ANDRÉ DE SOUZA MENDES

**ESTRATÉGIA ÓTIMA DE COORDENAÇÃO DE CAMINHÕES PARA FORMAÇÃO
DE COMBOIOS EM RODOVIAS**

São Paulo

2020

ANDRÉ DE SOUZA MENDES

**ESTRATÉGIA ÓTIMA DE COORDENAÇÃO DE CAMINHÕES PARA FORMAÇÃO
DE COMBOIOS EM RODOVIAS**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Engenharia de Controle e Automação Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Mendes, André de Souza

Estratégia ótima de coordenação de caminhões para formação de comboios em rodovias / A. S. Mendes -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
149 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Comboio de caminhões (Monitoramento) 2.Combustíveis veiculares (economia) 3.Estática (otimização) 4.Controle ótimo 5.Gases (redução de emissão) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Folha de aprovação

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio incondicional da minha família, a cumplicidades dos amigos e os ensinamentos dos meus mentores Marko Ackermann, Fabrizio Leonardi e Agenor de Toledo Fleury.

RESUMO

A presente pesquisa apresenta uma estratégia ótima de coordenação para a formação de comboios de caminhões em rodovias com o objetivo de reduzir o consumo de combustível e aumentar a densidade de tráfego. Na literatura, este tipo de comboio é tipicamente caracterizado pelo conjunto de veículos em fila trafegando com pequenas distâncias de separação. A proximidade dos veículos nesta configuração permite um fluxo de ar mais eficiente em torno do conjunto reduzindo o custo energético total da movimentação. Além disso, a formação de comboios é capaz de aumentar a segurança nas vias, a capacidade de transporte, o conforto do motorista, reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa e a mão de obra devido à ausência de intervenção humana nos veículos seguidores. A estratégia de coordenação proposta tem como base um problema de otimização estática que leva em consideração a disposição inicial dos caminhões dispersos numa rodovia e fornece perfis ótimos de velocidade que os veículos devem seguir para que o comboio seja formado. Esta estratégia de coordenação é estendida utilizando um problema de controle ótimo que usa os perfis de velocidade provenientes do problema de otimização estática como ponto de partida viável do algoritmo. As soluções de ambos os problemas, otimização estática e controle ótimo, são usadas como referência dos controladores da dinâmica longitudinal de cada caminhão. Uma central de processamento é responsável por monitorar os caminhões no trecho de rodovia considerado, executar o algoritmo da estratégia de coordenação e transmitir os perfis ótimos de velocidade que cada integrante deve seguir. Os perfis de velocidade e o consumo de combustível provenientes dos problemas de otimização estática e controle ótimo são apresentados para diferentes cenários de coordenação. Uma análise de sensibilidade complementa a investigação do método verificando os perfis de velocidade e o custo total da movimentação em função dos principais parâmetros da coordenação. Por fim, modelos da dinâmica longitudinal e consumo de combustível de caminhões pesados, validados experimentalmente e disponíveis na literatura, são usados na avaliação da estratégia de coordenação em diferentes cenários de tráfego num trecho de rodovia entre as cidades de Rio de Janeiro e São Paulo. A principal contribuição desta tese consiste na formulação da estratégia ótima de coordenação que leva em consideração dois ou mais caminhões simultaneamente, inclui a fase de desmanche do comboio e permite a formação de comboios parciais. Palavras-chave: Comboio de caminhões. Economia de combustível. Otimização estática. Controle ótimo

ABSTRACT

This work presents an optimal coordination strategy to form truck platoons on highways in order to reduce fuel consumption and increase traffic density. In the literature, this type of platoon is typically characterized by a set of vehicles in a row traveling with small inter-vehicle distances. The proximity of the vehicles in this configuration allows a more efficient air flow, reducing the total energy cost of the maneuver. Moreover, platoon formation increase road safety, transport capacity, driver comfort, reduce greenhouse gas emissions and workload due to the absence of human intervention in the following vehicles. The proposed coordination strategy is based on a static optimization problem that takes into account the initial positions of scattered trucks on a highway and provides optimal speed profiles the vehicles should follow to form the platoon. This coordination strategy is extended using an optimal control problem that uses the speed profiles from the static optimization problem as a viable starting point for the algorithm. The solutions of both problems, static optimization and optimal control, are used as reference signal by the longitudinal controllers of each truck. A central processing station is responsible for monitoring the trucks on the considered highway stretch, executing the coordination strategy and providing the optimal speed profiles to each participant. The speed profiles and fuel consumption provided by the static optimization and optimal control problems are presented for different coordination scenarios. A sensitivity analysis supplement the investigation of the method by verifying the speed profiles and the total cost of the maneuver according to the main coordination parameters. Finally, longitudinal dynamics and fuel consumption models of heavy trucks, experimentally validated and available in the literature, are used in the evaluation of the coordination strategy under different coordination scenarios on a highway stretch between the cities of Rio de Janeiro and São Paulo. The main contribution of this work lies in the formulation of the optimal coordination strategy that takes into account two or more trucks simultaneously, includes the splitting phase and allows the formation of partial platoons.

Keywords: Truck platoon. Fuel savings. Static optimization. Optimal control

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Emissões de CO ₂ no Brasil em 2010.	19
Figura 2	– Comboio formado por quatro caminhões pesados numa rodovia.	21
Figura 3	– Grupos de pesquisa dedicados a estudos relacionados à formação de comboio de caminhões.	24
Figura 4	– Exemplo do campo de pressão no plano de simetria de um comboio de dois caminhões para diferentes distâncias de separação. Conforme a distância de separação diminui, o veículo seguidor é exposto a uma menor pressão frontal. Com isso, o consumo de combustível é reduzido.	26
Figura 5	– Resultados experimentais de economia de combustível em função da distância inter-veicular com o comboio a 80 km/h.	26
Figura 6	– Resultados experimentais de economia de combustível em função da distância inter-veicular com o comboio a 105 km/h.	27
Figura 7	– Resultados numéricos (CFD) de economia de combustível em função da distância inter-veicular com o comboio alinhado a 89 km/h.	29
Figura 8	– Resultados numéricos (CFD) de economia de combustível em função da distância inter-veicular com o comboio desalinhado a 89 km/h.	29
Figura 9	– Estrutura de quatro componentes para a manutenção do comboio. A dinâmica veicular se refere aos modelos matemáticos que descrevem a movimentação dos integrantes do comboio. O fluxo de informação determina como é feito o compartilhamento de dados entre os caminhões envolvidos. Com estas informações, os controladores são responsáveis por manter a distância de separação definida pela geometria de formação escolhida. . . .	32
Figura 10	– Topologias do fluxo de informação comumente utilizadas em comboios de veículos.	33
Figura 11	– Exemplo de uma oportunidade de coordenação de caminhões numa rodovia em que um comboio de três veículos e um caminhão solitário se aproximam de uma interseção por meio de rotas distintas.	37
Figura 12	– Exemplo do cenário de coordenação em que as estratégias de alcance e desaceleração podem ser aplicadas para a formação de comboio.	39
Figura 13	– Modelo físico do veículo com as forças consideradas.	45

