancar com o veículo e, para tais ações, sempre haverá formas mais ou menos eficientes de se praticar. Ainda não existe nenhum consenso sobre a melhor forma de se fazer isso (SANGUINETTI; KURANI; DAVIES, 2017), mas a maioria dos programas recomenda uma direção mais suave minimizando as acelerações e desacelerações (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2022).

O US Department of Energy (2022) mostrou que dirigir de forma agressiva em rodovias pode aumentar o consumo de 15 a 30% e na cidade entre 10 e 14%. Uma forma simples de evitar acelerações e desacelerações desnecessárias é manter uma boa distância do veículo à frente e assim o motorista pode antecipar suas ações. Esta forma de condução faz com que as trocas de marcha sejam mais eficientes, evita o excesso de velocidade e o tempo que o veículo ficaria parado em marcha lenta (HUANG; et al., 2018).

A escolha da rota é outro importante fator que determina o consumo e as emissões de uma viagem. Uma vez a rota escolhida, os fatores mencionados (velocidade, aceleração, desaceleração e marcha lenta) do *eco-driving* serão limitados pelas características da via. Na maioria dos casos existem diversas rotas para se completar o trajeto, geralmente os motoristas escolheram as rotas com a menor distância e o menor tempo de viagem. Entretanto, o caminho mais curto ou mais rápido nem sempre é o mais eficiente em termos de consumo de combustível (MASIKOS; et al., 2015).

Difilippo, et al. (2018) desenvolveu um sistema que fornece para os veículos pesados a rota que garante o menor consumo de combustível respeitando o máximo tempo de viagem. Para isto, um otimizador busca pelas principais rotas disponíveis que conectam a origem ao destino e utiliza um modelo de dinâmica longitudinal capaz de integrar as condições meteorológicas, tráfego, topográfica da estrada e fator de carga de um veículo pesado para determinar um perfil ótimo de velocidades e a seleção adequada das marchas. Por fim, o usuário é informado qual o melhor trajeto a seguir para que o consumo e tempo de viagem sejam minimizados. Um estudo de caso mostrou a eficiência do sistema com relação ao consumo de combustível e emissões de gás carbônico. O

sistema desenvolvido ainda poderá contar com informações dos sistemas embarcados do próprio veículo para melhorar ainda mais a eficiência no cálculo da rota.

O modelo proposto por Ozatay, et al. (2014) segue a linha de otimização do perfil de velocidade, onde o motorista informa o trajeto para uma nuvem de servidores, que trabalham em conjunto para obter as características do relevo do caminho escolhido. Estas informações são utilizadas por um algoritmo de programação dinâmica que obtém como resultado o perfil de velocidade otimizado. Os resultados obtidos são enviados para o motorista e são dispostos em forma de sugestão em uma tela instalada no painel conforme pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Tela onde as velocidades sugeridas são mostradas



Fonte: Ozatay et al. (2014b)

De acordo com Ozatay, et al. (2014) o resultado dos testes realizados na rodovia alcançou uma economia média de 12,6% no consumo de combustível com um aumento de 3,6% do tempo total de viagem. Estes ganhos poderiam chegar a 14,4% caso o motorista conseguisse reproduzir exatamente o perfil de velocidade sugerido.

Outro fator do *eco-driving* é o tempo em marcha lenta que deveria ser minimizado, pois nesta condição ele atinge zero de eficiência (SANGUINETTI; KURANI; DAVIES, 2017). De acordo com Huang, et al. (2018) um veículo em marcha lenta consome 0,6 a 5,7 l/h de combustível dependendo do seu tipo, tamanho do motor, tipo de combustível e carga. Foi estimado que os veículos em marcha lenta consomem por volta de 22,7 bilhões de litros de combustível somente nos Estados Unidos anualmente. Eliminar a marcha lenta desnecessária seria igual a remover cerca de cinco milhões de veículos das vias em termo de consumo de combustível e emissões.

Existem muitas formas de reduzir o tempo em marcha lenta. Carros modernos não necessitam aquecer o motor. Segundo os fabricantes a temperatura ideal é atingida dirigindo o veículo de maneira mais suave por trinta segundos, mesmo nos dias mais frios. Entretanto, os motoristas têm menos controle da marcha lenta em condições de tráfego, onde desligar o motor seria inconveniente e até mesmo inseguro. Portanto, reduzir o tempo em marcha lenta poderia ser minimizada com velocidades, acelerações e desacelerações mais eficientes (HUANG; et al., 2018).

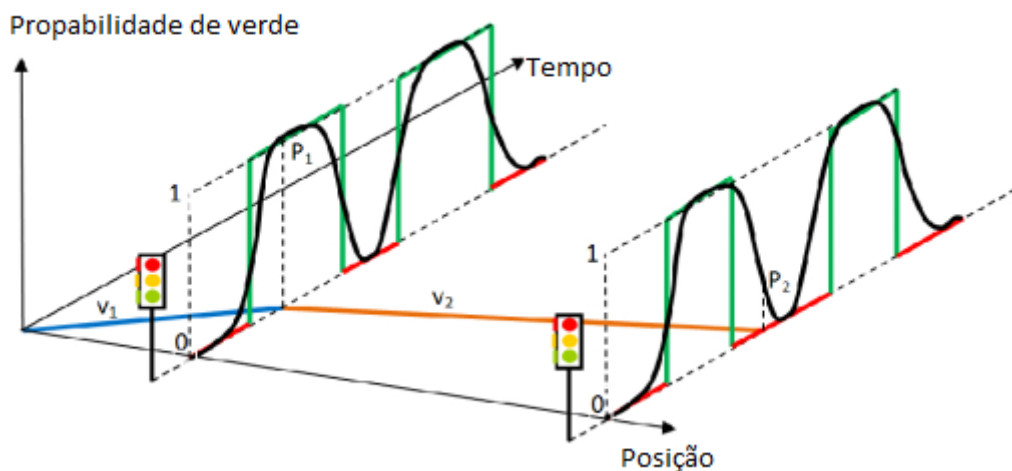
Manter o olhar a frente nas mudanças do semáforo e no trânsito poderia reduzir o tempo em marcha lenta nos cruzamentos e no congestionamento somente antecipando as desacelerações e dirigindo de forma mais suave. Esta condição reduziria o consumo tanto nas condições de aceleração e desaceleração quanto na marcha lenta. Um estudo feito por Mahler e Vahidi (2014) propõe uma velocidade ótima para minimizar o tempo parados nos sinais vermelhos baseado em modelos probabilísticos de tempo de abertura de semáforo.

2.3 MARCHA LENTA EM SEMÁFORO

Uma quantidade significativa de combustível é gasta desacelerando, aguardando e acelerando nos semáforos (CHIN, 2004) e evitar os sinais vermelhos pode melhorar o consumo de combustível e reduzir as emissões.

O trabalho desenvolvido por Mahler e Vahidi (2014) propõe um método que utiliza tanto um tempo base de abertura de semáforo quanto uma média histórica, em conjunto com os dados em tempo real para prever de forma probabilística os tempos de abertura dos sinais. Esta previsão é utilizada em um controle preditivo de velocidade que minimize a chance de ficar parado em marcha lenta nos cruzamentos. Um exemplo pode ser visto na Figura 7, na qual pode-se observar um esquema de dois semáforos que ao longo da linha do tempo alternam os seus estados entre vermelho e verde, sendo que estas posições estão indicadas pelas linhas vermelha e verde ao longo do tempo para ambos. Um veículo trafegando com velocidade v_1 se desloca ao encontro do semáforo 1 e no instante do cruzamento este está na posição verde. Alterando a velocidade para v_2 ao cruzar o semáforo 2, este está na posição vermelho.

Figura 7 - Esquema de planejamento de velocidade baseado na probabilidade de verde em dois semáforos consecutivos



Fonte: Adaptado de Mahler e Vahidi, 2014

Seguindo os trabalhos relacionados ao tema, Koukoumidis, Peh e Martonosi (2011) utilizam uma técnica de aprendizado de máquina usada para prever a fase dos semáforos. As fases atuais são capturadas pela câmera de um celular posicionado no para-brisa dos veículos. Cada celular utiliza um algoritmo para tratamento de imagens que determina a fase atual e esta informação é distribuída para outros celulares que estão utilizando o mesmo aplicativo.

Baby, et al. (2022) propuseram um controle preditivo para otimizar o perfil de velocidades visando a redução do consumo de combustível em veículos autônomos trafegando em um perímetro urbano com semáforos. Este perfil é compartilhado com os veículos não autônomos, que participam da formação deste comboio, com o intuito de que todos os participantes tenham uma economia de combustível, se conseguirem minimizar o tempo parado nos sinais vermelho.

Para um melhor entendimento do estudo proposto, alguns conceitos serão introduzidos: Conceito de Heterogêneo e sistemas de comunicação.

2.4 VEÍCULOS HETEROGÊNEO (CAV E HDV)

Os tipos de comboio são classificados de acordo com a sua homogeneidade, por exemplo: comboios compostos por veículos com as mesmas capacidades dinâmicas são chamados de homogêneos (HERMAN; et al., 2015). Neste caso, o projeto do controlador é mais simples. Em contrapartida, um comboio não é formado apenas por veículos que

tenham as mesmas configurações mecânicas. Ele pode ser composto por caminhões com diferentes tipos de motorização e capacidade de frenagem (diferentes capacidades dinâmicas), sendo que esta formação se dá o nome de comboio heterogêneo (ZHENG; et al., 2017).

Além das configurações mecânicas podemos observar também diferença em suas tecnologias. Os veículos autônomos e conectados, da sigla em inglês CAVs (*connected and automated vehicle*), vêm sendo pesquisado e sua capacidade de melhorar a segurança, nível de emissões e mobilidade, está cada vez mais nítida. Como a inserção destes produtos é feita de forma gradativa, é necessário considerar a interação com os veículos conduzidos por humanos, *human-driven vehicle* HDV (CUI, 2018).

Rios-Torres e Malikopoulos (2018) analisaram os efeitos da penetração parcial desta tecnologia no mercado. Eles desenvolveram um cenário de simulações para melhorar a compreensão da interação entre CAVs e HDVs e chegaram à conclusão de que quanto mais alta a penetração dos CAVs no mercado mais estável é o tráfego.

Este cenário heterogêneo entre CAVs e HDVs formando comboios será abordado no trabalho.

2.5 CONCEITO DE COMUNICAÇÃO V2V E V2I

Uma rede de comunicação entre veículos habilita diversas aplicações associadas com segurança e eficiência no tráfego além das informações detalhadas abaixo. Sua aplicação pode ser dividida em: Segurança ativa nas vias, eficiência no tráfego e informação.

As aplicações de segurança ativa nas vias são aquelas que foram previamente implementadas para diminuir a probabilidade de acidentes e perdas de vidas. Isso pode ser alcançado quando os veículos compartilham informações entre si como: Posição, velocidade e distância. Estas informações são utilizadas para prever colisões.

Quando o veículo é capaz de se comunicar com as concessionárias das vias é possível trocar informações como: Buracos, locais perigosos, pista escorregadia e posição na via. Karagiannis, et al. (2011).

A comunicação estabelecida entre os veículos é chamada de comunicação *vehicle to vehicle* (V2V) e a estabelecida com a via é chamada de *vehicle to infrastructure* (V2I).

No trabalho desenvolvido por Baby, et al. (2022), assume-se que os CAVs conseguem se comunicar com os veículos HDVs através da comunicação V2V. Esta

comunicação possibilita que os CAVs sugiram velocidades para os HDVs. Estas sugestões são comandos que os motoristas deveriam seguir para reduzir, por exemplo, o tempo em marcha lenta aguardando a abertura do semáforo e consequentemente o consumo de combustível do comboio. A situação de qual luz está acessa em cada semáforo são compartilhadas com os veículos autônomos através da V2I para que o controle preditivo defina o perfil de velocidade.

O trabalho demonstra através de resultados de simulações que o controlador melhora a eficiência em comparação com método sem sugestões. Os resultados também mostram que a eficiência também aumenta significativamente quando a probabilidade de seguir as sugestões é alta.

Este artigo elaborado por Baby, et al. (2022) serviu de base para a presente dissertação, no qual o objetivo está descrito na seção 3, em que o modelo de velocidade futura e o sistema de sugestões foram utilizados.

3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo estudar o efeito da inclusão de veículos que não disponham de tecnologias autônomas e são guiados por seres humanos (*Human-Driven Vehicle* – HDV) em comboios. Veículos com estas características estão em operação em todo o território nacional e todos seriam aptos a fazerem parte do comboio. Nesta formação o HDV seria o líder e os seguidores veículos autônomos e conectados (*Connected and Automated Vehicle* – CAV). Por motivos de segurança optou-se por posicionar o HDV como líder, pois no caso de uma frenagem de emergência, os CAVs dispõem de tecnologias para fazê-la de forma autônoma.

A estratégia adotada para incluir o HDV no comboio é a de sugestão de velocidade, na qual uma velocidade ótima é compartilhada com o condutor deste veículo e este é responsável por segui-la. Essa velocidade compartilhada tem o objetivo de manter a formação do comboio, o perfil ótimo de velocidade dos CAVs e minimizar o consumo de combustível do conjunto.

Outras estratégias de controle: Controle de cruzeiro e controle ótimo, serão utilizadas para comparar o consumo de combustível do comboio e avaliar a viabilidade do HDV na formação.

As influências de alguns parâmetros serão avaliadas através de uma análise de sensibilidade para que se possa identificar quais destes têm a maior influência no perfil de velocidade e consumo.

Para isto, as seguintes etapas foram seguidas para alcançar o objetivo:

- a) Modelo de dinâmica longitudinal para descrever o comportamento cinemático do veículo;
- b) Modelo de velocidade futura para que o HDV ajuste sua velocidade a velocidade sugerida;
- c) Modelo de consumo que será a métrica da eficiência do método sugerido;
- d) Trajetos fictícios para avaliar qual o comportamento do perfil de velocidades e consumo do comboio;
- e) Cenários com diferentes métodos de controle de velocidade e diferentes tipos de trajeto.

4 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo descrito na seção 3 a metodologia proposta será descrita a seguir.

Na seção 4.1 o modelo da dinâmica longitudinal será apresentado determinando o comportamento cinemático longitudinal de todos os veículos e posteriormente seus valores serão utilizados para o cálculo da potência e do consumo.

O modelo de velocidade futura está na seção 4.2, este modelo é importante para prever o comportamento da velocidade de um HDV quando uma alteração de velocidade se faz necessário.

Na seção 4.3 apresenta-se o modelo de consumo, sendo que este consumo será utilizado como objetivo no cálculo da otimização, no qual busca-se o menor valor para a soma dos consumos. Alguns trajetos fictícios serão utilizados para o entendimento do comportamento do comboio e estes estão descritos na seção 4.4.

Para o cálculo da otimização do perfil de velocidade, utiliza-se os cenários descritos na seção 4.6 . Estes cenários são importantes, pois tentam representar situações da vida real.

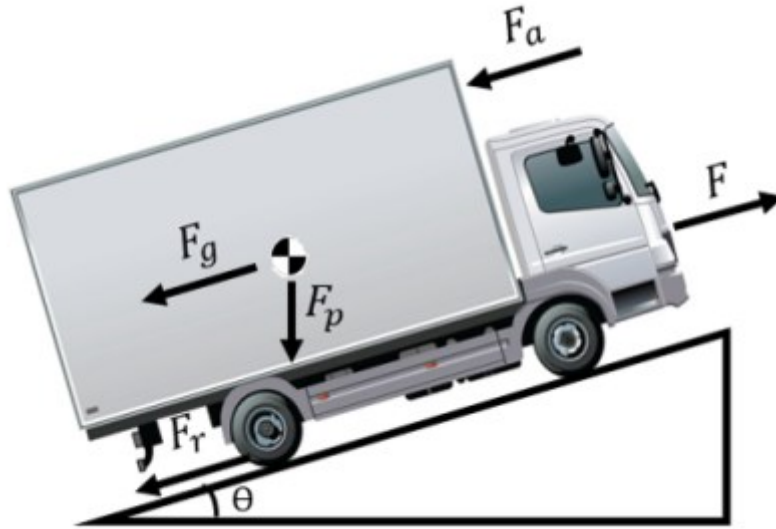
4.1 MODELO DA DINÂMICA LONGITUDINAL

No presente trabalho optou-se pelo mesmo modelo de dinâmica longitudinal utilizado por Nanni (2020), que relaciona as forças resistivas (força de arrasto aerodinâmico, força de resistência ao rolamento e força gravitacional) e a força referente ao trem de força. O modelo se baseia na segunda lei de Newton, como pode ser visto na equação 1.

$$m\dot{v} = F - F_r - F_g - F_a \quad (1)$$

Nesta equação, m representa a massa do veículo, $\dot{v}$ a aceleração, F é a força de tração, F_r a força de resistência ao rolamento, F_g a componente da força peso (F_p) na direção longitudinal e F_a a força de arrasto aerodinâmico. Na Figura 8 pode-se observar essas forças atuantes sobre o veículo.

Figura 8 - Forças Atuantes sobre o veículo



Fonte: Nanni, 2020

Na equação 2, pode-se observar a força de resistência ao rolamento.

$$F_r = mgC_r \cos \theta (s) \quad (2)$$

Nesta equação, g é a aceleração da gravidade, C_r é o coeficiente de resistência ao rolamento e $\theta(s)$ é a inclinação da via em função da posição s .

Na equação 3 pode-se observar a componente da força peso que atua na direção longitudinal.

$$F_g = mg \sin \theta (s) \quad (3)$$

Na equação 4 pode-se observar a força de resistência aerodinâmica.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (4)$$

Em que ρ é a densidade do ar, A é a área frontal do veículo, C_d é o coeficiente de arrasto aerodinâmico e v a velocidade.

As simplificações feitas por Nanni (2020) e Liang, Mårtensson e Karl H. Johansson (2016) foram mantidas para o presente trabalho. São elas: O caminhão é representado por uma massa concentrada. O efeito da inércia dos elementos rotativos são

substanciais e no geral não podem ser omitidos, mas de acordo com Guzzella e Sciarretta (2007) sua influência é maior em relações de transmissões altas, ou seja, marchas mais baixas em uma transmissão manual convencional. No cenário de rodovia e não considerando as trocas de marcha pode-se desprezar o efeito inercial dos elementos rotativos a título de simplificação.