Figura 14 – Fator de redução da força de arrasto aerodinâmico em função da distância entre os veículos. O modelo proposto por Turri, Besselink e Johansson (2017) é ajustado aos dados experimentais de Hucho e Ahmed (1998) através do método dos mínimos quadrados não linear.	47
Figura 15 – Arquitetura típica do sistema ACC.	49
Figura 16 – Diagrama de blocos do controle de velocidade para uma entrada degrau na velocidade de referência. Uma entrada degrau adicional simula uma perturbação equivalente ao início da subida de uma ladeira.	52
Figura 17 – Resultado da simulação do controle de velocidade. O gráfico superior indica a velocidade do veículo ao longo do tempo e o gráfico inferior indica a aceleração desejada passada para a malha de baixo nível.	53
Figura 18 – Diagrama de blocos do controle de distância do veículo seguidor em relação ao veículo precedente. Uma entrada degrau altera a velocidade do veículo precedente.	54
Figura 19 – Resultado da simulação do controle de distância. O gráfico superior indica a distância de separação em função do tempo. O segundo gráfico mostra as velocidades de ambos os caminhões ao longo da manobra e o gráfico inferior ilustra a aceleração desejada.	55
Figura 20 – Diagrama $R - \dot{R}$ proposto por Fancher e Bareket (1994). R se refere à distância de separação e $\dot{R}$ à velocidade relativa dos dois veículos. Na região 1, o veículo seguidor procura manter a velocidade de referência. Na região 2, a distância de referência deve ser mantida.	56
Figura 21 – Diagrama de blocos do controle de um caminhão inicialmente solitário se aproximando do líder para formação de comboio. O diagrama $R - \dot{R}$ é utilizado para fazer o chaveamento entre os controles de velocidade e distância.	58
Figura 22 – Resultado da simulação de aproximação com um sistema de controle do tipo ACC. O diagrama $R - \dot{R}$ é utilizado para fazer o chaveamento entre os controles de velocidade e distância.	59
Figura 23 – Trajetória do ponto de operação da manobra de aproximação no diagrama $R - \dot{R}$. O módulo de controle de velocidade atua durante a trajetória vertical até cruzar a reta de chaveamento. No restante da manobra, o módulo de controle de distância atua.	60

Figura 24 – À esquerda, uma ilustração do MERL. À direita, o MERL sendo puxado pelo caminhão líder em um comboio.	61
Figura 25 – Comparação da taxa de consumo obtida experimentalmente e a estimativa do modelo de consumo VT-CPFM para o caminhão 1 trafegando num trecho de rodovia em Coachella Valley na California.	62
Figura 26 – Consumo de combustível em função da velocidade de movimentação para diferentes inclinações de pista.	64
Figura 27 – Exemplo de três caminhões numa malha rodoviária e trecho unificado equivalente.	65
Figura 28 – Coordenação num trecho intermediário de rota. O caminhão 1 entra no trecho de coordenação e fornece as informações necessárias à central de processamento. Com a entrada do caminhão 2 no trecho, os veículos recebem os perfis ótimos de velocidade gerados pelo algoritmo de coordenação. A movimentação completa é composta por três fases: aproximação, comboio e separação.	67
Figura 29 – Curvas de posição em função do tempo de 2 caminhões num trecho intermediário de rota. As linhas escuras indicam a trajetória coordenada e as linhas claras indicam a trajetória nominal. A movimentação completa é composta por três fases: aproximação, comboio e separação.	68
Figura 30 – Curvas de posição e velocidade em função do tempo de N caminhões num trecho intermediário de rota. As linhas escuras indicam o caso coordenado e as linhas claras indicam o caso nominal. A movimentação completa é composta por três fases: aproximação, comboio e separação.	70
Figura 31 – Ajuste do perfil de velocidade proveniente do problema de otimização estática para dois caminhões.	83
Figura 32 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1 2)}=5$ km. A economia de energia alcançada é 8,5%.	95
Figura 33 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais diferentes, $v_{n(1)}=90$ km/h e $v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1 2)}=5$ km. A economia de energia alcançada é 1,5%.	96

Figura 34 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de três caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1 2)}=d_{i(2 3)}=5$ km. A economia de energia alcançada é 7,3%.	98
Figura 35 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de três caminhões com velocidades nominais diferentes, $v_{n(1)}=80$ km/h, $v_{n(2)}=72$ km/h e $v_{n(3)}=83$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1 2)}=d_{i(2 3)}=5$ km. A economia de energia alcançada é 3,9%.	99
Figura 36 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de dez caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=. . . =v_{n(10)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e distância inicial de separação de 2 km entre caminhões adjacentes. A economia de energia alcançada é 4,7%.	101
Figura 37 – Comparação dos perfis de velocidade provenientes dos problemas de otimização estática (bruto e ajustado) e controle ótimo para dois caminhões. .	103
Figura 38 – Resultado do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1 2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 5,4%.	103
Figura 39 – Comparação dos perfis de velocidade provenientes dos problemas de otimização estática (bruto e ajustado) e controle ótimo para três caminhões. .	104
Figura 40 – Resultado do problema de controle ótimo para a coordenação de três caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1 2)}=d_{i(2 3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 5,2%.	105
Figura 41 – Velocidades normalizadas de coordenação em função da distância inicial de separação normalizada $r_{d(1 N)}$ para $N=2, 3$ e 10 caminhões. Nesta análise, $r_m=r_p=r_s=0,01$ e todas as velocidades nominais são iguais.	108