Admite-se que a relação de marchas pode ser mudada continuamente e que o sistema sempre escolhe a relação mais eficiente. A força F pode assumir valores negativos para representar a frenagem, portanto para o presente trabalho não será necessário criar uma outra variável para o sistema de freios (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2007).

De acordo com Guzzella e Sciarretta (2007) e Gillespie (1992), o coeficiente de resistência ao rolamento depende de inúmeras variáveis, dentre elas: velocidade, pressão e material dos pneus, carga transportada, temperatura e condições da superfície da via. Para efeito de simplificação no presente trabalho, o impacto da variação delas no coeficiente não foi considerado.

A resistência aerodinâmica também depende de inúmeras variáveis, como: Atrito viscoso do ar com a superfície da carroceria, diferença de pressão entre a parte dianteira e traseira e a velocidade dos ventos atmosféricos. Entretanto, tais efeitos no coeficiente não serão levando em consideração.

Portanto, substituindo as equações 2, 3 e 4 em 1, chegamos na equação 5 da dinâmica longitudinal. Adota-se o índice 1 para representar as variáveis do caminhão líder.

$$m_1 \dot{v}_1 = F_1 - m_1 g C r_1 \cos \theta(s_1) - m_1 g \sin \theta(s_1) - \frac{1}{2} \rho A_1 C d_1 v_1^2 \quad (5)$$

Para os caminhões seguidores foi necessário incluir os efeitos da redução nas forças resistivas aerodinâmicas causada pela distância inter-veicular. Assim como Turri, Besselink e Johansson (2017), acrescenta-se um fator Φ multiplicando a equação 4, resultando na força de resistência aerodinâmica para os seguidores (equação 6).

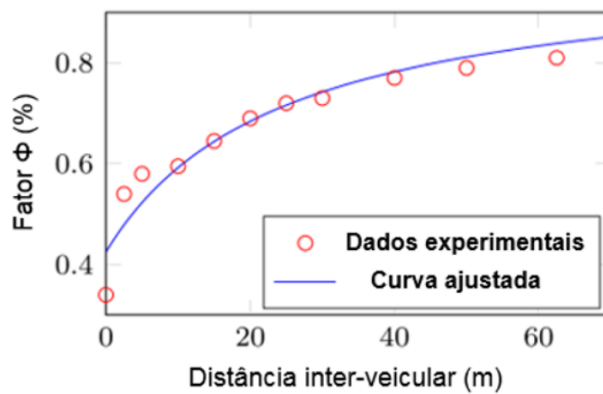
$$F_{as} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \Phi(d) \quad (6)$$

Em que Φ é calculado através da equação 7.

$$\Phi(d) = 1 - \frac{C_{D1}}{C_{D2} + d} \quad (7)$$

Os parâmetros C_{D1} e C_{D2} são obtidos através de uma curva experimental levantada por Hucho e Ahmed (1987) como pode ser vista na Figura 9 e d é a distância inter-veicular.

Figura 9 - Fator de redução de arrasto



Fonte: Adaptado de Turri, Besselink e Johansson, 2017

Sendo assim, a equação do modelo longitudinal para os caminhões seguidores pode ser vista na equação 8. O índice N representa a posição do veículo no comboio, que pode ser 2, 3 ou 4.

$$m_N \dot{v}_N = F_N - m_N g C_{rN} \cos \theta(s_N) - m_N g \sin \theta(s_N) - \frac{1}{2} \rho A_N C_{dN} v_N^2 \Phi(d) \quad (8)$$

Os parâmetros adotados para o presente trabalho estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros modelo de dinâmica longitudinal

Parâmetro	Valor	Unidade
Coefficiente de Rolamento (C_{r1} , C_{rm})	3.00E-03	-
Coefficiente de arrasto (C_{d1} , C_{dn})	0.78	-
Área Frontal (A_1 , A_n)	10	m ²
Densidade do ar (ρ)	1.2256	kg/m ³
Coefficiente 1 do fator de redução de arrasto (C_{D1})	14.0766	-
Coefficiente 2 do fator de redução de arrasto (C_{D2})	24.4626	-

Fonte: Nanni, 2021

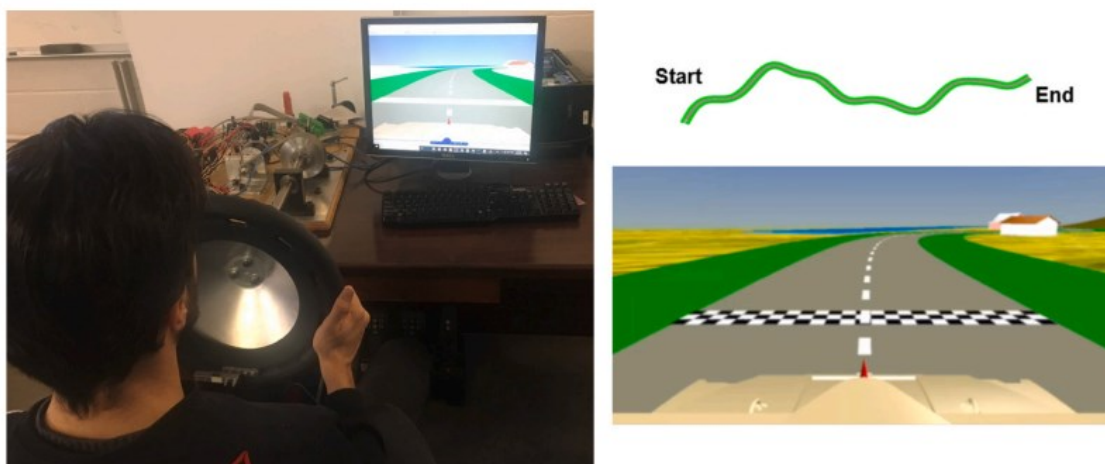
4.2 MODELO DE VELOCIDADE FUTURA PARA HDV

O objetivo do presente trabalho é incluir na formação do comboio caminhões HDV, que não dispõem da tecnologia necessária para fazê-lo de forma autônoma. Para incluir estes veículos, foi proposto que ele seja o líder e receba o perfil de velocidades em formato de sugestão. Os veículos seguidores são do tipo CAV, nos quais as tecnologias para seguir um perfil de velocidade e, caso necessário, efetuar uma frenagem de emergência de forma autônoma estão presentes, fazendo com que a formação do comboio seja mais segura.

Portanto, para que esses veículos façam parte da formação e contribuam com a redução do consumo dos veículos seguidores, faz-se necessário um modelo para prever a velocidade futura quando elas são sugeridas.

Para isto, foram utilizados dados experimentais levantados em um simulador. Estes experimentos foram realizados na *University of North Carolina Charlotte* (UNCC) e *Illinois Institute of Technology* (IIT), como pode ser visto na Figura 10 (BABY; et al., 2022).

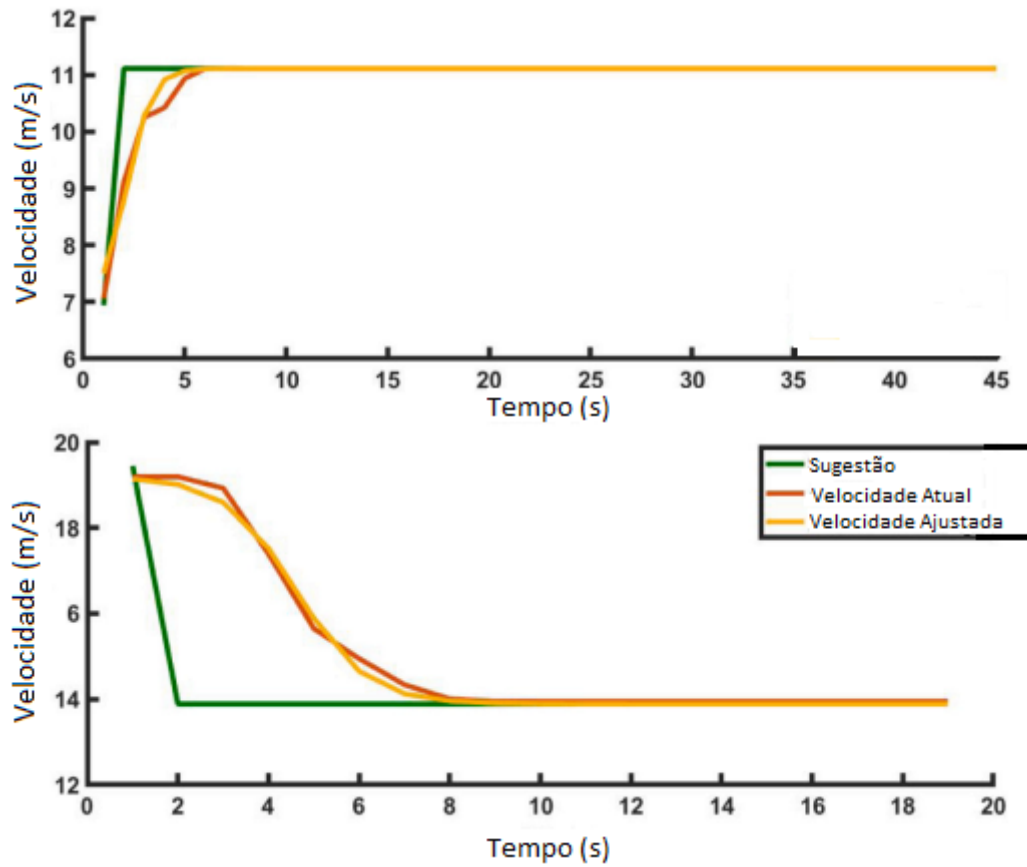
Figura 10 - Configuração do experimento realizado na UNCC



Fonte: Baby, 2022

Na Figura 11, é possível observar um gráfico extraído do experimento, em que uma velocidade é sugerida e o condutor tenta segui-la. As linhas verdes são sugestões de velocidade enquanto as linhas vermelhas são as velocidades medidas no experimento. As curvas em amarelo são curvas ajustadas, que será mais detalhada a seguir.

Figura 11 - Dados de velocidade atual e ajustada para alguns comandos de velocidade sugerida



Fonte: Adaptado de Baby, 2022

A equação 9 descreve o perfil de velocidade de um HDV seguindo uma sugestão de velocidade e esta é modelada baseada em uma função sigmoide.

$$v_{HDV} = \frac{v_{sug} - v_0}{1 + e^{-b_s(n-n_0)}} + v_0 \quad 1 \leq n \leq T_c \quad (9)$$

Em que v_0 é a velocidade imediatamente após uma sugestão ser compartilhada, v_{sug} é a velocidade sugerida. Esta velocidade permanece constante por um período T_c para permitir que o motorista possa segui-la. O tempo transcorrido a partir da sugestão é representado por n . O tempo de reação do motorista está incorporado no parâmetro n_0 e b_s e representam a agressividade do condutor (BABY; et al., 2022).

4.3 MODELO DE CONSUMO

O modelo de consumo utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Wang e Rakha (2017) e foi utilizado por Nanni (2020) e foi calibrado para veículos pesados utilizando como base o *Virginia Tech Comprehensive Power-based Fuel Model* (VT-CPFM). No modelo em questão, a taxa de consumo de combustível está expressa em (l/s) em função da potência, e pode ser visto na equação 10.

$$TC(t) = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 P(t) + \alpha_2 P(t)^2, & P(t) \geq 0 \\ \alpha_0, & P(t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Nesta equação P é a potência em kW e os coeficientes α são obtidos e ajustados experimentalmente de acordo com os veículos testados. Quando a potência do motor é um valor positivo, por exemplo subindo um aclave, a primeira linha da equação é utilizada e quando o veículo está em uma condição de frenagem ou em uma descida, a segunda linha da equação é utilizada, e o consumo equivale ao consumo em marcha lenta.

Este modelo pode ser considerado como do tipo caixa preta, no qual se necessita conhecer apenas as variáveis de entrada, neste caso a potência, e são baseados em dados coletados. Os modelos do tipo caixa branca são mais complexos, pois utilizam expressões matemáticas referentes às etapas de funcionamento do motor. Modelos do tipo caixa cinza são combinações entre os dois modelos anteriores (ZHOU; JIN; WANG, 2016).

No trabalho de Wang e Rakha (2017) foram utilizados oito caminhões do modelo Freightliner/FLD120 ano 1999 com potência nominal de 470 HP (350 kW), como pode ser visto na Figura 12. Como hipótese simplificadora assumiu-se que a potência disponível para frenagem seja também de 350 kW e os coeficientes ajustados se encontram na Tabela 3.

Figura 12 - Freightliner/FLD120



Fonte: Nanni, 2020

Tabela 3 - Parâmetros modelo de consumo

Parâmetro	Valor
Coefficiente α_0	1,45E-03
Coefficiente α_1	8,48E-05
Coefficiente α_2	1,00E-08
Potência Máxima (P_{max})	350 kW
Potência Mínima (P_{min})	-350 kW

Fonte: Adaptado de Wang e Rakha, 2017

4.4 TOPOGRAFIA

Para o presente trabalho alguns trajetos foram utilizados para a estimativa do consumo de combustível. Os mesmos trajetos foram utilizados por Nanni (2020).

Estes trajetos foram adotados pois facilitam a visualização dos cenários que serão avaliados. O perfil de elevação desses percursos são variações tipicamente encontradas nas rodovias, no entanto são representadas de maneira simplificada assim como os perfis elaborados por Kamal, et al. (2011).

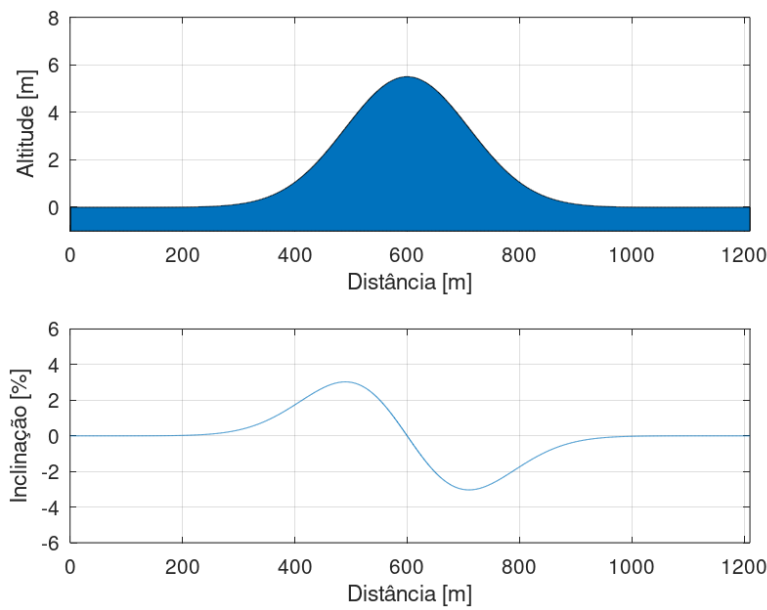
O primeiro trajeto, denominado de trajeto 1, é o relevo plano, tem uma extensão de 1210 m sem nenhuma variação na inclinação (NANNI, 2020). O segundo trajeto, denominado de trajeto 2, possui extensão de 1310 m e não apresenta nenhuma variação na inclinação. Este valor foi adotado para que houvesse uma aceleração ao longo do trajeto.

O terceiro trajeto, denominado de trajeto 3, possui a mesma extensão do trajeto 1 e seu perfil de elevação é calculado utilizando a equação 11.

$$h(s) = c_1 e^{-\frac{(s_i - c_2)^2}{2c_3^2}} \quad (11)$$

Em que c_1 , c_2 e c_3 são parâmetros de ajuste da curva e podem ser vistos na Tabela 4. O perfil de elevação e inclinação, podem ser vistos na Figura 13.

Figura 13 - Perfil de elevação e inclinação do trajeto 3



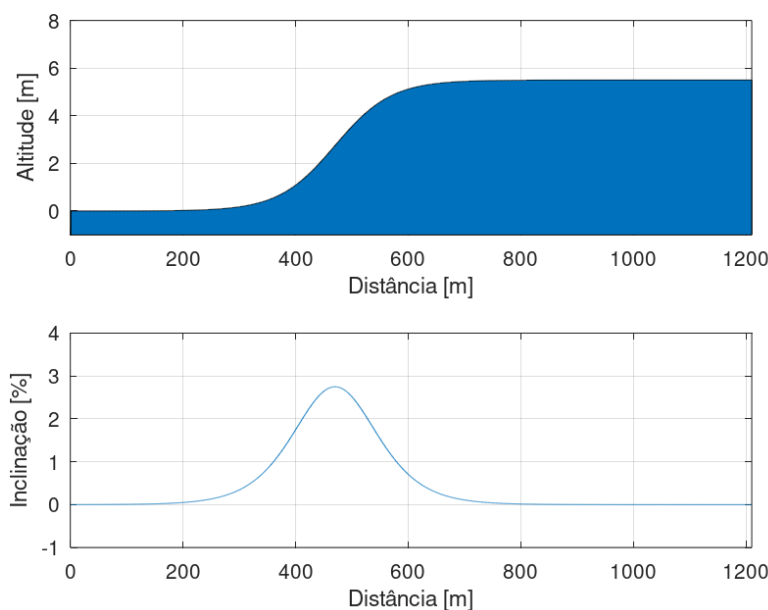
Fonte: Nanni, 2020

O trajeto fictício 4 possui uma extensão de 1210 m e o perfil de elevação é dado pela equação 12.

$$h(s) = \frac{c_4}{1 + e^{-c_5(s - c_6)}} \quad (12)$$

O perfil de elevação e inclinação pode ser visto na Figura 14 e seus coeficientes podem ser visto na Tabela 4.

Figura 14 - Perfil de elevação e inclinação do trajeto 4



Fonte: Autor

Tabela 4 - Parâmetros trajetos fictícios

Parâmetro	Valor
Coeficiente c_1	5.5
Coeficiente c_2	600
Coeficiente c_3	110
Coeficiente c_4	5.5
Coeficiente c_5	0.02
Coeficiente c_6	470

Fonte: Nanni, 2020

4.5 CONTROLE ÓTIMO

TOMLAB é um ambiente de desenvolvimento e modelagem escrito em MATLAB utilizado em pesquisas, ensino e solução prática de problema de otimização. A extensão PROPT do TOMLAB é utilizada para problemas dinâmicos de controle ótimo, no qual ele é descrito por um conjunto de equações diferenciais ordinárias (EDO) escritas no espaço de estados, condições iniciais e finais que podem conter equações ou variáveis que relacionam estas condições e uma função custo (RUTQUIST; EDWALL, 2010).

Este programa habilita a formulação de tal problema preparando toda a matemática envolvida. Uma vez configurado corretamente ele cuidará de todas as etapas necessárias para retornar à solução (RUTQUIST; EDWALL, 2010).

Duas técnicas de otimização podem ser envolvidas: *Shooting* e colocação direta. Sendo que, a primeira resolve numericamente um problema de controle ótimo pelo

método de integração numérica implícita do modelo dinâmico. A segunda, pela integração numérica explícita do modelo dinâmico em cada instante de discretização do problema (BETTS, 2010). Desse modo, a técnica aplicada pelo TOMLAB – PROPT é a de colocação direta.

Neste método, além das informações citadas acima, o problema também estará sujeito a restrições de igualdade e inequações. Na intenção de facilitar a solução numérica das EDOs, chutes iniciais são utilizados. Sendo assim, a descrição do problema de controle ótimo está na seção 4.6.

Para a solução foi utilizada uma máquina com sistema operacional Windows 10 Pro for Workstations de 64 bits com processador Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1620 v3 e 16,0 GB de memória RAM. Os softwares MATLAB na versão 2021.b e TOMLAB v8.8.

4.6 CENÁRIOS ESTUDADOS

Estes cenários foram baseados no trabalho elaborado por Nanni (2020). No presente trabalho serão considerados quatro tipos de trajetória, e três cenário A, B e C. O índice N representa a posição do CAV no comboio e M a quantidade de caminhões. Para representar a dinâmica longitudinal dos veículos as equações 5 e 8 serão escritas no espaço de estados, resultando em:

$$\dot{v}_1 = \frac{(F_1 - m_1 g C r_1 \cos \theta(s_1) - m_1 g \sin \theta(s_1) - 0,5 \rho A_1 C d_1 v_1^2)}{m_1} \quad (13)$$

$$\dot{v}_N = \frac{(F_N - m_N g C r_N \cos \theta(s_N) - m_N g \sin \theta(s_N) - 0,5 \rho A_N C d_N v_N^2 \Phi(d))}{m_N} \quad (14)$$

$$\dot{s}_1 = v_1 \quad (15)$$

$$\dot{s}_N = v_N \quad (16)$$

Em que o ângulo θ está em função de s_1 e s_N . O fator $\Phi(d)$ é calculado pela equação 7. O parâmetro d representa a distância inter-veicular, assim representada na equação 17.

$$d_{N-1,N} = (s_{N-1} - s_N) \quad (17)$$

Para garantir a presença dos efeitos da redução de arrasto para os caminhões seguidores, uma restrição nesta distância é imposta. Esta restrição pode ser vista na equação 18.

$$d_{N-1,N \min} \leq d_{N-1,N} \leq d_{N-1,N \max} \quad (18)$$

Em que $d_{\min}$ é igual a 10 metros e $d_{\max}$ é igual a 40 metros. Pois, a distância mínima está em conformidade com o Código de Trânsito Brasileiro (CTB). Também foi definido que os caminhões devem sempre partir de uma distância de 10 metros à frente um do outro. Isto é:

$$s_1(t_0) = 10(M - 1) \quad (19)$$

$$s_N(t_0) = 10(M - N) \quad (20)$$

Com o intuito de garantir uma velocidade média adequada, foi determinado uma restrição na distância final dos veículos, no qual o deslocamento de 1200 m deve ser cumprido nos trajetos 1, 3 e 4 para um tempo de simulação de 60 s, garantindo uma velocidade média de 20 m/s. Para o trajeto 2 o valor adotado foi de 1300 m, resultando em uma velocidade média de 21,7 m/s, que são valores condizentes com o que é aplicado nas estradas, portanto:

$$s_1(t_f) = s_f + 10(M - 1) \quad (21)$$

$$s_N(t_f) = s_f + 10(M - N) \quad (22)$$

Para todos os cenários foram definidas velocidades iniciais de 72 km/h (20 m/s) e aceleração igual a 0 m/s² para todos os caminhões, entretanto foi estabelecida uma restrição na velocidade máxima igual a 90 km/h (25 m/s), pois este valor está em conformidade com o CTB para a maioria das vias. Sendo assim:

$$v_1(t_0) = v_i \quad (23)$$

$$v_N(t_0) = v_i \quad (24)$$

$$\dot{v}_1(t_0) = 0 \quad (25)$$

$$\dot{v}_N(t_0) = 0 \quad (26)$$

$$v_{1\min} \leq v_1 \leq v_{1\max} \quad (27)$$

$$v_{N\min} \leq v_N \leq v_{N\max} \quad (28)$$

Para os trajetos 1, 3 e 4 foram definidas restrições nas velocidades finais de 72 km/h (20 m/s), portanto:

$$v_1(t_f) = v_f \quad (29)$$

$$v_N(t_f) = v_f \quad (30)$$

Pelo fato da potência do motor e da capacidade de frenagem serem limitadas, adotou-se os limites inferiores e superiores de potência como:

$$P_{1\min} \leq F_1 v_1 \leq P_{1\max} \quad (31)$$

$$P_{N\min} \leq F_N v_N \leq P_{N\max} \quad (32)$$

4.6.1 Cenário A

Neste cenário utiliza-se apenas um veículo, no qual a estratégia adotada para a velocidade será a de controle de cruzeiro. Portanto, uma velocidade de referência será adotada (20 m/s) e o otimizador buscará minimizar a diferença entre ela e a velocidade do veículo.

Denominado como referência, neste cenário busca-se os resultados de consumo para os quatro relevos fictícios descritos na seção 4.4. Estes valores serão utilizados para comparar os resultados com os métodos propostos nos cenários B e C.

Logo, utilizaremos como objetivo para este cenário o quadrado da diferença entre a velocidade do veículo e a velocidade de referência. Deste modo, o problema de controle ótimo pode ser escrito por:

$$\min_{F_1} \int_0^{60} (v_1 - 20)^2 dt \quad (33)$$

Sujeito a:

$$\dot{v}_1 = \frac{(F_1 - m_1 g C r_1 \cos \theta(s_1) - m_1 g \sin \theta(s_1) - 0,5 \rho A_1 C d_1 v_1^2)}{m_1} \quad (34)$$

$$\dot{s}_1 = v_1 \quad (35)$$

$$s_1(t_0) = 0 \quad (36)$$

$$s_1(t_f) = s_f^* \quad (37)$$

$$v_1(t_0) = 20 \quad (38)$$

$$v_1(t_f) = 20 \quad (39)$$

$$\dot{v}_1(t_0) = 0 \quad (40)$$

$$0 \leq v_1 \leq 25 \quad (41)$$

$$-35000 \leq F_1 v_1 \leq 35000 \quad (42)$$

4.6.2 Cenário B

Para este cenário o perfil ótimo de velocidade será calculado para cada trajeto. A estratégia utilizada será a redução da soma do consumo dos veículos do comboio como objetivo. Desta forma, otimiza-se o perfil de velocidade de forma colaborativa, pois o otimizador busca minimizar o consumo do comboio.

Deste modo, podemos descrever o problema de controle ótimo da seguinte forma:

$$\min_{F_i} \sum_{i=1}^M \int_0^{60} \alpha_0 + \alpha_1 F_i v_i + \alpha_2 F_i v_i^2 dt \quad (43)$$

Sujeito a:

$$\dot{v}_1 = \frac{(F_1 - m_1 g C r_1 \cos \theta(s_1) - m_1 g \sin \theta(s_1) - 0,5 \rho A_1 C d_1 v_1^2)}{m_1} \quad (44)$$

$$\dot{v}_N = \frac{(F_N - m_N g C r_N \cos \theta(s_N) - m_N g \sin \theta(s_N) - 0,5 \rho A_N C d_N v_N^2 \Phi(d))}{m_N} \quad (45)$$

$$\dot{s}_1 = v_1 \quad (46)$$

$$\dot{s}_N = v_N \quad (47)$$

$$s_1(t_0) = 10(M - 1) \quad (48)$$

$$s_N(t_0) = 10(M - N) \quad (49)$$

$$s_1(t_f) = s_f^* + 10(M - 1) \quad (50)$$

$$s_N(t_f) = s_f^* + 10(M - N) \quad (51)$$

$$10 \leq d_{N-1,N} \leq 40 \quad (52)$$

$$v_1(t_0) = v_1(t_f) = 20 \quad (53)$$

$$v_N(t_0) = v_N(t_f) = 20 \quad (54)$$

$$\dot{v}_1(t_0) = 0 \quad (55)$$

$$\dot{v}_N(t_0) = 0 \quad (56)$$

$$0 \leq v_1 \leq 25 \quad (57)$$

$$0 \leq v_N \leq 25 \quad (58)$$

$$-35000 \leq F_1 v_1 \leq 35000 \quad (59)$$

$$-35000 \leq F_N v_N \leq 35000 \quad (60)$$

4.6.3 Cenário C

Neste cenário o líder do comboio passa a ser um HDV, portanto sem tecnologia para seguir um perfil ótimo de velocidade de forma autônoma. Este veículo receberá a cada 10 s (BABY; et al., 2022), em formato de sugestão, uma velocidade ótima para que a formação do comboio seja mantida e o consumo seja minimizado. A formação do comboio e o mínimo consumo de combustível se dá quando a distância entre os veículos for a menor possível. Para isto, a redução da soma do consumo dos CAVs será utilizada como objetivo, pois o consumo do HDV não é uma variável livre do projeto

Neste contexto a estratégia de simulação *Multi-Phase* será utilizada no TOMLAB. Isto se faz necessário pois a cada 10 s uma nova sugestão é enviada e a otimização é refeita.

Assim, é possível descrever o problema de controle ótimo:

$$\min_{F_i} \sum_{i=2}^M \int_0^{60} \alpha_0 + \alpha_1 F_i v_i + \alpha_2 F_i v_i^2 dt \quad (61)$$

Sujeito a:

$$v_1 = \frac{v_{sug} - v_0}{1 + e^{-b_s(n-n_0)}} + v_0 \quad 1 \leq n \leq T_c \quad (62)$$

$$\dot{v}_N = \frac{(F_N - m_N g C r_N \cos \theta(s_N) - m_N g \sin \theta(s_N) - 0,5 \rho A_N C d_N v_N^2 \Phi(d))}{m_N} \quad (63)$$

$$\dot{s}_1 = v_1 \quad (64)$$

$$\dot{s}_N = v_N \quad (65)$$

$$F_1 = m_1 g C r_1 \cos \theta(s_1) + m_1 g \sin \theta(s_1) + 0,5 \rho A_2 C d_2 v_2^2 + m_1 \dot{v}_1 \quad (66)$$

$$s_1(t_0) = 10(M - 1) \quad (67)$$

$$s_N(t_0) = 10(M - N) \quad (68)$$

$$s_1(t_f) = s_f^* + 10(M - 1) \quad (69)$$

$$s_n(t_f) = s_f^* + 10(M - N) \quad (70)$$

$$10 \leq d_{N-1,N} \leq 40 \quad (71)$$

$$v_1(t_0) = v_1(t_f) = 20 \quad (72)$$

$$v_N(t_0) = v_N(t_f) = 20 \quad (73)$$

$$\dot{v}_N(t_0) = 0 \quad (74)$$

$$0 \leq v_1 \leq 25 \quad (75)$$

$$0 \leq v_N \leq 25 \quad (76)$$

$$-35000 \leq F_N v_N \leq 35000 \quad (77)$$

4.7 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Esta análise tem como objetivo avaliar a influência de parâmetros predefinidos nos resultados. No presente trabalho os parâmetros: Massa do caminhão líder, altura da trajetória 03 (Figura 13), largura da trajetória 03 e inclinação da trajetória 04 (Figura 14), serão alterados de acordo com a Tabela 5 e ilustrados na Figura 15. O impacto destas variações no perfil de velocidade e no consumo serão avaliados.

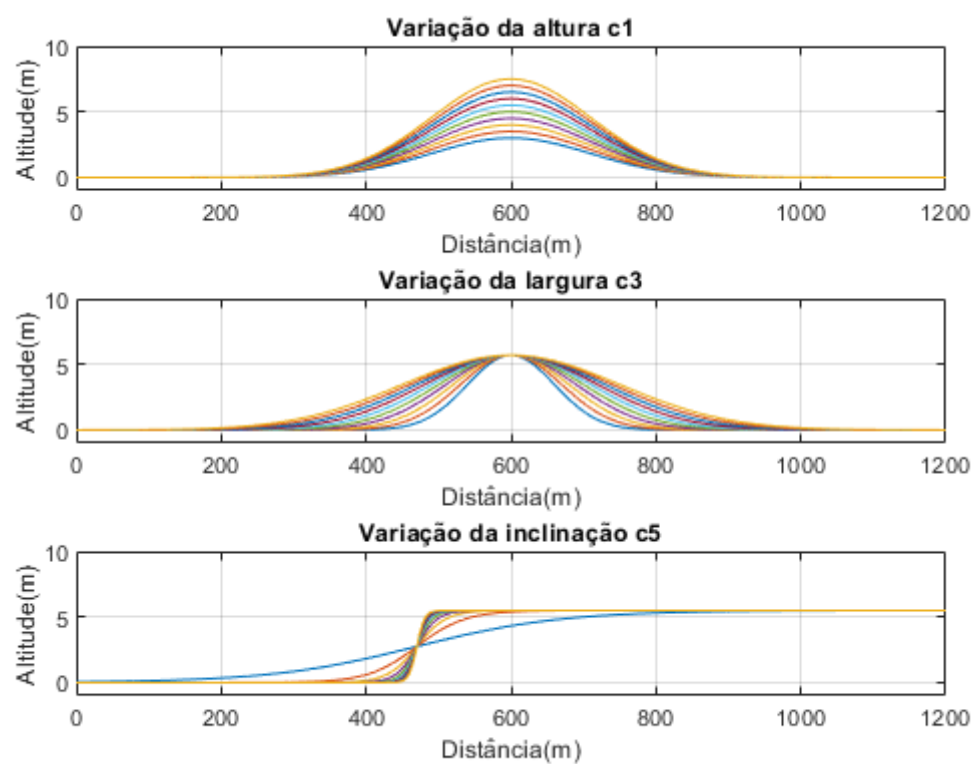
Tabela 5 - Parâmetros análise de sensibilidade

Parâmetro	Valores	Unidade
Massa Veículo 01 (m_1)	20; 22; 24; 26; 28; 30; 32; 34; 36; 38	t
Altura trajetória 03 (c_1)	3,0; 3,5; 4,0; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0	m
Largura trajetória 03 (c_2)	60; 70; 80; 90; 100; 110; 120; 130; 140; 150	-
Inclinação trajetória 04 (c_5)	0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,09; 0,11; 0,13; 0,15; 0,17; 0,19	-

Fonte: Autor.

Para isto, o cenário B, descrito na seção 4.6.2, será utilizado. A título de simplificação serão utilizados apenas dois veículos nesta análise.

Figura 15 - Variáveis relevo analisadas



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a inclusão de veículos do tipo HDV na formação do comboio, no qual ele seria o líder e os CAVs seguidores. Nesta formação os HDV são responsáveis por seguir uma velocidade ótima, compartilhada a cada 10 s no formato de sugestões. O perfil de velocidade dos CAVs é obtido através de uma estratégia de controle ótimo, e este perfil tem como função objetivo minimizar o consumo de combustível do comboio e, para isso, manter a formação é essencial.

Para a modelagem proposta, a metodologia da seção 4 foi apresentada, sendo que nela pode-se ver o modelo da dinâmica longitudinal que determina o comportamento cinemático longitudinal e o modelo de velocidade futura. Apresentou-se o modelo de consumo e este será utilizado como função objetivo no cálculo da otimização e alguns relevos fictícios. Os cenários apresentados foram utilizados para avaliar o comportamento do comboio em diversas condições e verificar os benefícios de cada método (controle de cruzeiro, perfil ótimo e sugestão).

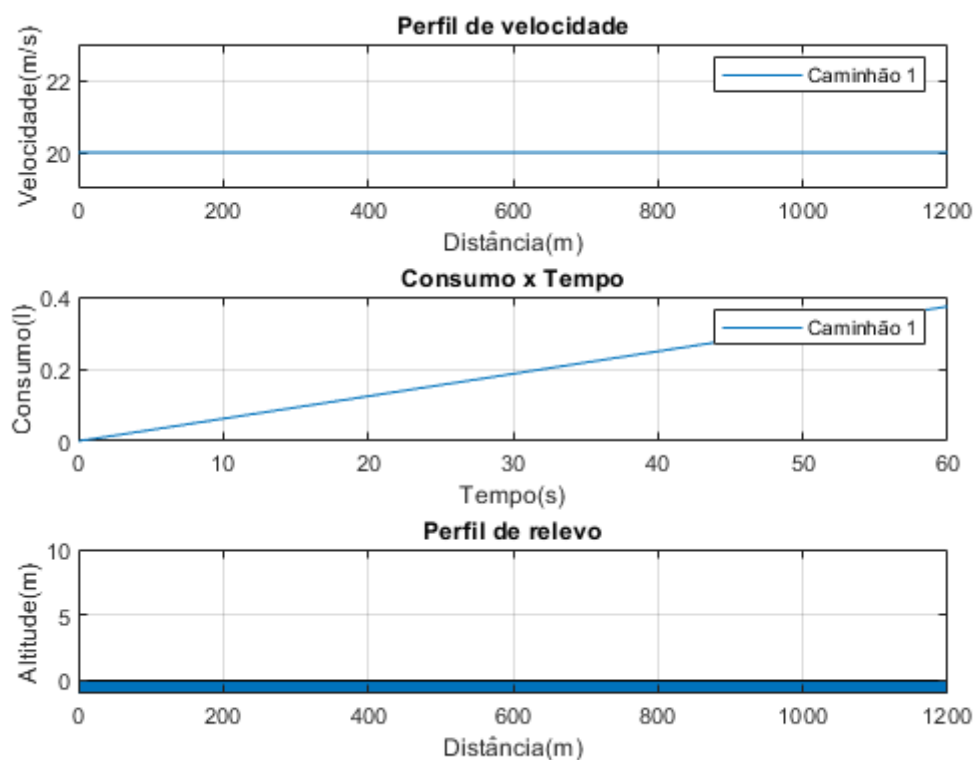
Nessa parte do trabalho, os resultados serão apresentados e discutidos. Na seção 5.1 é possível ver os resultados do cenário A, discutidos na seção 5.4. Nas sessões 5.2 e 5.3 serão expostos os resultados dos cenários B e C. A discussão dos resultados anteriores será vista na seção 5.4.