Figura 42	– Custo normalizado em função da distância inicial de separação normalizada $r_{d(1 N)}$ para $N=2, 3$ e 10 caminhões. Nesta análise, $r_m=r_p=r_s=0,01$ e todas as velocidades nominais são iguais.	110
Figura 43	– Velocidades normalizadas de coordenação em função da relação de velocidades nominais $r_{v(1,2)}$. Nesta análise, $r_m=r_p=r_s=0,01$ e $r_{d(1 2)}=0,09$	111
Figura 44	– Custo normalizado em função da relação de velocidades nominais $r_{v(1,2)}$. Nesta análise, $r_m=r_p=r_s=0,01$ e $r_{d(1 2)}=0,09$	112
Figura 45	– Velocidades normalizadas de coordenação em função da distância mínima em comboio normalizada r_p . Nesta análise, $r_m=r_s=0,01$ e $r_{d(1 2)}=0,09$. . .	113
Figura 46	– Custo normalizado em função da distância mínima em comboio normalizada r_p . Nesta análise, $r_m=r_s=0,01$ e $r_{d(1 2)}=0,09$	114
Figura 47	– Velocidades normalizadas de coordenação em função da distância mínima de aproximação normalizada r_m . Nesta análise, $r_p=r_s=0,01$ e $r_{d(1 2)}=0,09$. .	115
Figura 48	– Custo normalizado em função da distância mínima de aproximação normalizada r_m . Nesta análise, $r_p=r_s=0,01$	115
Figura 49	– Velocidades normalizadas de coordenação em função da distância mínima de separação normalizada r_s . Nesta análise, $r_m=r_p=0,01$ e $r_{d(1 2)}=0,09$. . .	116
Figura 50	– Custo normalizado em função da distância mínima de separação normalizada r_s . Nesta análise, $r_m=r_p=0,01$	117
Figura 51	– Rodovia BR-116 entre as cidades de Cachoeira Paulista (lat: -22.677062, lon: -45.00198) e São José dos Campos (lat: -23.222642, lon: -45.903445).	118
Figura 52	– Elevação (superior) e inclinação de pista (inferior) do trecho de rodovia considerado entre as cidades de Cachoeira Paulista e São José dos Campos.	119
Figura 53	– Fluxograma para avaliação da estrutura de coordenação.	121
Figura 54	– Manobra resultante da avaliação do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1 2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,5%.	122

- Figura 55 – Consumo de combustível resultante da avaliação do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,5%. 123
- Figura 56 – Manobra resultante da avaliação do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,0%. 125
- Figura 57 – Consumo de combustível resultante da avaliação do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,0%. 126
- Figura 58 – Manobra resultante da avaliação do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 3,0%. 128
- Figura 59 – Consumo de combustível resultante da avaliação do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 3,0%. 129
- Figura 60 – Manobra resultante da avaliação do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,4%. 130

Figura 61 – Consumo de combustível resultante da avaliação do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,4%. 132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Detalhes e resultados experimentais e numéricos focados nos efeitos aerodinâmicos de comboios de caminhões. A redução de consumo é reportada para o time numa dada velocidade de movimentação e distância de separação entre os veículos.	31
Tabela 2	– Detalhes dos estudos experimentais dedicados à manutenção do comboio. .	35
Tabela 3	– Detalhes dos estudos numéricos dedicados à manutenção do comboio. . .	35
Tabela 4	– Detalhes dos oito caminhões com dados disponíveis para os estudos desta tese.	62
Tabela 5	– Valores dos parâmetros do modelo de consumo VT-CPFM para motores diesel.	63
Tabela 6	– Desempenho do modelo VT-CPFM em estimar corretamente as medições experimentais de consumo. R^2 é o coeficiente de determinação e C indica a inclinação da reta de regressão linear entre as estimativas do modelo e as medições experimentais.	63
Tabela 7	– Cenário de coordenação com dois caminhões e velocidades nominais iguais.	94
Tabela 8	– Cenário de coordenação com dois caminhões e velocidades nominais diferentes.	94
Tabela 9	– Cenário de coordenação com três caminhões e velocidades nominais iguais.	97
Tabela 10	– Cenário de coordenação com três caminhões e velocidades nominais diferentes.	97
Tabela 11	– Cenário de coordenação com dez caminhões e velocidades nominais iguais.	100
Tabela 12	– Parâmetros dos modelos da dinâmica longitudinal, redução do arrasto aerodinâmico e consumo de combustível utilizados no problema de controle ótimo para obtenção dos perfis ótimos de velocidade.	102
Tabela 13	– Dados dos caminhões.	120
Tabela 14	– Resumo da economia de combustível de acordo com o número de caminhões envolvidos e método de obtenção dos perfis de referência.	131

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	freio anti travamento (Anti-lock Braking System)
ACC	controle de cruzeiro adaptativo (adaptive cruise control)
BD	bidirecional (bidirectional)
BDL	bidirecional-líder (bidirectional-leader)
CACC	controle de cruzeiro adaptativo e cooperativo (cooperative adaptive cruise control)
CC	controle de cruzeiro (cruise control)
CD	distância constante (constant distance)
CFD	fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics)
COMPANION	Cooperative Dynamic Formation of Platoons for Safe and Energy-optimized Goods Transportation
CTH	tempo constante (constant time headway)
ESC	controle de estabilidade (electronic stability control)
FMS	sistema de gerenciamento de frota (fleet management system)
GEE	gás causador do efeito estufa
GPS	sistema de posicionamento global (global positioning system)
GT	topologia genérica (generic topology)
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LDW	alerta de saída da faixa (lane departure warning)
LMI	desigualdades matriciais lineares (linear matrix inequality)
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MERL	Laboratório Móvel de Pesquisa sobre Emissões (Mobile Emissions Research Laboratory)
MPC	preditivo (model predictive control)
ND	distância não linear (nonlinear distance)
ONU	Organização das Nações Unidas
P	proporcional
PATH	Partners for Advanced Transportation Technology
PF	predecessor-seguidor (predecessor-following)
PI	proporcional-integral

PLF	predecessor-líder-seguidor (predecessor-leader-following)
SARTRE	Safe Road Trains for the Environment
SMC	modos deslizantes (sliding mode control)
TPF	dois-predecessores-seguidor (two-predecessors-following)
TPLF	dois-predecessores-líder-seguidor (two-predecessors-leader-following)
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (United Nations Framework Convention on Climate Change)
V2I	entre veículos e infraestrutura (vehicle-to-infrastructure)
V2V	entre veículos (vehicle-to-vehicle)
VT-CPFM	Virginia Tech Comprehensive Power-based Fuel consumption Model

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMBOIOS	25
2.2	MANUTENÇÃO DA FORMAÇÃO DE COMBOIO	30
2.3	COORDENAÇÃO DE CAMINHÕES	36
3	OBJETIVOS	42
4	COORDENAÇÃO DE CAMINHÕES	44
4.1	DINÂMICA LONGITUDINAL	44
4.2	CONTROLADORES DA DINÂMICA LONGITUDINAL	48
4.3	MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	60
4.4	COORDENAÇÃO NA MALHA RODOVIÁRIA	65
4.5	PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO ESTÁTICA	69
4.5.1	Fase de aproximação	73
4.5.2	Fase de separação	75
4.5.3	Fase em comboio	78
4.5.4	Restrições	79
4.5.5	Formulação do problema de otimização estática	80
4.5.6	Ajuste do perfil de velocidade	82
4.6	PROBLEMA DE CONTROLE ÓTIMO	86
4.7	DADOS COMPUTACIONAIS	91
5	PERFIS DE VELOCIDADE DE REFERÊNCIA	93
5.1	SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO ESTÁTICA	93
5.1.1	Problema de otimização estática com 2 caminhões	93
5.1.2	Problema de otimização estática com 3 caminhões	96
5.1.3	Problema de otimização estática com 10 caminhões	99
5.2	SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE CONTROLE ÓTIMO	100
6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	107
6.1	VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA INICIAL DE SEPARAÇÃO	107
6.2	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE NOMINAL	110
6.3	VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA EM COMBOIO	112
6.4	VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA DE APROXIMAÇÃO	113

6.5	VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA DE SEPARAÇÃO	116
7	AVALIAÇÃO DOS PROBLEMAS DE COORDENAÇÃO	118
7.1	AVALIAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO ESTÁTICA	120
7.2	AVALIAÇÃO DO PROBLEMA DE CONTROLE ÓTIMO	127
8	CONCLUSÕES	133
	REFERÊNCIAS	138
	APÊNDICE A – Atividades do autor	147
A.1	Publicações	148
A.2	Orientações	149

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a matriz de transporte de carga é composta pelos modais rodoviário, ferroviário, aquaviário, dutoviário e aéreo. Com mais de 60% de toda mercadoria transportada, o modal rodoviário domina amplamente a matriz de transporte com aproximadamente três vezes mais participação do que o segundo lugar, o modal ferroviário. O modal aquaviário ocupa a terceira posição com 13% de participação seguido pelos modais dutoviário com 4,2% e aéreo com 0,4%. A predominância do modal rodoviário é favorecida pela extensa malha rodoviária composta por mais de 1,7 milhão de quilômetros (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE, 2016).

Na esfera federal, mais de 64 mil quilômetros são pavimentados, representando 80% das estradas deste segmento, enquanto cerca de 79% de toda a malha rodoviária é composta por estradas municipais não pavimentadas. Logo, a maior parte das rodovias não apresenta condições adequadas de segurança para a movimentação da frota brasileira formada por mais de 93 milhões de veículos emplacados (DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2016). Mais de 2,6 milhões de caminhões e mais de 600 mil caminhões tratores são responsáveis pelo transporte de carga e aproximadamente 600 mil ônibus são responsáveis pelo transporte de passageiros. Portanto, mais de 3,8 milhões de veículos médios e pesados são registrados no Brasil.

A operação da frota global de veículos terrestres está associada à emissão de gases causadores do efeito estufa que são provenientes dos motores de combustão interna, que fazem uso de combustíveis fósseis, embarcados predominantemente neste tipo de veículos. Os mais abundantes gases causadores do efeito estufa (GEEs) são dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). A liberação excessiva destes compostos químicos na atmosfera provoca o aumento de doenças cardiorrespiratórias e o aquecimento global. Por consequência, o ecossistema e a biodiversidade são afetados. Por este motivo, uma série de medidas vem sendo implementada internacionalmente para reverter o atual quadro de emissões.

Com o intuito de estabelecer políticas climáticas, a Organização das Nações Unidas (ONU) criou em 1988 o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change). Além das iniciativas políticas, a organização produz abrangentes relatórios que quantificam o cenário climático global, preveem as mudanças ecológicas e avaliam os impactos políticos e econômicos.

Em 1992, no Rio de Janeiro, a ONU organizou a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (*United Nations Conference on Environment and Development*), também conhecida como Eco-92, Cúpula da Terra e Rio 92. Neste evento, o tratado internacional Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, *United Nations Framework Convention on Climate Change*) foi assinado.

Com base nas diretrizes e metodologias propostas pelo IPCC, as emissões dos países desenvolvidos e industrializados devem ser monitoradas e um dos principais mecanismos de documentação consiste nos relatórios nacionais do inventário de emissões antrópicas elaborados em conformidade com a UNFCCC.

O Brasil, apesar de ser um país em desenvolvimento, publicou em 2016 o terceiro inventário de emissões antrópicas. O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) foi o órgão responsável pela elaboração deste documento. Na Figura 1, é possível observar a quantidade relativa de CO₂ emitida no ano de 2010 de acordo com o setor econômico. O setor chamado de Uso da Terra é o principal responsável pela emissão de CO₂ com 42% do total. As emissões devido à mudança do tipo de uso da terra são contabilizadas neste setor, por exemplo, conversão de uma floresta para agricultura, substituição de uma lavoura ou reflorestamento. A segunda maior contribuição é proveniente do setor de transporte com 23%. No setor industrial, são consideradas as produções de cimento, cal, metais e compostos químicos. Este setor representa 20% do total de emissões. O setor de energia consiste principalmente na produção de energia elétrica e representa 8% das emissões totais de CO₂. Os processos que resultam em emissões de CO₂ na agricultura e agropecuária representam 2% do total.