Os resultados estão dispostos em formato de gráficos, na qual serão apresentados os perfis de velocidade em controle de cruzeiro, perfil ótimo e sugestão. O consumo será apresentado como o valor acumulado ao longo do trajeto e será mostrada a distância inter-veicular. Com a finalidade de facilitar a visualização, a trajetória percorrida também será apresentada para cada resultado.

5.1 RESULTADOS CENÁRIO A

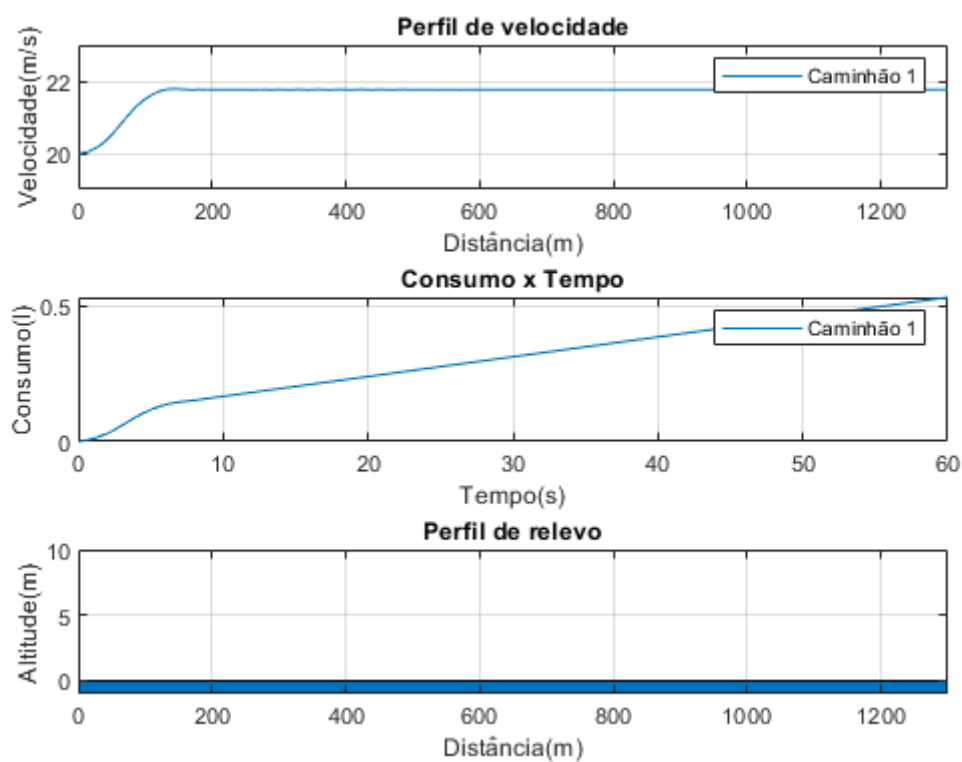
O cenário A utiliza a estratégia de controle de cruzeiro na velocidade. Suas restrições, limites, condições iniciais e função objetivo estão descritas na seção 4.6.1. Nas Figura 16, 17, 18 e 19 observam-se os perfis de velocidade otimizados do veículo ao longo da trajetória, sendo que para a maioria das trajetória resultou em valores constante. O acumulado de consumo ao longo do tempo e o perfil altimétrico simulado. Estes resultados serão discutidos na seção 5.4.

Figura 16 - Resultado cenário A – Trajetória 01



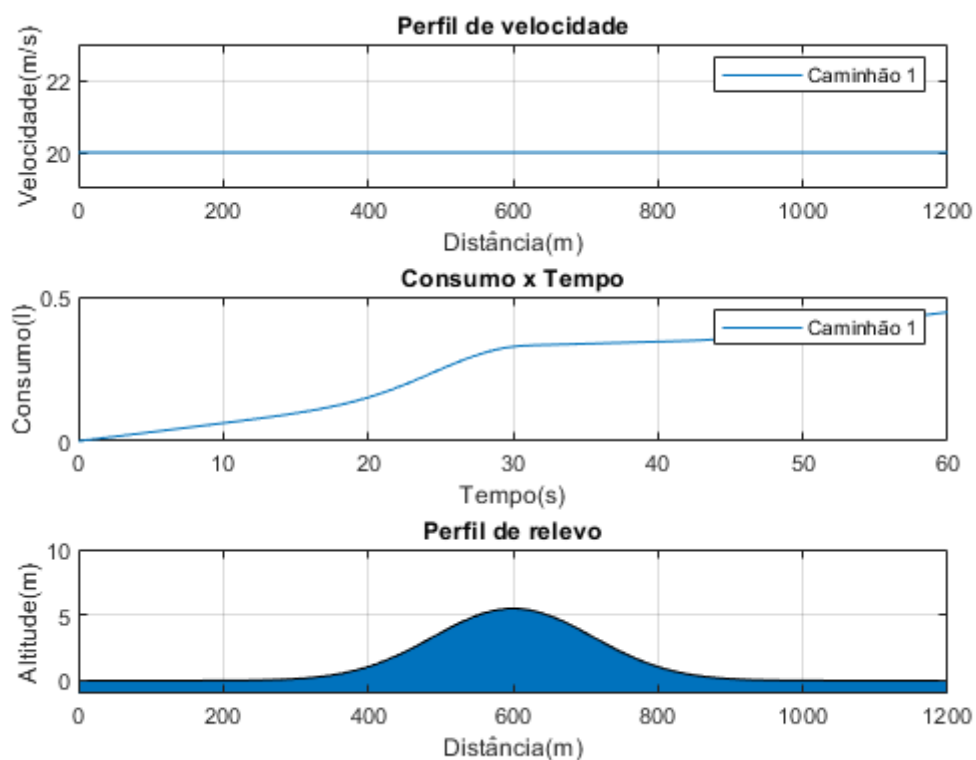
Fonte: Autor.

Figura 17 - Resultado cenário A – Trajetória 02



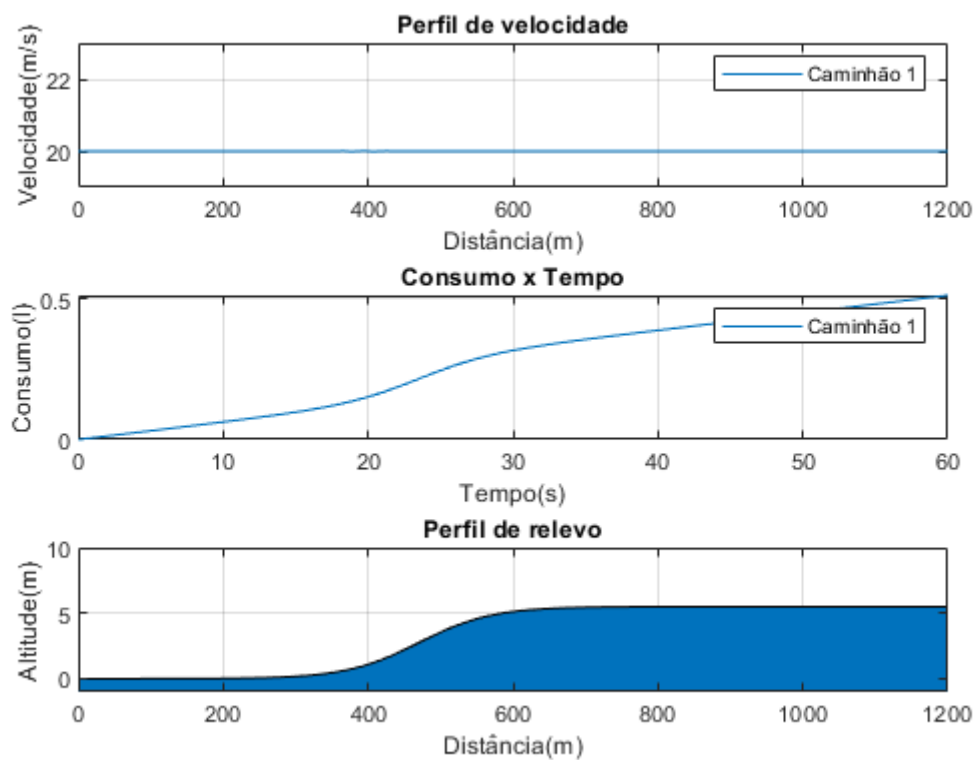
Fonte: Autor.

Figura 18 - Resultado cenário A – Trajetória 03



Fonte: Autor.

Figura 19 - Resultado cenário A – Trajetória 04



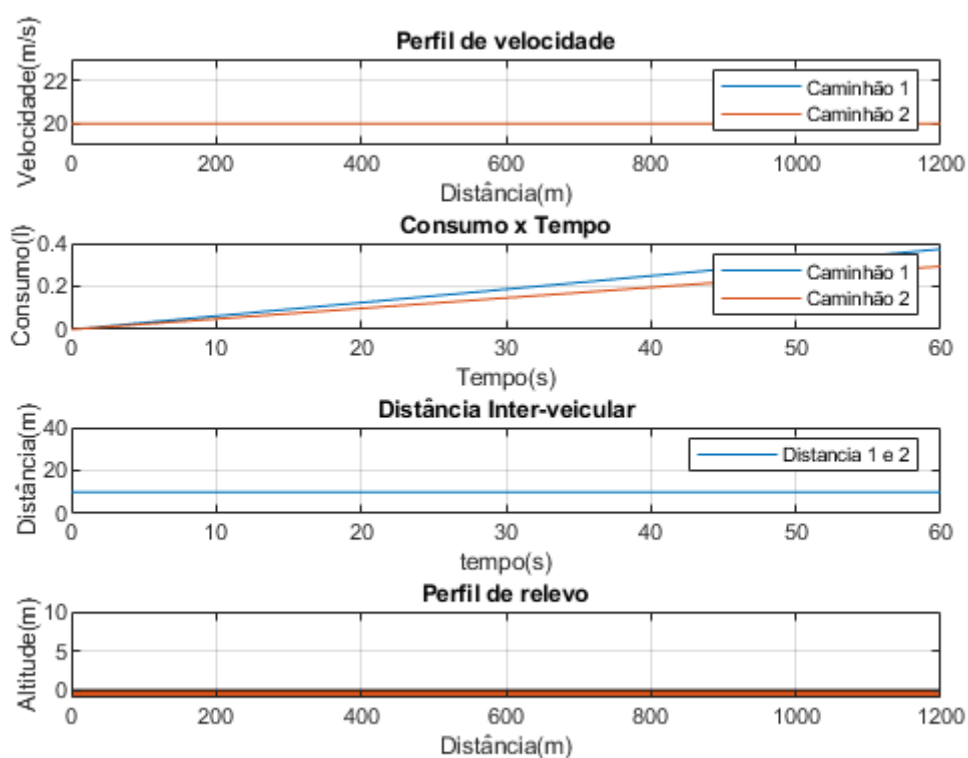
Fonte: Autor.

5.2 RESULTADOS CENÁRIO B

Os resultados do cenário B, descrito na seção 4.6.2, estão disponíveis nas figuras 20, 21, 22 e 23. Eles serão discutidos na seção 5.4. Para este cenário utilizou-se o controle ótimo para definir o perfil de velocidade de todos os participantes do comboio. Nas figuras abaixo temos representado um comboio composto por dois veículos, porém comboios formados por três e quatro veículos também foram simulados e serão discutidos a seguir.

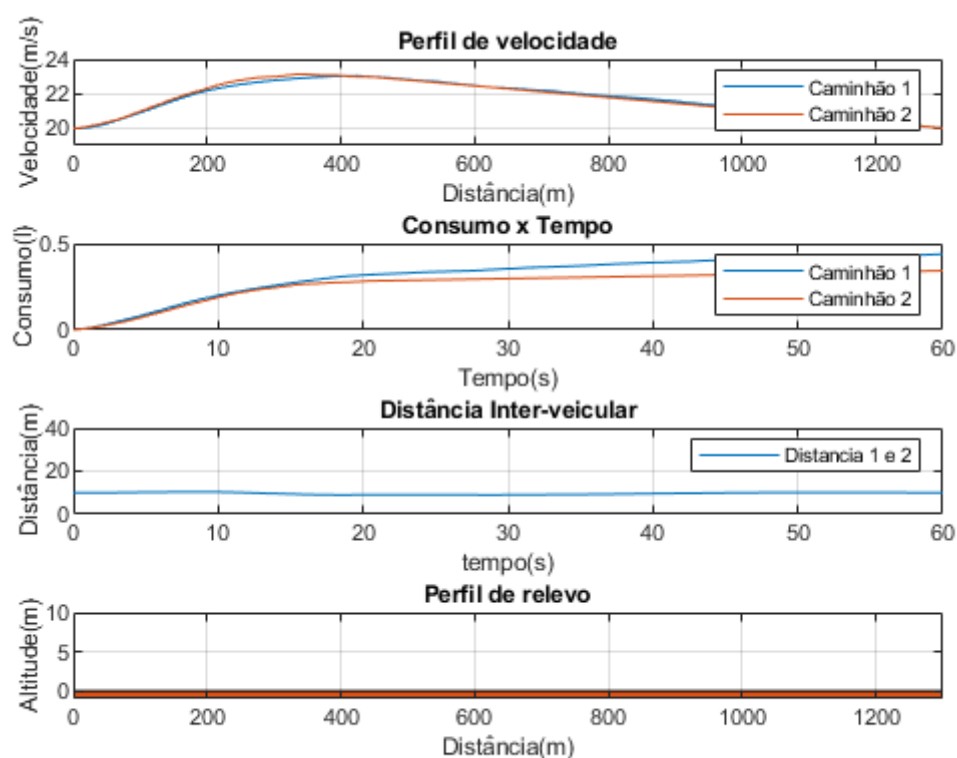
Os resultados apresentados evidenciam o perfil de velocidade ótimo ao longo da trajetória, que ao contrário do cenário A não são mais valores constantes. O consumo de ambos os veículos em função do tempo, que não são iguais devido à redução na força de resistência aerodinâmica no veículo seguidor. Também está presente a distância inter-veicular em função do tempo e o perfil altimétrico da trajetória simulada.

Figura 20 - Resultado cenário B – Trajetória 01



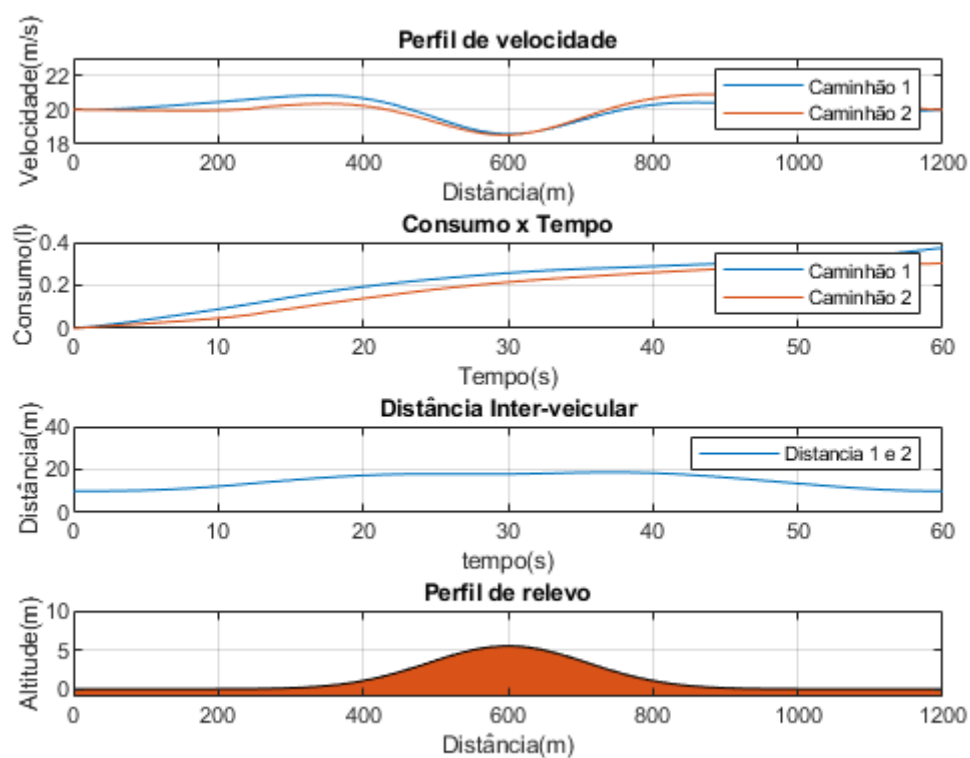
Fonte: Autor.

Figura 21 - Resultado cenário B – Trajetória 02



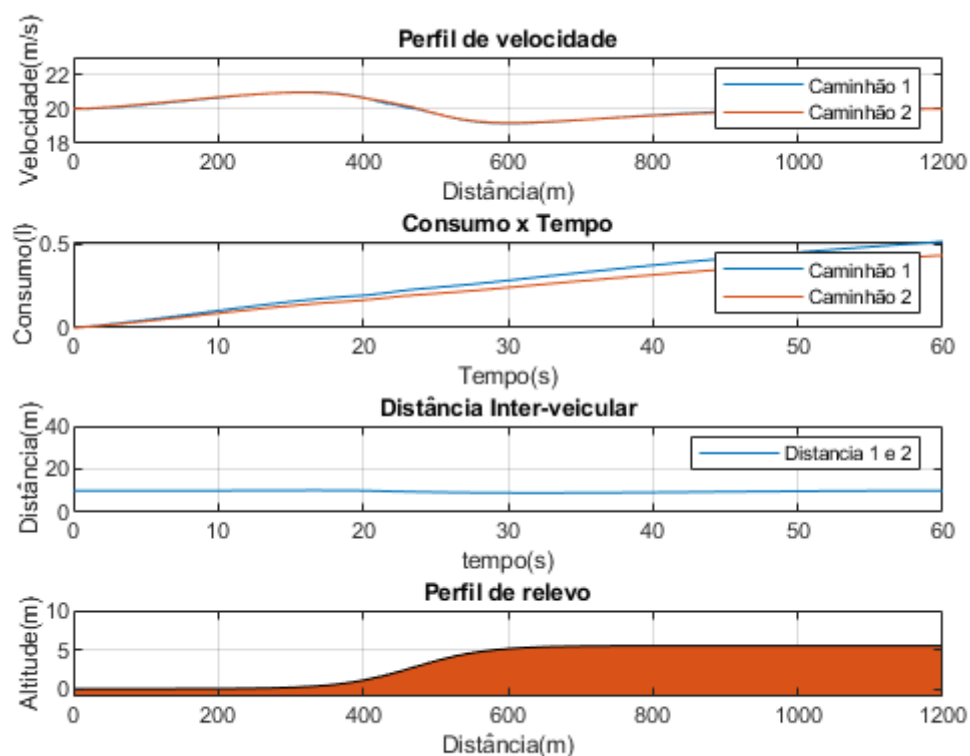
Fonte: Autor.

Figura 22 - Resultado cenário B – Trajetória 03



Fonte: Autor.

Figura 23 - Resultado cenário B – Trajetória 04



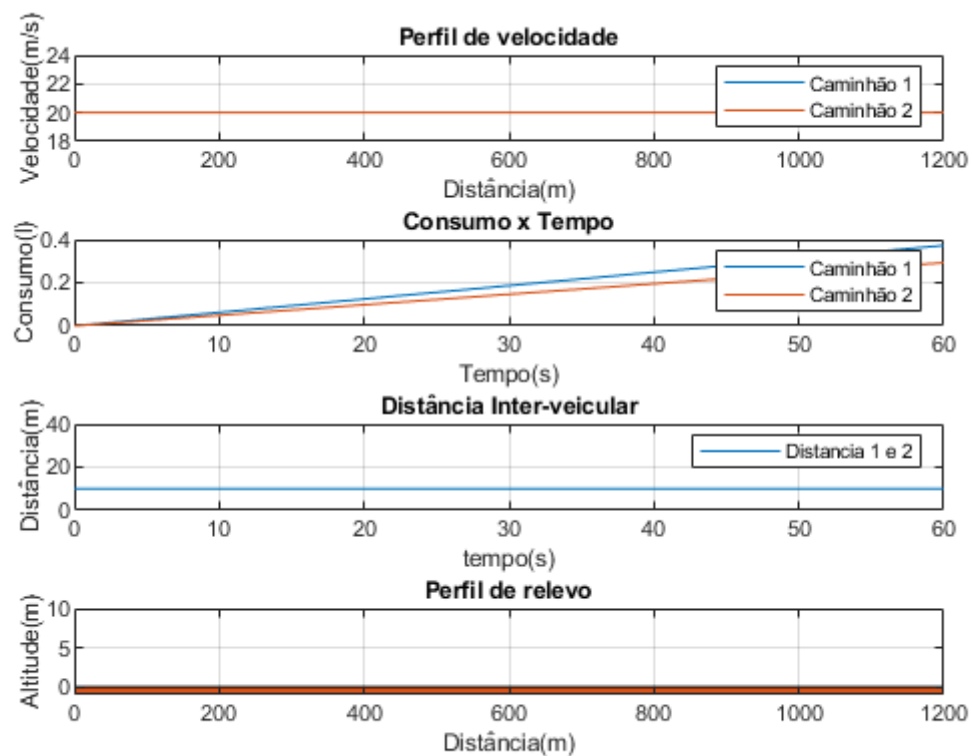
Fonte: Autor.

5.3 RESULTADOS CENÁRIO C

O cenário C inclui um veículo HDV na formação do comboio por meio do conceito de sugestão de velocidade. O comboio será formado por um HDV liderando a formação, seguido por CAVs, que por motivos de segurança optou-se por posicioná-los nesta sequência. A descrição deste cenário pode ser vista na seção 4.6.3. As Figuras 24, 25, 26 e 27 mostram os resultados de um comboio formado apenas por dois veículos e as figuras 28, 29, 30 e 31 para o comboio formado por quatro veículos, porém outras condições serão mostradas e discutidas na seção 5.4.

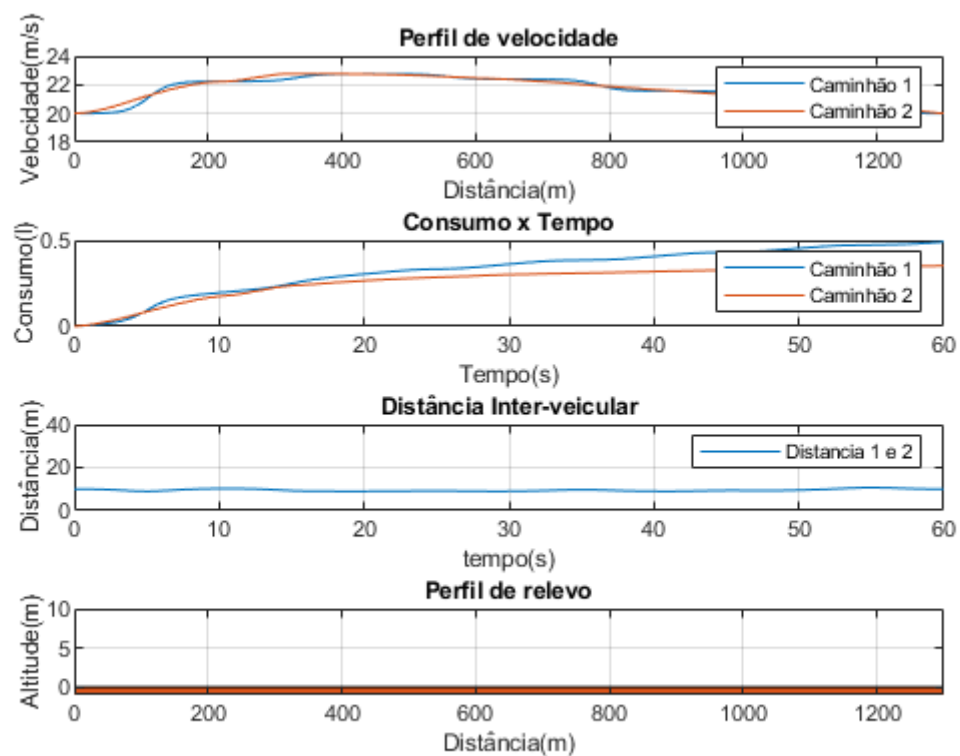
Nota-se que o perfil de velocidade e consumo são parecidos com o cenário B e que a distância inter-veicular se manteve baixa. Portanto, garantindo a estabilidade da formação.

Figura 24 - Resultado cenário C – Trajetória 01 – Dois veículos



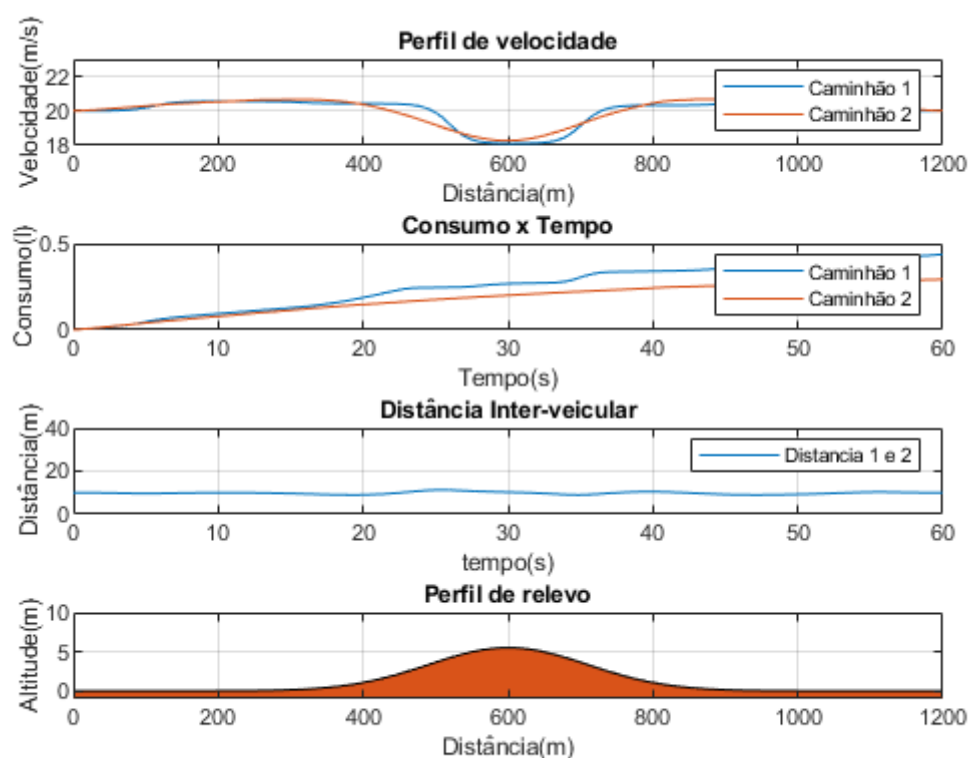
Fonte: Autor.

Figura 25 - Resultado cenário C – Trajetória 02 – Dois veículos



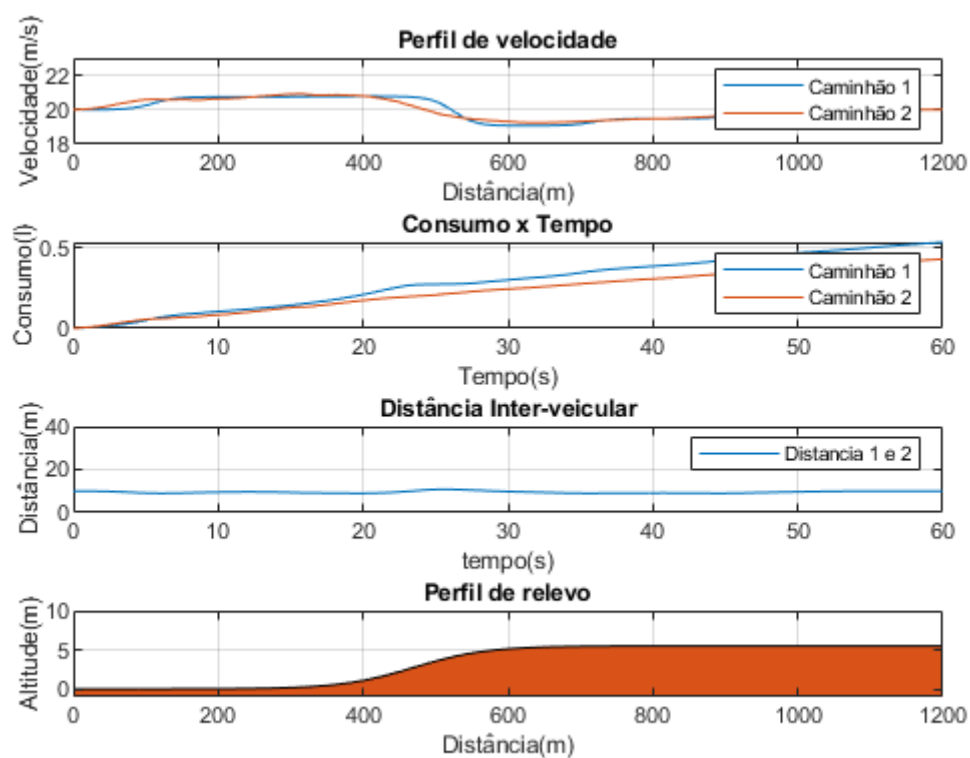
Fonte: Autor.

Figura 26 - Resultado cenário C – Trajetória 03 – Dois veículos



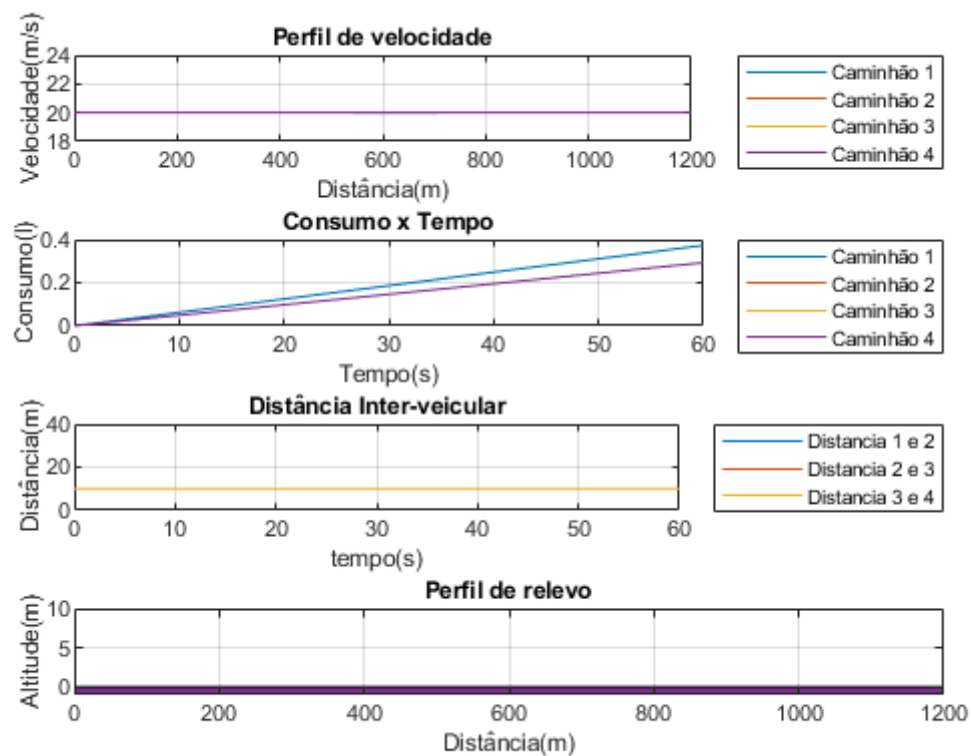
Fonte: Autor.

Figura 27 - Resultado cenário C – Trajetória 04 – Dois veículos



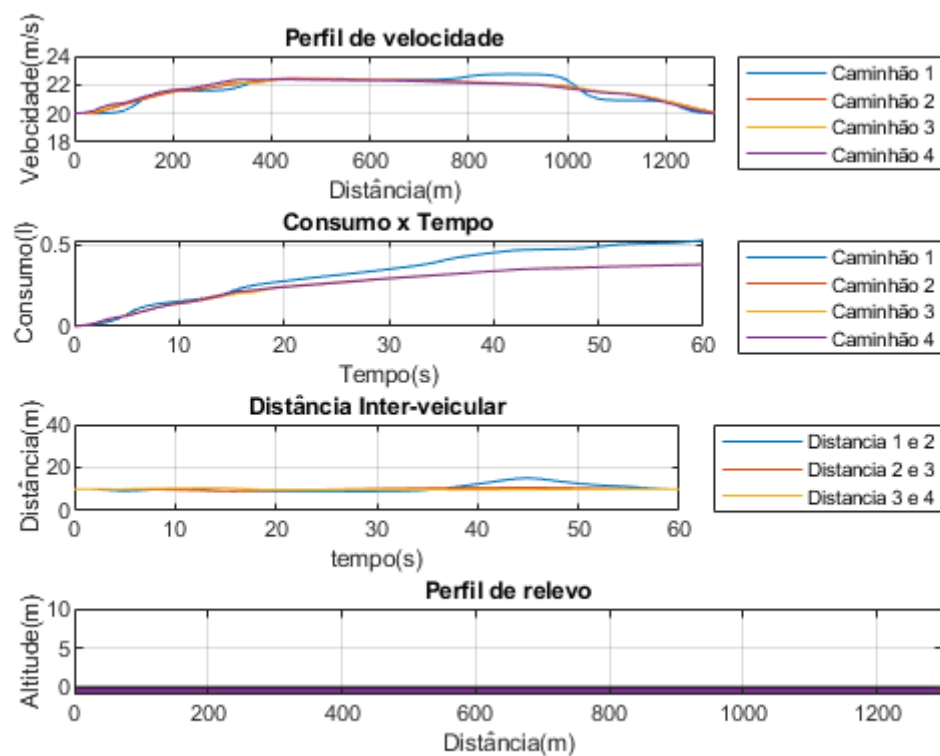
Fonte: Autor.