Figura 1 – Emissões de CO₂ no Brasil em 2010.

Fonte: Brasil (2016).

Detalhando a contribuição do setor de transporte, na Figura 1, é possível observar que o modal rodoviário é o principal emissor de CO₂ responsável por 90% das emissões deste setor. O modal aéreo é responsável por 6% das emissões.

Os Estados Unidos, como parte do compromisso assumido perante ao IPCC, produziu em 2016 o seu inventário de emissões antrópicas (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2016). Diferentemente do relatório emitido pelo Brasil, o inventário americano proporciona informações sobre os demais GEEs, não somente CO₂. Neste caso, as emissões totais são contabilizadas em toneladas equivalentes de CO₂. O setor de energia é o principal responsável contribuindo com 30% das emissões. Em seguida, o setor de transporte aparece com uma parcela de 26%. O setor industrial e de agricultura apresentam 21% e 9% da contribuição total, respectivamente. O modal rodoviário representa 84% das emissões do setor de transporte. Em seguida, os modais aéreo e ferroviário aparecem com 8% e 3% das emissões, respectivamente.

As emissões provenientes do modal rodoviário podem ser discriminadas conforme o tipo de veículo. Os carros de passeio representam 49,8% de toda a emissão deste tipo de modal. Caminhões, por sua vez, representam aproximadamente 48,7% das emissões considerando as contribuições de caminhões leves, 22,1%, e caminhões médios e pesados, 26,6%. Ônibus contribuem com 1,3% e, por fim, motocicletas contribuem com 0,3%.

É possível observar que, nos dois países, o setor de transporte tem um impacto significativo na parcela de GEEs emitidos. O modal rodoviário é predominantemente o mais impactante neste setor. Especificamente nos Estados Unidos, é possível verificar que a contribuição dos caminhões representa aproximadamente a metade das emissões deste modal.

A importância dos veículos pesados e infraestrutura rodoviária na circulação de bens e pessoas é evidente. Entretanto, a demanda por transporte de carga vem crescendo em todo o mundo (EDENHOFER et al., 2014) e a expansão da infraestrutura rodoviária é extremamente limitada (TSUGAWA; JESCHKE; SHLADOVER, 2016). Além disso, o setor de transporte apresenta elevados níveis de emissões de gases causadores do efeito estufa como pode ser verificado nos inventários anuais de emissões antrópicas de países como Brasil e Estados Unidos. Na tentativa de contornar estes problemas, algumas medidas são consideradas: otimização do trem de potência, utilização de veículos elétricos, sistemas de recuperação de energia e formação de comboios veiculares (LIANG, K. Y. et al., 2015). Este último é entendido como a movimentação de um conjunto de veículos em fila trafegando com pequenas distâncias de separação e liderados por um veículo conduzido por um ser humano. A Figura 2 mostra quatro caminhões pesados em formação de comboio trafegando numa rodovia.

Figura 2 – Comboio formado por quatro caminhões pesados numa rodovia.

Fonte: Larson, Liang e Johansson (2015).

Particularmente, a movimentação em comboio possibilita a redução do consumo de combustível, das emissões de GEEs e de congestionamentos (TSUGAWA; JESCHKE; SH-LADOVER, 2016). A redução do consumo de combustível é obtida quando os veículos se movimentam com pequenas distâncias entre eles, pois o fluxo de ar em torno do conjunto se torna mais eficiente reduzindo, assim, o coeficiente de arrasto aerodinâmico dos participantes do comboio (HUCHO; AHMED, 1998). Esta solução deve ser implementada preferencialmente em trechos de rodovias com inclinação de pista moderada e elevada média de velocidade, isto é, em trechos onde o efeito aerodinâmico é predominante sobre o consumo. Além disso, a implementação segura desta estratégia só é possível fazendo uso de controladores, pois seu tempo de resposta é menor do que o tempo de resposta de um ser humano. Entretanto, condições de segurança ainda são temas recorrentes de pesquisa, principalmente envolvendo as falhas dos sistemas de comunicação (DEY et al., 2016).

O desenvolvimento de carros autônomos impulsionou a criação de diversas tecnologias que tornam a movimentação em comboio possível. Os desafios de processamento de imagem e reconhecimento de pista associados aos carros autônomos são significativamente reduzidos na formação de comboios, pois a responsabilidade de visualização e interpretação da pista e do ambiente é transferida para o motorista do veículo líder. Logo, a solução de comboio requer, a princípio, uma quantidade consideravelmente menor de equipamentos, infraestrutura e processamento para a sua movimentação. Por um lado, investimentos nestas áreas ainda preci-

sam ser realizados para que a formação de comboio seja possível. Por outro lado, nos últimos anos, esta solução vem se tornando cada vez mais atraente devido ao barateamento de sensores e sistemas de comunicação despertando o interesse de donos de frotas de caminhões e montadoras (SCANIA PRESS RELEASE, 2016). Por este motivo, a formação de comboios compostos por caminhões pesados é provavelmente a primeira aplicação de automação veicular comercialmente viável (LAMMERT et al., 2014).

Por fim, os caminhões devem ser capazes de formar e desmanchar comboios. Isto pode ser alcançado ajustando os horários de partida dos caminhões de forma que eles iniciem a viagem juntos ou se encontrem em alguma interseção da rodovia. Alternativamente, caminhões em trânsito dispersos numa rodovia podem alterar a sua velocidade para diminuir a distância entre eles até a formação do comboio. Eventualmente, o comboio deve ser desfeito dependendo das rotas de cada integrante. Em geral, estes caminhões têm diferentes pontos de partida, destinos e restrições de horários. Apesar dos benefícios da movimentação em comboio, a escolha da estratégia de formação implica diferentes níveis de consumo de combustível e emissões. Além disso, a coordenação destes agentes com menor custo energético não é evidente. Portanto, o presente trabalho propõe uma estratégia ótima de coordenação de caminhões dispersos numa rodovia com o objetivo de reduzir o consumo total de combustível e emissões dos veículos envolvidos e aumentar a densidade de tráfego do trecho considerado.