Figura 28 - Resultado cenário C – Trajetória 01 – Quatro veículos



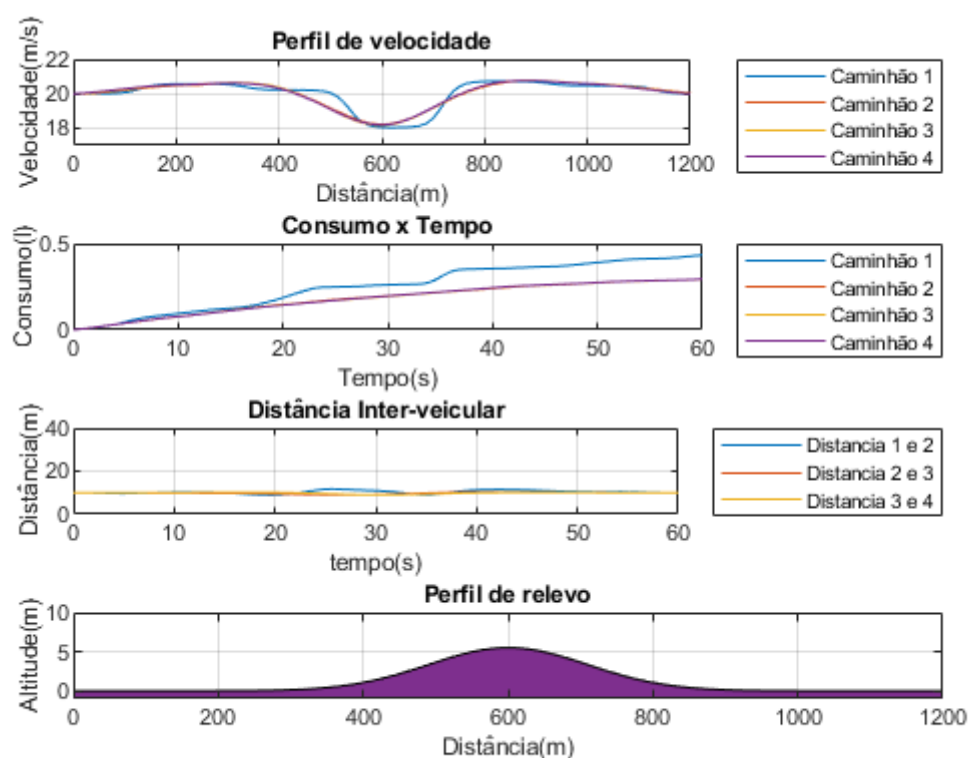
Fonte: Autor.

Figura 29 - Resultado cenário C – Trajetória 02 – Quatro veículos



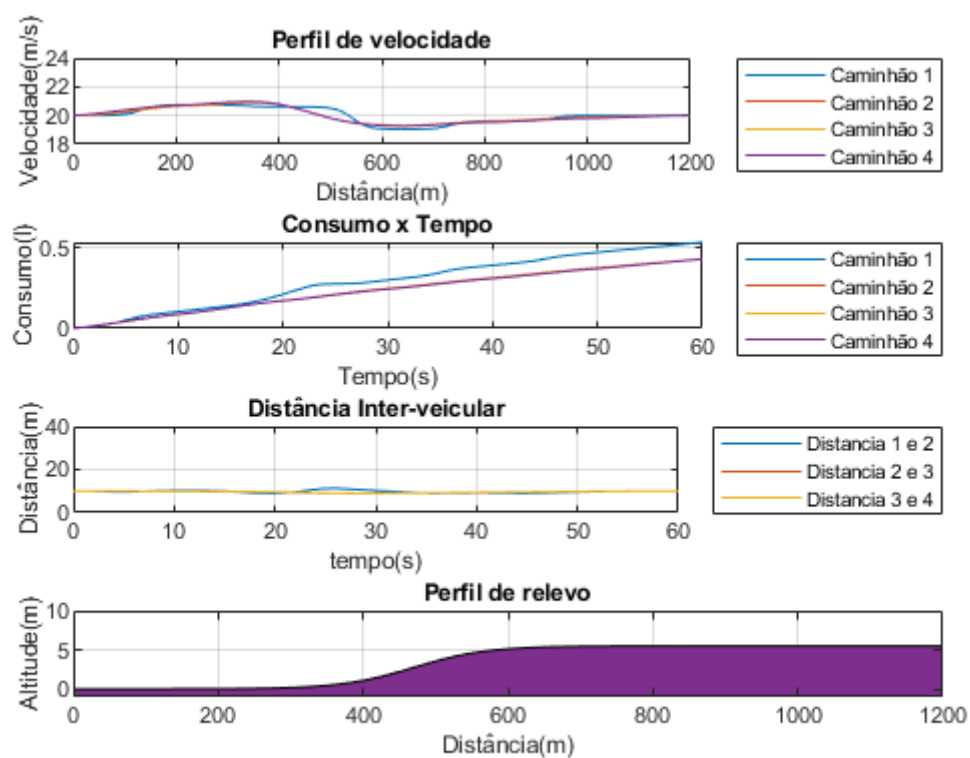
Fonte: Autor.

Figura 30 - Resultado cenário C – Trajetória 03 – Quatro veículos



Fonte: Autor.

Figura 31 - Resultado cenário C – Trajetória 04 – Quatro veículos



Fonte: Autor.

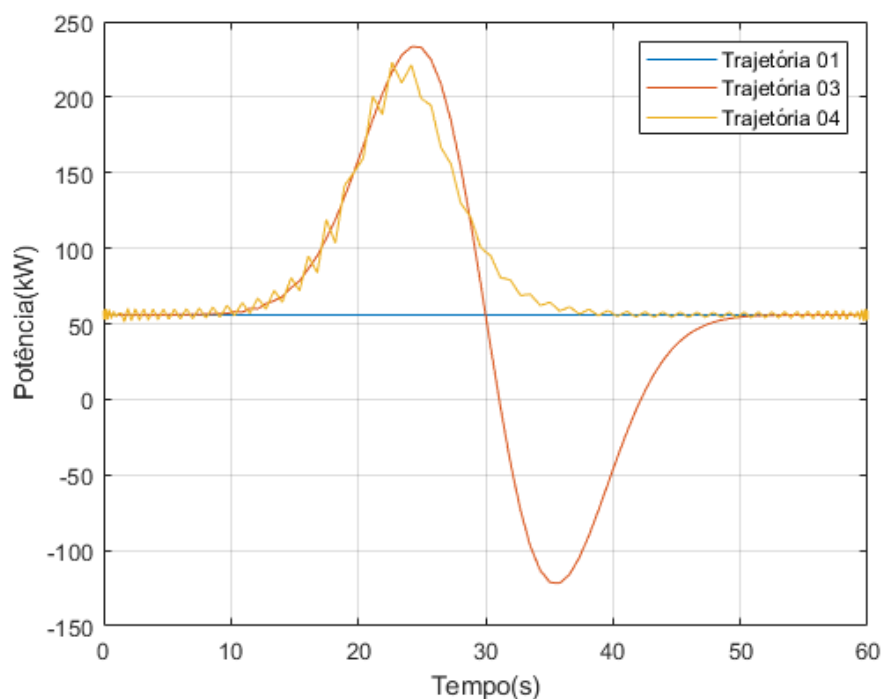
5.4 DISCUSSÕES

Os resultados mostrados para a trajetória 01 em todos os cenários apresentam os mesmos valores. O otimizador encontra como o mínimo consumo sendo obtido através da velocidade constante ao longo de todo o trajeto. Isto se dá pelas características desta trajetória e das restrições do problema, que são: O relevo ser plano. A aceleração no início da análise ser nula. A velocidade final ser igual a inicial. O deslocamento total que coincide a média da velocidade com as velocidades iniciais e finais.

As tabelas 6, 7 e 8 mostram que os consumos obtidos para o líder em todos os cenários são iguais (0,3732 l) independente da estratégia utilizada para a velocidade (controle de cruzeiro, perfil ótimo e sugestão). Nos cenários B e C, o consumo dos veículos seguidores é menor e nota-se que independentemente da posição destes veículos no comboio o valor é o mesmo (0,2928 l). Isto se dá pela redução das forças resistivas aerodinâmicas, causada pela menor distância inter-veicular,

A estratégia de controle de cruzeiro vista no cenário A resultou em velocidades constante nas trajetórias 01, 03 e 04. Isto foi possível pois a restrição de potência em todas estas trajetórias não foi violada ($\pm 350\text{kW}$), e podem ser vistas na Figura 32 e seus respectivos consumos podem ser visto na Tabela 6.

Figura 32 - Perfil de potência – Trajetória 01, 03 e 04 – Veículos líder



Fonte: Autor.

Tabela 6 - Consumo em litro cenário A

Trajectoria	Lider
01	0,3732
02	0,5320
03	0,4466
04	0,5138

Fonte: Autor

Na trajetória 02 o perfil de velocidade não resultou em um valor constante, pois violaria a restrições de distância total de 1300 m em 60 s. Por isto, o otimizador rapidamente aumentou a velocidade. Comparando o perfil de velocidades gerado para o cenário A com o cenário B, pode-se ver uma transição mais suave, resultando assim em uma redução no consumo de 17,3 % para o veículo líder. O cenário C apresenta um perfil de velocidades mais próximo ao perfil de B e tem um aumento no consumo em comparação com este perfil de 11,8 %, mas em comparação com o cenário A, a redução é de 7,6 %. Os consumos dos veículos seguidores ficaram próximos e nota-se um pequeno aumento comparando o cenário B com o C.

No cenário B, observa-se o menor valor de consumo entre todos os cenários. Nas trajetórias 03 e 04, para traspor mais facilmente os obstáculos, o otimizador opta por aumentar a velocidade para que a curva de consumo não sofra variações bruscas. Isto se torna mais aparente quando comparamos essas variações com o controle de cruzeiro.

Na Tabela 7 observam-se os valores de consumo para as análises considerando comboios formados por dois, três e quatro veículos. Nota-se que o consumo para os veículos seguidores pouco se altera quando aumentamos o tamanho do comboio.

Na Tabela 8 a seguir são ilustrados os resultados para o cenário C. Nele podemos ver um aumento no consumo do líder em relação ao cenário B, porém os consumos dos veículos seguidores foram muito próximos entre si e próximo ao valor ótimo do cenário B.

Pelas curvas apresentadas nas figuras 25, 26 e 27 nota-se que o tempo T_c de 10 s adotado foi adequado, pois dentro deste período foi possível atingir a velocidade sugerida.

A distância inter-veicular para todas as análises manteve-se dentro dos limites da restrição. E este resultado obteve seu máximo valor de 20 m na trajetória 03 do cenário B.

Tabela 7 - Consumo em litro cenário B

Trajatória	Lider	N=2	N=3	N=4
01	0,3732	0,2928		
02	0,4397	0,3427		
03	0,3744	0,3055		
04	0,5131	0,4313		
01	0,3732	0,2928	0,2928	
02	0,4395	0,3434	0,3450	
03	0,3747	0,3085	0,2965	
04	0,5130	0,4303	0,4305	
01	0,3732	0,2928	0,2928	0,2928
02	0,4400	0,3379	0,3371	0,3371
03	0,3743	0,2963	0,2933	0,2940
04	0,5129	0,4309	0,4328	0,4313

Fonte: Autor

Tabela 8 - Consumo em litro cenário C

Trajatória	Lider	N=2	N=3	N=4
01	0,3732	0,2928		
02	0,4914	0,3523		
03	0,4376	0,2932		
04	0,5362	0,4311		
01	0,3732	0,2928	0,2928	
02	0,4917	0,3627	0,3572	
03	0,4760	0,3001	0,2949	
04	0,5135	0,4319	0,4324	
01	0,3732	0,2928	0,2928	0,2928
02	0,7467	0,3858	0,3777	0,3774
03	0,4338	0,2944	0,2940	0,2942
04	0,5359	0,4314	0,4311	0,4311

Fonte: Autor

A formulação prevê que inúmeros veículos possam fazer parte do comboio, mas nota-se que quanto maior a quantidade maior é o tempo necessário para que o TOMLAB encontre a solução ótima. Além disto, não havendo uma faixa exclusiva para estes comboios a interferência de outros veículos externos é inevitável, fazendo com que a estabilidade na formação seja comprometida, portanto, não atingindo o consumo ótimo.

Em situações na qual o relevo é muito acidentado e o comboio longo, o uso do CACC se torna mais relevante. Ao traspor uma elevação na via, situações na qual o líder

esteja descendo enquanto os seguidores estejam subindo pode acontecer. O objetivo sendo descrito de forma cooperativa faz com que o líder não se distancie do grupo ao término do aclave. Isto pode ser observado nos gráficos de distância inter-veicular apresentados nas figuras 20 a 27.

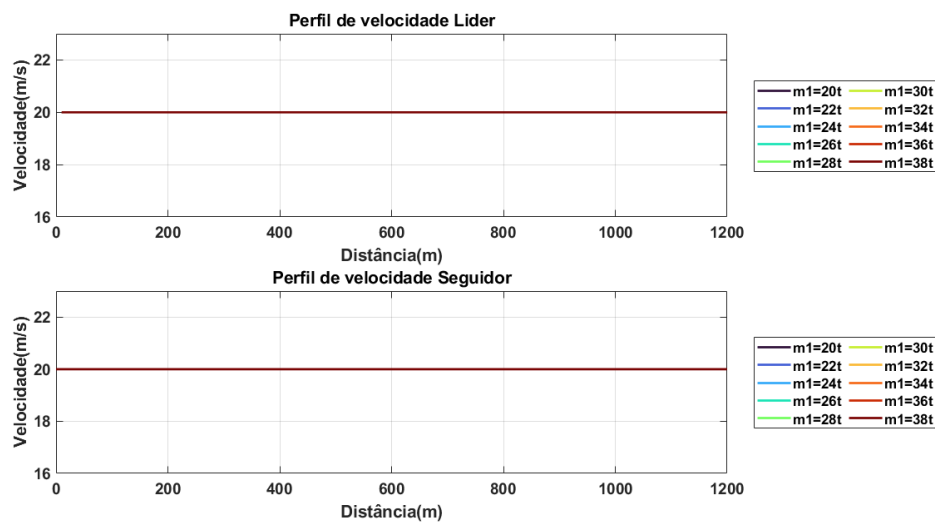
A análise de sensibilidade possibilita identificar quais parâmetros mais influenciam nos resultados. No presente trabalho os parâmetros massa do caminhão líder, altura e largura da trajetória 03 e inclinação da trajetória 04 serão avaliados, conforme seção 4.7.

Na Figura 33 observa-se a influência da massa m_1 na velocidade, na qual nota-se que os resultados estão sobrepostos. Portanto, a alteração da massa não causou nenhuma alteração na velocidade e para o relevo plano em condições de velocidade constante a maior massa (38 t) não foi suficiente para violar a restrição de potência de 350 kW. No consumo (Figura 34) nota-se que quanto maior a massa maior o consumo, sendo que para o veículo seguidor não houve alteração. Portanto, para a trajetória 01 o aumento de massa m_1 , dentro da faixa descrita, não causa influência no consumo do veículo seguidor.

O modelo da dinâmica longitudinal utiliza as forças de resistência ao rolamento, gravitacional e aerodinâmica como resistivas, sendo que apenas a força de resistência aerodinâmica não depende da massa do veículo. Portanto, o fato de aumentar a massa e manter a velocidade inalterada faz com que a força do trem de força seja maior e com isso o consumo aumenta.

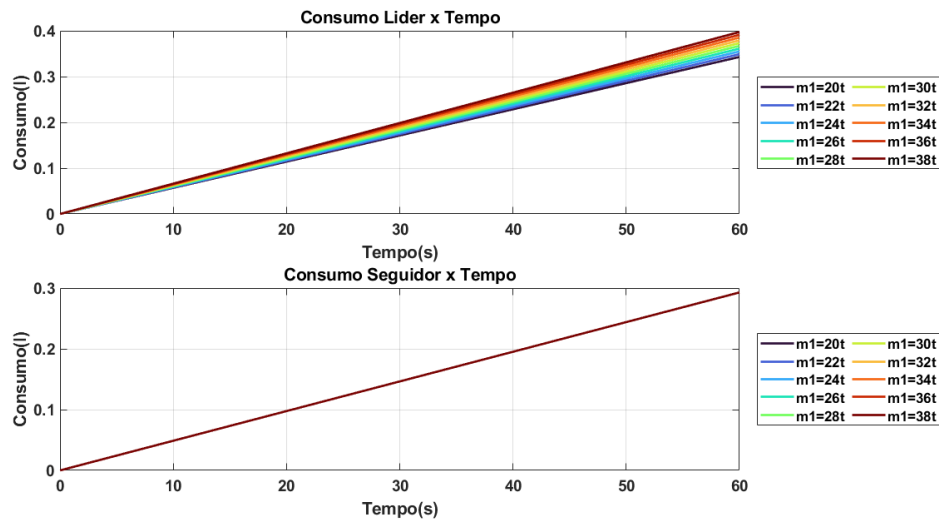
A distância inter-veicular não sofreu nenhuma alteração, pois as velocidades não foram alteradas com a variação dos parâmetros descritos na seção 4.7, estes resultados estão apresentados na Figura 35.

Figura 33 - Análise sensibilidade – Trajetória 01 – Velocidade



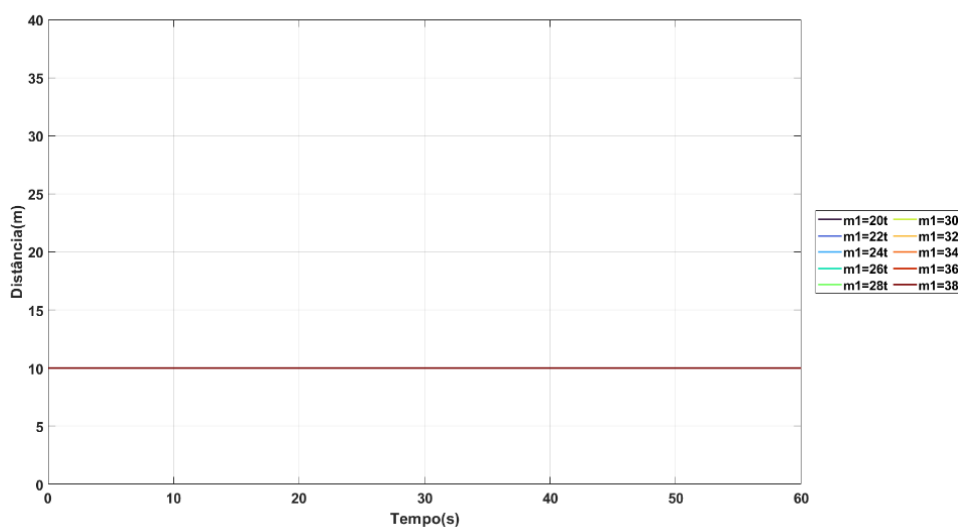
Fonte: Autor.

Figura 34 - Análise Sensibilidade – Trajetória 01 – Consumo



Fonte: Autor.

Figura 35 - Análise sensibilidade – Trajetória 01 – Distância inter-veicular

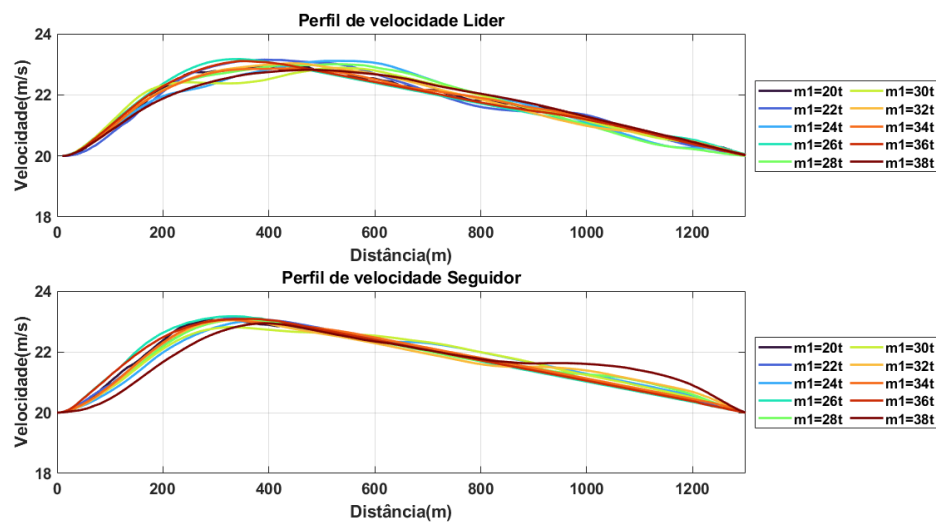


Fonte: Autor.

Para a trajetória 02 observa-se uma grande dispersão nos resultados de velocidade (Figura 36), o que indica que a massa teve grande influência neste parâmetro e por consequência no consumo (Figura 37). Nota-se que as linhas de consumo do caminhão líder estão mais afastadas que as linhas do caminhão seguidor, sendo assim a variação da massa do veículo líder tem uma influência maior nele mesmo.

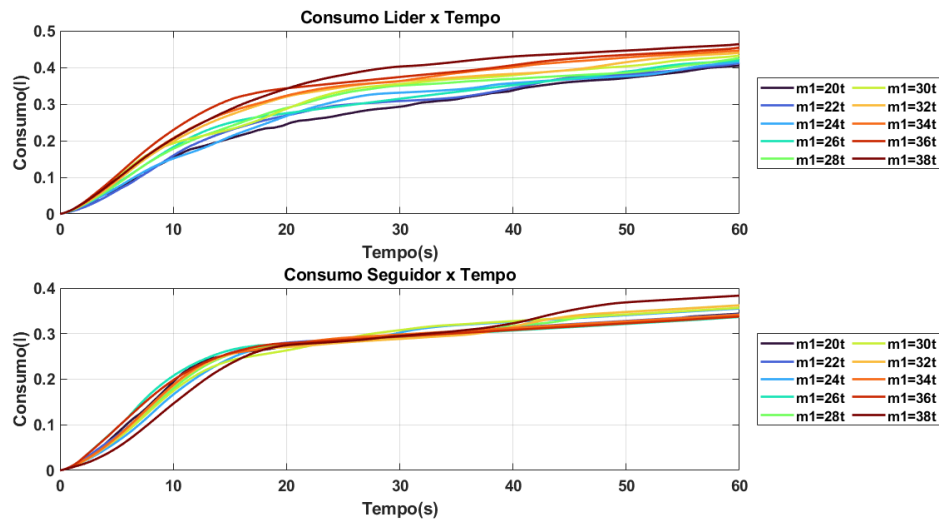
A alteração no consumo do seguidor se dá pela mudança no perfil de velocidade do líder, no qual o otimizador busca manter a formação do comboio e consequentemente alterando a velocidade do seguidor. Esta mudança no perfil de velocidade faz com que a distância inter-veicular mude para cada simulação. A Figura 38 mostra os resultados para as diferentes configurações e nota-se que apesar da diferença entre valores nas análises ela permanece abaixo dos 20 m.

Figura 36 - Análise sensibilidade – Trajetória 02 – Velocidade



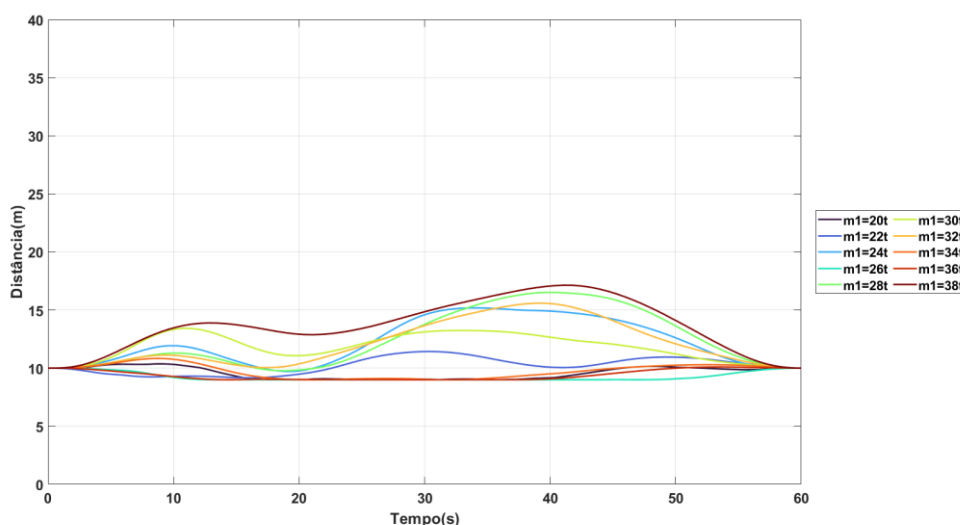
Fonte: Autor.

Figura 37 - Análise sensibilidade – Trajetória 02 – Consumo



Fonte: Autor.

Figura 38 - Análise sensibilidade – Trajetória 02 – Distância inter-veicular



Fonte: Autor.

Para as trajetórias 03 e 04 a análise será feita pelas figuras 39, 40, 41 e 42, na qual as inclinações das retas apresentadas indicam o grau de influência dos parâmetros alterados no consumo.

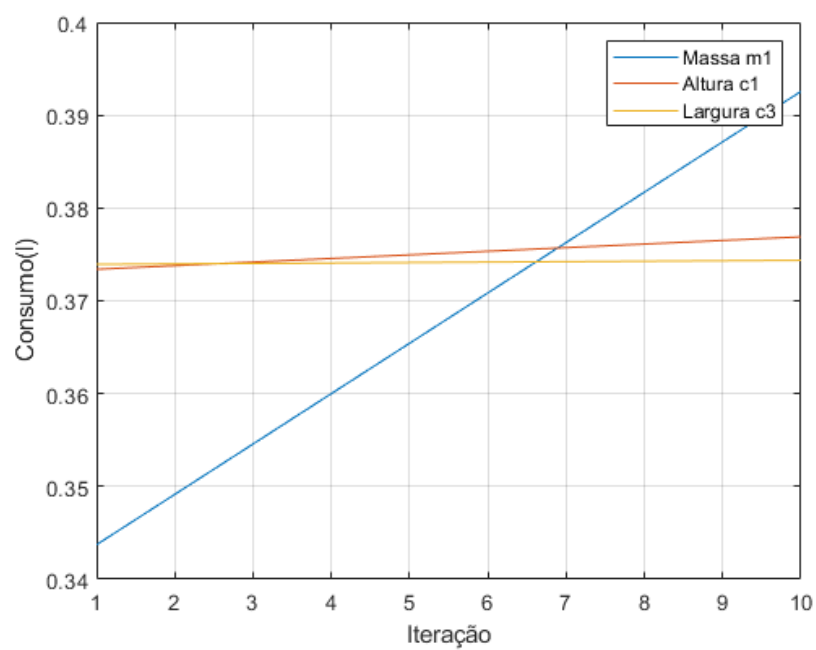
Nas figuras 39 e 40 os resultados para a trajetória 03 serão apresentadas. Para o caminhão líder nota-se que a curva em azul (Massa m_1) tem a maior inclinação, indicando que ela tem a maior influência no consumo, seguida da altura do relevo em laranja. A largura do relevo tem pouca influência, pois a inclinação desta curva é praticamente nula.

Para o veículo seguidor a inclinação na reta do parâmetro altura da trajetória apresenta a maior inclinação, portanto representa a maior influência no consumo, seguido da largura do relevo e por último a massa do veículo líder. Conclui-se que, as características do veículo líder pouco influenciam no consumo dos veículos seguidores.

Para a trajetória 04 os resultados serão apresentados nas figuras 41 e 42. Para o veículo líder notamos o mesmo comportamento visto na trajetória 03, no qual a massa apresenta uma grande influência enquanto o relevo pouco influencia no consumo.

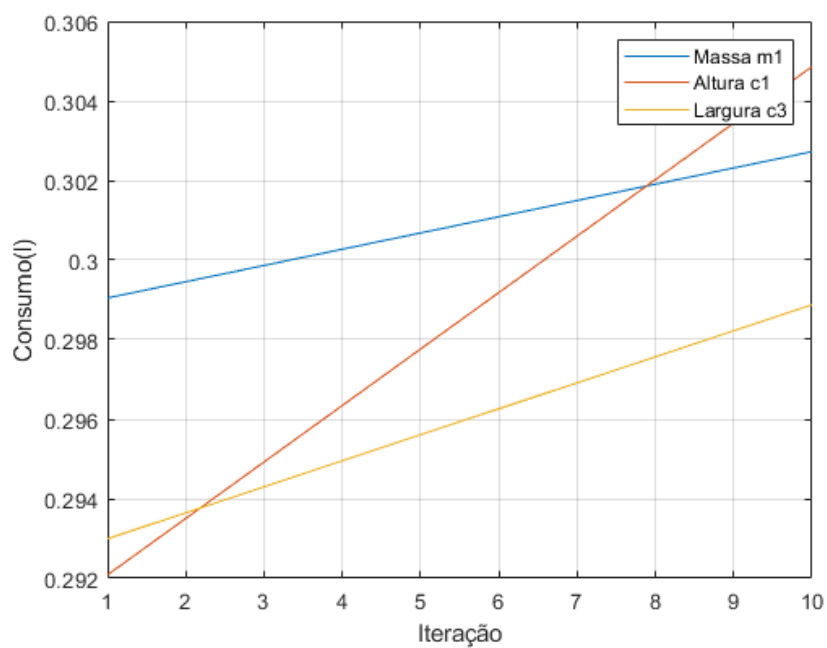
Para o veículo seguidor, nota-se que o aumento da massa do líder faz com que o seguidor consuma menos combustível, pois todo o trajeto é feito com uma menor velocidade. Entretanto, quanto maior a inclinação do relevo maior também será o consumo, indicado assim pela curva laranja que representa a maior influência no consumo do seguidor.

Figura 39 - Análise sensibilidade – Trajetória 03 – Líder



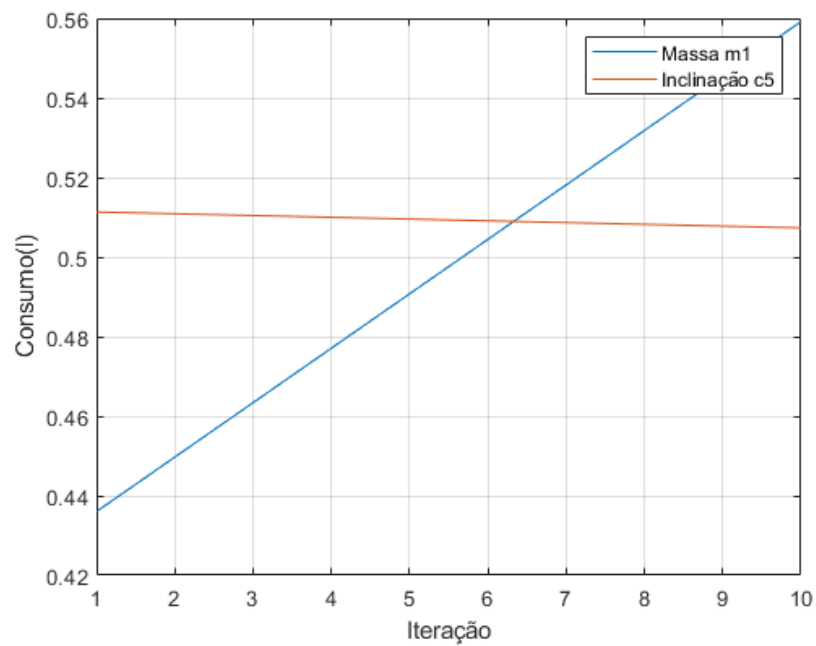
Fonte: Autor.

Figura 40 - Análise sensibilidade – Trajetória 03 – Seguidor



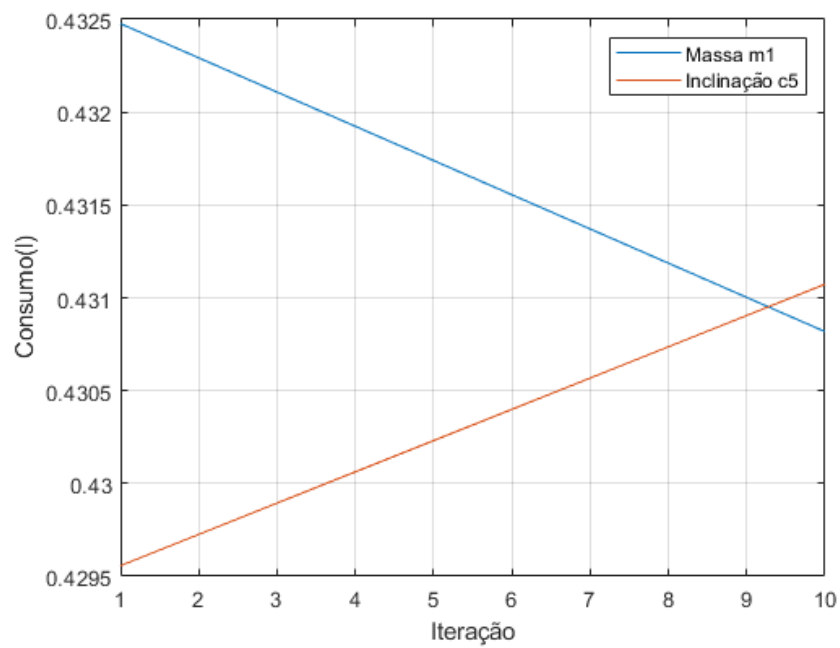
Fonte: Autor.

Figura 41 - Análise sensibilidade – Trajetória 04 – Líder



Fonte: Autor.

Figura 42 - Análise sensibilidade – Trajetória 04 – Seguidor



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a inclusão de veículos que não dispõem de tecnologia autônoma em um comboio. Este veículo denominado por *Human-Driven Vehicle* (HDV) estaria na posição de líder do comboio, enquanto os seguidores seriam os *Connected and Automated Vehicle* (CAV). A escolha da posição do HDV se dá por motivos de segurança e a estratégia adotada para esta inclusão foi a de sugestão de velocidade.

Os CAVs seguem a estratégia de controle ótimo para o cálculo do perfil de velocidade, na qual a função custo é definida pelo consumo de combustível deles e o objetivo é minimizar este valor. O consumo de outras estratégias de velocidade como: Controle de cruzeiro e controle ótimo, serão utilizadas para comparar o consumo de combustível.

A trajetória 01 mostra-se igual para todos os cenários e apresenta a velocidade constante como resultado ótimo. Isto está de acordo com Chang e Morlok (2005), que dizem que velocidade constante é o perfil ótimo visando a economia de combustível em condições de rodovia plana ou com poucas inclinações.

Na configuração do software TOMLAB esta trajetória foi de suma importância para o entendimento dos chutes iniciais do otimizador. São necessários três tipos para a análise em questão. O deslocamento, velocidade e força F . Conclui-se que para o chute inicial dos deslocamentos, utilizar a velocidade média do trajeto multiplicado pelo tempo, resulta nos melhores resultados. Para as velocidades, o mesmo valor adotado como condição inicial para as simulações foi adequado. Para as forças iniciais foi feito um cálculo considerando as seguintes hipóteses: Veículo trafegando com velocidade constante e relevo plano. Sendo assim, o valor para força inicial dependia apenas da massa do veículo simulado, a posição no comboio e a velocidade inicial. Estes valores substituídos nas equações 5 para o líder e 8 para os seguidores, resultaram nas forças iniciais utilizadas.

Nas trajetórias 03 e 04 observou-se que o perfil ótimo não é uma velocidade constante e para transpor uma elevação no relevo, um aumento na velocidade se faz necessário para que não haja uma diferença brusca nas curvas de consumo. O resultado de distância inter-veicular foi utilizado como um critério para o resultado, sendo que em algumas situações esta distância chegou próximo ao limite superior da restrição. Interpretou-se este resultado como um mínimo local da otimização e para um melhor

resultado foi alterado o valor de critério de convergência da análise. Reduzindo este valor para $1,0 \times 10^{-6}$, o que resultou em valores de distância inter-veicular próximo ao limite inferior para todos os cenários e trajetos. Portanto, este valor foi adotado para todas as análises.

A trajetória 02 se mostrou mais desafiadora no sentido de convergência das análises de otimização, mas os ajustes dos chutes iniciais e critério de convergência foram suficientes para que todas convergissem.

Os resultados dos esforços de controle do TOMLAB foram analisados e notam-se curvas com um ruído excessivo. Este ruído não foi tratado no presente trabalho, mas estudos foram realizados para avaliar a sua influência.