Esta tese possui a seguinte estrutura. A Seção 2 apresenta a revisão da literatura sobre a movimentação em comboio de veículos pesados. Em seguida, os objetivos são detalhados na Seção 3 e os métodos são apresentados na Seção 4. Os resultados começam a ser apresentados na Seção 5, onde os perfis de velocidade provenientes dos problemas de otimização estática e controle ótimo podem ser observados. Uma série de análises de sensibilidade é apresentada na Seção 6 e a avaliação dos problemas de coordenação se encontra na Seção 7. Por fim, a Seção 8 conclui a tese com sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Um dos primeiros sistemas desenvolvidos para controlar a dinâmica longitudinal de veículos foi o controle de cruzeiro (CC, cruise control) (TEETOR, 1950). Este sistema controla o torque do motor para manter a velocidade do veículo constante rejeitando perturbações como arrasto e variações da inclinação da pista. Sensores de distância identificando obstáculos à frente permitem o desenvolvimento do controle de cruzeiro adaptativo (ACC, adaptive cruise control) (RAJAMANI, 2015). Neste caso, o veículo é capaz de ajustar a velocidade de acordo com o veículo precedente. Ambos os sistemas, CC e ACC, foram desenvolvidos inicialmente com o objetivo de aumentar a segurança e o conforto, mas também são capazes de proporcionar uma maior eficiência energética devido à suavização do perfil de aceleração (MOSER et al., 2017). Com a incorporação de sistemas de comunicação entre veículos (V2V, vehicle-to-vehicle), o controle de cruzeiro adaptativo e cooperativo (CACC, cooperative adaptive cruise control) foi desenvolvido e representa a base tecnológica que permite a formação de comboios de caminhões (VAN AREM; DRIEL; VISSER, 2006). Entretanto, para que os benefícios do comboio sejam alcançados, é necessário que múltiplos veículos próximos estejam equipados com o CACC. Na prática, este cenário raramente ocorre (ZHANG; SUN; OROSZ, 2017).

Uma revisão sobre a evolução dos sistemas de assistência ao motorista desde a década de 1980 pode ser encontrada em Bengler et al. (2014). Os autores apresentaram em ordem cronológica soluções como freio anti travamento (ABS, Anti-lock Braking System), controle de estabilidade (ESC, electronic stability control), alerta de saída da faixa (LDW, lane departure warning) e ACC que hoje equipam alguns veículos comerciais. Segundo os autores, a projeção consiste no surgimento de soluções que permitam a movimentação autônoma e cooperativa. Isto inclui a movimentação em comboio. Entretanto, a implementação dos sistemas de automação veicular possui diversos obstáculos, tanto sociais quando tecnológicos. Consumidores ainda tem preocupações com relação, por exemplo, à responsabilidade legal, à privacidade (registro de localização), à interação com veículos não autônomos e ao desempenho em condições desfavoráveis de clima (SCHOETTLE; SIVAK, 2014). Além disso, existem os desafios associados ao monitoramento dos eventos em volta do veículo e à imprevisibilidade dos cenários (CARVALHO et al., 2015).

Estudos sobre comboio de caminhões pesados foram conduzidos por diversos grupos de pesquisa formados por parcerias entre governo, indústria e academia. Um dos primeiros estudos foi conduzido pelo projeto europeu Chauffeur I e investigou o potencial de economia de

combustível em comboio de caminhões (BONNET; FRITZ, 2000). Na segunda fase deste projeto, Chauffeur II, os pesquisadores melhoraram o sistema de controle para reduzir a distância inter-veicular (FRITZ et al., 2004). Em 1986, o grupo Partners for Advanced Transportation Technology (PATH) iniciou na Universidade da Califórnia o desenvolvimento de sistemas inteligentes de transporte. Na década de 1990, o grupo demonstrou um comboio de oito carros numa rodovia de San Diego (SHLADOVER, 2007). Estudos recentes focam em caminhões pesados e exploram a confiabilidade e estratégias de controle deste tipo de configuração (LU; SHLADOVER, 2014). KONVOI, da universidade de RWTH Aachen (KUNZE et al., 2011), e Safe Road Trains for the Environment (SARTRE) (CHAN, 2016) são grupos de pesquisa que abordaram principalmente a automação de caminhões, viabilidade econômica e interação motorista-comboio. Além disso, Energy ITS foi um projeto japonês de cinco anos iniciado em 2008 focado na redução de emissões de GEEs através da formação de comboios de caminhões (TSUGAWA, 2014). Por fim, o Cooperative Dynamic Formation of Platoons for Safe and Energy-optimized Goods Transportation (COMPANION) foi um grupo europeu focado na coordenação e gerenciamento das operações de caminhões em comboios (EILERS et al., 2015). Estes grupos aparecem cronologicamente na Figura 3. Diversos outros grupos de pesquisa também desenvolveram trabalhos em tópicos relacionados a comboios veiculares. Algumas de suas contribuições são apresentadas nas seções seguintes.

Figura 3 – Grupos de pesquisa dedicados a estudos relacionados à formação de comboio de caminhões.

Fonte: Autor.

A formação de comboios tem como principais objetivos a diminuição do consumo de combustível, de emissões e do custo com motorista, além do aumento da segurança e da capacidade de transporte (LIANG, K. Y.; MÅRTENSSON, J.; JOHANSSON, K. H., 2016; TSUGAWA; JESCHKE; SHLADOVER, 2016). A diminuição do consumo de combustível é alcançada devido à proximidade entre os veículos que torna o fluxo de ar mais eficiente diminuindo o

arrasto aerodinâmico do conjunto (HUCHO; AHMED, 1998). Esta condição é viabilizada uma vez que o tempo de reação do controlador é menor do que o tempo de reação do ser humano. Entretanto, as condições de segurança ainda estão sujeitas à investigação devido aos riscos de falhas de comunicação entre os veículos envolvidos (DIAB, 2015).