Um comparativo entre a integral do consumo instantâneo de uma análise com os esforços de controle ruidosos e outra com uma curva suavizada foi realizado, resultando em valores idênticos. Portanto, conclui-se que o ruído no esforço de controle é uma característica da formulação matemática utilizada pelo aplicativo, sem influência no resultado.

As análises foram realizadas considerando comboios homogêneos em suas características dinâmicas. Entretanto, a análise de sensibilidade contém informações importantes para a compreensão de comboios heterogêneos em suas configurações, sendo que ela mostra que a massa de um veículo pouco interfere no consumo dos outros veículos do comboio. Em suma, a variação no consumo se dá pela menor velocidade em que o comboio trafega ou pelos diferentes tipos de relevo.

Pela distância inter-veicular do cenário C foi possível concluir que inserir um HDV como líder do comboio pouco influenciou na estabilidade dele. Isso pode ser observado nas figuras 24 a 31, no qual as distâncias ficaram próximas ao limite inferior de 10 m.

A diferença média percentual no consumo do líder pode ser vista na Tabela 9. Conclui-se que, o cenário B, no qual o perfil de velocidades é ótimo, tem o melhor desempenho, seguido do cenário C, e ainda é possível observar uma redução média no consumo de 1,0% apenas no líder.

Tabela 9 - Diferença média percentual do consumo (Líder)

Trajetória	Cenários (Líder)		
	A	B	C
01	0,00	0,00	0,00
02	0,00	-17,35	-7,58
03	0,00	-16,17	-2,02
04	0,00	-0,16	4,30

Fonte: Autor.

Considerando a hipótese de que fora do comboio um caminhão trafega utilizando a estratégia de controle de cruzeiro, pode-se utilizar o cenário A como referência para o consumo dos veículos seguidores. O comparativo da diferença média percentual do consumo dos veículos seguidores pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10 - Diferença média percentual do consumo (Seguidores)

Trajetória	Cenários (Seguidores)		
	A	B	C
01	0,00	-21,54	-21,54
02	0,00	-35,58	-32,34
03	0,00	-32,27	-34,12
04	0,00	-16,06	-16,10

Fonte: Autor.

No qual em média para o cenário B os veículos seguidores são 26,9% mais econômicos que um veículo trafegando sozinho utilizando somente a estratégia de controle de cruzeiro. Os veículos seguidores do cenário C apresentam a mesma diferença percentual (26,9%). Portanto a inclusão de veículos HDV na formação do comboio se mostrou eficiente na economia, sendo que o consumo dos seguidores não é afetado e o do líder pouco se altera comparado com a estratégia de controle de cruzeiro.

O método utilizado se mostrou adequado para entender os benefícios da sugestão de velocidade para veículos que não dispõem da tecnologia necessária para formarem um comboio de forma autônoma.

A seguir, uma lista com sugestões de trabalhos futuros foi criada:

- a) As sugestões poderiam ser enviadas para estes veículos através de um dispositivo dedicado ou até mesmo por um aparelho de telefonia móvel através de um aplicativo. Avaliar o melhor método e possíveis atrasos no envio de informações e o impacto disto no comboio, se faz necessário.

- b) O estudo para diferentes probabilidades irá reforçar os benefícios do método, no qual espera-se que o consumo aumente para ambos os veículos ao passo que as sugestões deixem de ser seguidas.
- c) Os estudos foram realizados considerando a estabilidade na formação. Situações em que o comboio sofra influência de agentes externos como acidentes, outros veículos e problemas na via, desestabilizando a formação e necessitam de aprofundamento.
- d) A inclusão de veículos HDV se mostrou possível pela formulação sugerida, mas com o intuito de ampliar ainda mais as possibilidades de veículos que não disponham totalmente das tecnologias necessárias para formar o comboio de forma autônoma, a inclusão de veículos que disponham apenas do ACC poderia ser estudada. Esta formação poderia conter veículos HDV sem nenhuma tecnologia de controle de velocidade como líder, o primeiro veículo seguidor um CAV, responsável por sugerir velocidades ao líder e os seguintes HDVs que disponham de ACC.

REFERÊNCIAS

ALAM, Assad. Heavy-Duty Vehicle Platooning for Sustainable Freight Transportation: a cooperative method to enhance safety and efficiency. **IEEE Control Systems**, [S.L.], v. 35, n. 6, p. 34-56, dez. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mcs.2015.2471046>.

ALAM, Assad; GATTAMI, Ather; JOHANSSON, Karl H.; TOMLIN, Claire J.. Guaranteeing safety for heavy duty vehicle platooning: safe set computations and experimental evaluations. **Control Engineering Practice**, [S.L.], v. 24, p. 33-41, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.11.003>.

AXELSSON, Jakob. Safety in Vehicle Platooning: a systematic literature review. **IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems**, [S.L.], v. 18, n. 5, p. 1033-1045, maio 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2016.2598873>.

BABY, Tinu Vellamattathil; BHATTACHARYYA, Viranjan; SHAHRI, Pouria Karimi; GHASEMI, Amir H.; HOMCHAUDHURI, Baisravan. A suggestion-based fuel efficient control framework for connected and automated vehicles in heterogeneous urban traffic. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S.L.], v. 134, p. 103476, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2021.103476>.

BETTS, John T. **Practical methods for optimal control and estimation using nonlinear programming**. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010.

BONNET, Christophe; FRITZ, Hanz. Fuel consumption reduction in a platoon: Experimental results with two electronically coupled trucks at close spacing. In: SAE Technical Paper. [S.L.]: SAE International, 2000. P. 9.

BROWAND, F., McArthur, J., & Radovich, C. (2004). Fuel Saving Achieved in the Field Test of Two Tandem Trucks. **UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology**. <https://escholarship.org/uc/item/29v570mm>

CHAN, Eric. SARTRE automated platooning vehicles. **Towards innovative freight and logistics**, v. 2, p. 137-150, 2016.

CHANG, David J.; MORLOK, Edward K.. Vehicle Speed Profiles to Minimize Work and Fuel Consumption. **Journal Of Transportation Engineering**, [S.L.], v. 131, n. 3, p. 173-182, mar. 2005. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2005\)131:3\(173\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2005)131:3(173)).

CHIN, Shih-Miao et al. Temporary losses of highway capacity and impacts on performance: Phase 2. United States. Dept. of Energy. **Office of Scientific and Technical Information**, 2004.

Control for Fuel-Efficient and Safe Heavy-Duty Vehicle Platooning. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, IEEE, v. 25, n. 1, p. 12–28, 2017.

CUI, Lian; JIANG, Huifu; PARK, B. Brian; BYON, Young-Ji; HU, Jia. Impact of Automated Vehicle Eco-Approach on Human-Driven Vehicles. **IEEE Access**, [S.L.], v. 6, p. 62128-62135, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2018.2874761>.

D'AMATO, Antonio; DONATANTONIO, Fabrizio; ARSIE, Ivan; PIANESE, Cesare. Development of a Cruise Controller Based on Current Road Load Information with Integrated Control of Variable Velocity Set-Point and Gear Shifting. Sae Technical Paper Series, [S.L.], 28 mar. 2017. SAE International. <http://dx.doi.org/10.4271/2017-01-0089>.

DIFILIPPO, Gianvito; FANTI, Maria Pia; FIUME, Giambattista; MANGINI, Agostino Marcello; MONSEL, Nicolas. A Cloud Optimizer for Eco Route Planning of Heavy Duty Vehicles. **2018 IEEE Conference On Decision And Control (Cdc)**, [S.L.], p. 7142-7147, dez. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/cdc.2018.8619149>.

EILERS, Soenke; MARTENSSON, Jonas; PETTERSSON, Henrik; PILLADO, Marcos; GALLEGOS, David; TOBAR, Marta; JOHANSSON, Karl Henrik; MA, Xiaoliang; FRIEDRICHS, Thomas; BOROJENI, Shadan Sadeghian. COMPANION -- Towards Co-operative Platoon Management of Heavy-Duty Vehicles. **2015 IEEE 18Th International Conference On Intelligent Transportation Systems**, [S.L.], p. 1267-1273, set. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/itsc.2015.208>.

Xiaoliang; FRIEDRICHS, Thomas; BOROJENI, Shadan Sadeghian. COMPANION - Towards Co-operative Platoon Management of Heavy-Duty Vehicles. **2015 Ieee 18Th International Conference On Intelligent Transportation Systems**, [S.L.], p. 1267-1273, set. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/itsc.2015.208>.

FLEURY, Agenor; ACKERMANN, Marko; LEONARDI, Fabrizio; MENDES, André de Souza. Heavy-duty Truck Platooning: a review. **Proceedings Of The 24Th Abcm International Congress Of Mechanical Engineering**, [S.L.], jan. 2017. ABCM. <http://dx.doi.org/10.26678/abcm.cobem2017.cob17-0843>.

FLEURY, Paulo Fernando. Terceirização logística no Brasil. Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: Planejamento do fluxo de produtos e dos recursos. São Paulo: Editora Atlas, p. 313-324, 2003.

FRITZ, Hans et al. CHAUFFEUR assistant a driver assistance system for commercial vehicles based on fusion of advanced ACC and lane keeping, p. 495–500, 2004

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: SAE International, 1992. P. 97–120

GUZZELLA, Lino; SCIARRETTA, Antonio. **Vehicle propulsion systems: Introduction to modeling and optimization**. second edition. [S.L.]: Springer, 2007.

HELLSTRÖM, Erik et al. Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. **Control Engineering Practice**, v. 17, n. 2, p. 245-254, 2009.

HERMAN, Ivo; MARTINEC, Dan; HURAK, Zdenek; SEBEK, Michael. Nonzero Bound on Fiedler Eigenvalue Causes Exponential Growth of H-Infinity Norm of Vehicular Platoon. **Ieee Transactions On Automatic Control**, [S.L.], v. 60, n. 8, p. 2248-2253, ago. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tac.2014.2366980>.

HUANG, Yuhang; NG, Elvin C.y.; ZHOU, John L.; SURAWSKI, Nic C.; CHAN, Edward F.C.; HONG, Guang. Eco-driving technology for sustainable road transport: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 93, p. 596-609, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.030>.

KAMAL, Md Abdus Samad et al. Ecological vehicle control on roads with up-down slopes. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, p. 783–794, 2011.

KARAGIANNIS, Georgios; ALTINTAS, Onur; EKICI, Eylem; HEIJENK, Geert; JARUPAN, Boangoat; LIN, Kenneth; WEIL, Timothy. Vehicular Networking: a survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. **Ieee Communications Surveys & Tutorials**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 584-616, 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/surv.2011.061411.00019>.

KOUKOU MIDIS, Emmanouil; PEH, Li-Shiuan; MARTONOSI, Margaret Rose. SignalGuru. **Proceedings Of The 9Th International Conference On Mobile Systems, Applications, And Services - Mobisys '11**, [S.L.] 2011. ACM Press. <http://dx.doi.org/10.1145/1999995.2000008>.

KUNZE, Ralph et al. Automated Truck Platoons on Motorways – A Contribution to the Safety on. **Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2009/2010.**: Springer Berlin Heidelberg, 2011. P. 415–426.

LEE, Taeyoung; SON, Joonwoo. Relationships between Driving Style and Fuel Consumption in Highway Driving. **Sae Technical Paper Series**, [S.L.], 6 out. 2011. SAE International. <http://dx.doi.org/10.4271/2011-28-0051>.

LI, Shengbo Eben; GUO, Qiangqiang; XIN, Long; CHENG, Bo; LI, Keqiang. Fuel-Saving Servo-Loop Control for an Adaptive Cruise Control System of Road Vehicles With Step-Gear Transmission. **IEEE Transactions On Vehicular Technology**, [S.L.], v. 66, n. 3, p. 2033-2043, mar. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tvt.2016.2574740>.

LIANG, Kuo Yun; MÅRTENSSON, Jonas; JOHANSSON, Karl H. Experiments on platoon formation of heavy trucks in traffic. **IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems**, Proceedings, ITSC, p. 1813–1819, 2016.

LIANG, Kuo Yun; MÅRTENSSON, Jonas; JOHANSSON, Karl H. Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation for Fuel Efficiency. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 4, p. 1051–1061, 2016.

LU, X.y.; SHLADOVER, S.; HEDRICK, J.K.. Heavy-duty truck control: short inter-vehicle distance following. **Proceedings Of The 2004 American Control Conference**, [S.L.], p. 4722-4727, 2004. IEEE. <http://dx.doi.org/10.23919/acc.2004.1384058>.

MAHLER, Grant; VAHIDI, Ardalan. An Optimal Velocity-Planning Scheme for Vehicle Energy Efficiency Through Probabilistic Prediction of Traffic-Signal Timing. **Ieee Transactions On Intelligent Transportation Systems**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 2516-2523, dez. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2014.2319306>.

MASIKOS, Michail; DEMESTICHAS, Konstantinos; ADAMOPOULOU, Evgenia; THEOLOGOU, Michael. Energy-efficient routing based on vehicular consumption predictions of a mesoscopic learning model. **Applied Soft Computing**, [S.L.], v. 28, p. 114-124, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.11.054>.

MENDES, Andre de Souza. **Estratégia ótima de coordenação de caminhões para formação de comboios em rodovias**. 2020. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, São Paulo, 2020.

MENSING, Felicitas; BIDEAUX, Eric; TRIGUI, Rochdi; TATTEGRAIN, Helene. Trajectory optimization for eco-driving taking into account traffic constraints. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S.L.], v. 18, p. 55-61, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2012.10.003>.

MOSER, Dominik; SCHMIED, Roman; WASCHL, Harald; RE, Luigi del. Flexible Spacing Adaptive Cruise Control Using Stochastic Model Predictive Control. **Ieee Transactions On Control Systems Technology**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 114-127, jan. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tcst.2017.2658193>.

NANNI, Bruno Baeta. **Estudo da Minimização do Consumo de Combustível em Comboio de Veículos Pesados por Meio da Otimização**. 2020. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2020.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA: Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e Suas Implicações para as Metas de Clima do Brasil. [S. I.], 2020. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_8/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf. Acesso em: 15 ago. 2022.

OECD/International Energy Agency. Technology Roadmap—Fuel Economy of Road Vehicles. Paris, France: IEA Publications, 2012.

OECD/International Transport Forum, International Transport Outlook 2013: Funding Transport. Paris, France: OECD Publishing/ITF, 2013.

OLIVEIRA, Celso Amorim Bueno. **Verificação do potencial de economia de energia no setor de transporte rodoviário brasileiro através da formação de comboios de**

caminhões. Orientador: André de Souza Mendes, 2019. Relatório de iniciação científica – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2019.

Oliver Wendell Holmes Sr. Disponível em:

https://www.pensador.com/autor/oliver_wendell_holmes_sr/. Acesso em: 03 dez. 2022.

OZATAY, Engin; ONORI, Simona; WOLLAEGGER, James; OZGUNER, Umit; RIZZONI, Giorgio; FILEV, Dimitar; MICHELINI, John; CAIRANO, Stefano di. Cloud-Based Velocity Profile Optimization for Everyday Driving: a dynamic-programming-based solution. **IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 2491-2505, dez. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2014.2319812>.

RAJAMANI, Rajesh. Adaptive Cruise Control. In: **ENCYCLOPEDIA OF SYSTEMS AND CONTROL**. London, UK: Springer London, 2015.

RIOS-TORRES, Jackeline; MALIKOPOULOS, Andreas A.. Impact of Partial Penetrations of Connected and Automated Vehicles on Fuel Consumption and Traffic Flow. **IEEE Transactions On Intelligent Vehicles**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 453-462, dez. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tiv.2018.2873899>.

RUTQUIST, Per E.; EDVALL, Marcus M. **PROPT - Matlab Optimal Control Software**. [S.l.: s.n.], 2010. Acesso em: 28 nov. 2022. Disponível em: <https://tomopt.com/docs/TOMLAB_PROPT.pdf>

SANGUINETTI, Angela; KURANI, Ken; DAVIES, Jamie. The many reasons your mileage may vary: toward a unifying typology of eco-driving behaviors. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S.L.], v. 52, p. 73-84, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.005>.

SHLADOVER, S.e.. PATH at 20—History and Major Milestones. **Ieee Transactions On Intelligent Transportation Systems**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 584-592, dez. 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2007.903052>.

SIVAK, Michael; SCHOETTLE, Brandon. Eco-driving: strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. **Transport Policy**, [S.L.], v. 22, p. 96-99, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.05.010>.

TEDESCO, Giovanna Megumi Ishida et al. Mercado de Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil. **Revista ANTT**, v. 3, n. 2, p. 140-51, 2011.

TEETOR, Ralph R. **Speed control device for resisting operation of the accelerator**. Ago, 1950. US2519859 A.

TSUGAWA, S.; KATO, S.; AOKI, K.. An automated truck platoon for energy saving. **2011 Ieee/Rsj International Conference On Intelligent Robots And Systems**, [S.L.], p. 4109-4114, set. 2011. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/iros.2011.6094549>.

TURRI, Valerio; BESSELINK, Bart; JOHANSSON, Karl H. Cooperative look-ahead control for fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 25, n. 1, p. 12-28, 2016.

USDoE. **Driving More Efficiently**. Disponível em: <https://www.fueleconomy.gov/feg/driveHabits.jsp>. Acesso em: 11 jul. 2022.

VAN AREM, Bart; VAN DRIEL, Cornelia JG; VISSER, Ruben. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. **IEEE Transactions on intelligent transportation systems**, v. 7, n. 4, p. 429-436, 2006.

WANG, Meng; DAAMEN, Winnie; HOOGENDOORN, Serge; AREM, Bart. Potential impacts of ecological adaptive cruise control systems on traffic and environment. **Iet Intelligent Transport Systems**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 77-86, mar. 2014. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-its.2012.0069>.

ZHENG, Yang; LI, Shengbo Eben; LI, Keqiang; BORRELLI, Francesco; HEDRICK, J. Karl. Distributed Model Predictive Control for Heterogeneous Vehicle Platoons Under Unidirectional Topologies. **Ieee Transactions On Control Systems Technology**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 899-910, maio 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tcst.2016.2594588>.

ZHOU, Min; JIN, Hui; WANG, Wenshuo. A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S.L.], v. 49, p. 203-218, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.008>.