A pesquisa sobre a formação de comboio de caminhões pesados pode ser separada em três áreas principais: consumo de combustível em comboios, manutenção da formação de comboio e coordenação de caminhões (MENDES et al., 2017). A primeira área cobre os estudos de aerodinâmica que verificam a redução do consumo de combustível quando os veículos se movimentam com pequenas distâncias de separação. A segunda área trata das estratégias de controle, métodos de comunicação e interação entre motorista e veículo. Por fim, a última área de estudo proporciona estratégias de coordenação que tiram proveito dos benefícios da formação de comboio para obter perfis de velocidade que resultem em manobras energeticamente eficientes.

2.1 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMBOIOS

A investigação sobre o potencial de economia de combustível em comboios é realizada através de testes experimentais e/ou simulações fluidodinâmicas computacionais (CFDs, Computational Fluid Dynamics). Em ambos os casos, o consumo de combustível do veículo trafegando sozinho (Distância de separação $\rightarrow \infty$) é comparado ao consumo dele em comboio. Desta forma, é possível quantificar os benefícios associados a este tipo de formação. O campo de pressão no plano de simetria de um comboio de dois caminhões pode ser observado na Figura 4 para diferentes distâncias de separação. Neste exemplo, o resultado foi obtido através de simulação CFD realizada por Norrby (2014). É possível observar que o veículo seguidor é exposto a uma menor pressão frontal conforme a distância em relação ao líder diminui, resultando num menor consumo de combustível (LIANG, 2016).

Um dos primeiros estudos sobre a economia de combustível em comboios de caminhões foi apresentado pelo grupo Chauffeur I (BONNET; FRITZ, 2000). Os experimentos foram realizados na pista de testes da DaimlerChrysler em Pöppelburg com dois caminhões Actros 1853 LS equipados com o *Electronic Tow Bar System* desenvolvido pelo grupo. Os autores reportaram a redução do consumo de combustível para diferentes distâncias de seguimento e duas velocidades de movimentação. Na Figura 5, é possível observar o consumo de cada caminhão trafegando a 80 km/h com separação de 6,7 a 14 metros. Neste caso em particular,

Figura 4 – Exemplo do campo de pressão no plano de simetria de um comboio de dois caminhões para diferentes distâncias de separação. Conforme a distância de separação diminui, o veículo seguidor é exposto a uma menor pressão frontal. Com isso, o consumo de combustível é reduzido.

Fonte: Liang (2016) com os dados de Norrby (2014).

os autores registraram uma economia de consumo de aproximadamente 17,5% para o veículo seguidor a 14 metros de distância. A partir deste ponto, conforme a distância entre os veículos diminui, a economia de combustível do seguidor aumenta até atingir o pico de 21% com 8 m de separação. Se a distância de separação for menor que 8 m, a economia de combustível do seguidor diminui. Entretanto, a economia total do comboio aumenta devido ao aumento da economia apresentada pelo veículo líder.

Figura 5 – Resultados experimentais de economia de combustível em função da distância inter-veicular com o comboio a 80 km/h.

Fonte: Bonnet e Fritz (2000).

Na Figura 6, os resultados de Bishop et al. (2017) são apresentados. O teste experimental foi realizado utilizando caminhões Peterbilt 579 trafegando a 105 km/h. O pico de economia foi de 7% e ocorreu aproximadamente com 9 m de separação. Segundo os autores, a redução de economia observada para pequenas distâncias de separação vem do desalinhamento lateral entre os dois caminhões. Andando sobre uma única faixa de rolamento, quando os veículos não estão perfeitamente alinhados, os benefícios do comboio são parcialmente perdidos devido ao aumento de exposição do veículo seguidor ao fluxo de alta pressão (BROWAND; MCARTHUR; RADOVICH, 2004). Diferenças entre os testes experimentais (Figuras 5 e 6) são evidentes e se devem principalmente às diferenças de velocidade, modelos dos caminhões e condições climáticas. Entretanto, a tendência geral prevalece.

Figura 6 – Resultados experimentais de economia de combustível em função da distância inter-veicular com o comboio a 105 km/h.

Fonte: Bishop et al. (2017).

Como parte do programa PATH, Browand, McArthur e Radovich (2004) investigaram os benefícios do comboio de caminhões numa pista de decolagem desativada. Trafegando a 89 km/h e 10 m de separação, a média de economia foi de 8%. Os autores reportaram também os efeitos degradantes do desalinhamento dos caminhões. Durante o projeto SARTRE, testes experimentais também foram realizados na pista de *Idiada High Speed*. As configurações de comboio estudadas envolviam até dois caminhões Volvo FH12 e três carros de passeio Volvo trafegando a 85 km/h e distâncias de separação entre 8 e 15 m (DAVILA, 2013). A redução do consumo de combustível encontrada variou de 7% a 16%. Testes similares podem ser vistos nas etapas experimentais promovidas pelo projeto Energy ITS (TSUGAWA, 2014). Numa

destas etapas, os pesquisadores mediram o consumo de combustível de um comboio de quatro caminhões a 80 km/h e separação de 4,7 a 10 m. O consumo total de combustível foi reduzido em média 13% quando a separação foi de 10 m e chegou a 18% quando a separação foi de 4,7 m.

Vegendla et al. (2015) estudaram o consumo de comboios de caminhões em série e em formações de múltiplas faixas de rolamento utilizando uma ferramenta comercial de simulação CFD. Na formação em série, dois caminhões médios apresentaram 12% de economia a 89 km/h e 9,1 m. A configuração em múltiplas faixas foi explorada, por exemplo, com dois caminhões em faixas adjacentes de uma rodovia mantendo distâncias longitudinais entre eles. Esta configuração caracteriza um desalinhamento lateral entre os veículos. A economia de combustível em ambos os casos é apresentada nas Figuras 7 e 8. As curvas de economia dos veículos perfeitamente alinhados (Figura 7) mostram que o consumo é reduzido quando a distância de separação é reduzida. No caso do comboio em duas faixas adjacentes (Figura 8), a economia de combustível existe, mas, ao contrário do que é observado no caso alinhado, os benefícios aumentam com o aumento da distância de separação, pois o veículo seguidor passa a ser coberto pela esteira de baixa pressão que se expande ao se afastar do líder. De fato, a degradação dos benefícios do comboio são notáveis, inclusive, diante de pequenos desalinhamentos entre os caminhões (BISHOP et al., 2017). Como em condições reais o veículo traseiro não consegue seguir o líder com perfeito alinhamento, certo grau de desalinhamento estará sempre presente. Portanto, as curvas apresentadas corroboram os resultados e explicações dos testes experimentais discutidos acima.

Legislação e infraestrutura rodoviária impactam diretamente a configuração dos estudos de comboios. Mihelic, Smith e Ellis (2015) focaram em comboios formados por diferente tipos de veículos, por exemplo, trator com semirreboque e bitrens. Segundo os autores, o aumento do comprimento do veículo é uma solução mais atraente do que a formação de comboio. Entretanto, o comprimento e o acoplamento de diversos reboques são limitados pela infraestrutura rodoviária. Além disso, a formação de comboio com os veículos mais compridos pode proporcionar economias adicionais. Considerando as distâncias seguras de separação, Nuskowski et al. (2017) reportaram uma redução de consumo de 8% para o veículo seguidor trafegando a 100 km/h e 67,4 m do líder. Os autores escolheram deliberadamente grandes distâncias para atender as diretrizes fornecidas pelo *United States Fire Administration*.

O impacto negativo do comboio sobre o sistema de arrefecimento dos motores dos veículos seguidores foi investigado por Lammert et al. (2014) e Ellis, Gargoloff e Sengupta (2015).

Figura 7 – Resultados numéricos (CFD) de economia de combustível em função da distância inter-veicular com o comboio alinhado a 89 km/h.

Fonte: Vegdla et al. (2015).

Figura 8 – Resultados numéricos (CFD) de economia de combustível em função da distância inter-veicular com o comboio desalinhado a 89 km/h.

Fonte: Vegdla et al. (2015).

Este efeito indesejado ocorre devido à esteira de baixa pressão gerada pelo veículo precedente. Andando com pequenas distâncias de separação, o veículo dianteiro impede que a quantidade desejada de ar chegue ao carro seguidor. Quando o resfriamento natural não é apropriado, a ventoinha é acionada com maior frequência para atender a demanda de resfriamento colocando em risco o consumo total de energia. Lammert et al. (2014) testaram dois caminhões em comboio num circuito oval registrando o tempo de acionamento da ventoinha. Baseado nos resultados, observa-se uma correlação entre o acionamento da ventoinha e a redução da efici-

ência com pequenas distâncias de separação. Por exemplo, trafegando a 105 km/h e 9,1 m de separação a economia de combustível ficou em torno de 6%. Ao reduzir apenas a distância de separação, o tempo de acionamento da ventoinha aumentou e a economia de combustível caiu para 4%.

Ellis, Gargoloff e Sengupta (2015) usaram um programa de CFD para estimar a redução da força de arrasto num comboio de três caminhões. Com 9 m de separação o desempenho do sistema de arrefecimento foi aceitável. Entretanto, com 5 m, o acionamento da ventoinha foi observado para todos os veículos com exceção do líder. Isto é, a redução da separação de 9 para 5 m proporcionou uma redução adicional da força de arrasto, mas ao custo de um menor potencial de resfriamento do motor. Os autores mostraram que uma outra abordagem para reduzir a força de arrasto consiste em fazer uso de pacotes aerodinâmicos. Para um caminhão solitário, 26% de redução da força de arrasto pode ser alcançada apenas com carenagens, saias laterais e caudas traseiras. Além disso, pacotes aerodinâmicos apresentaram resultados ainda melhores quando presentes em comboios.

Para comparar os diversos estudos sobre economia de combustível em comboios, detalhes e resultados dos testes mencionados acima são listados na Tabela 1.

2.2 MANUTENÇÃO DA FORMAÇÃO DE COMBOIO

Os estudos sobre a dinâmica de caminhões em comboio começaram nos anos 1950 (PIPES, 1953) focando nas análises de estabilidade da cadeia (*String stability*). Conjuntos estáveis são aqueles que conseguem atenuar os erros de espaçamento ao longo do comboio após uma perturbação longitudinal provocada pelo líder. Hoje, o estudo da manutenção do comboio pode ser separado em quatro componentes: dinâmica veicular, topologia do fluxo de informação, controle descentralizado e geometria de formação (ZHENG et al., 2016b). A Figura 9 ilustra a estrutura de quatro componentes com um comboio de $N+1$ veículos. O caminhão 0 é o líder, C indica o controlador e u é o esforço de controle. O primeiro componente descreve o comportamento dinâmico de cada veículo, também chamado de nó. A troca de informação entre os nós é descrita pela topologia de informação. De posse das informações disponíveis, leis de controle são implementadas através de controladores distribuídos. Por fim, a distância desejada entre cada integrante do comboio usando diferentes políticas de espaçamento proporcionam uma geometria de formação (LI et al., 2017).

Tabela 1 – Detalhes e resultados experimentais e numéricos focados nos efeitos aerodinâmicos de comboios de caminhões. A redução de consumo é reportada para o time numa dada velocidade de movimentação e distância de separação entre os veículos.

Dados	Redução
Autor: BISHOP et al. Ano: 2017 Veículos: 2 Peterbilt 579 Análise: Experimental - Pista de corrida	Consumo: 7% a 105 km/h e 9,1 m
Autor: BONNET; FRITZ Ano: 2000 Veículos: 2 Actros 1853 LS Análise: Experimental - Pista de corrida	Consumo: 15% a 80 km/h e 6,7 m
Autor: BROWAND; MCARTHUR; RADOVICH Ano: 2004 Veículos: 2 Freightliners Análise: Experimental - Pista de decolagem	Consumo: 11% a 89 km/h e 4 m
Autor: DAVILA Ano: 2013 Veículos: 2 Volvo FH12 Análise: Experimental - Pista de corrida	Consumo: 10% a 85 km/h e 5 m
Autor: ELLIS; GARGOLOFF; SENGUPTA Ano: 2015 Veículos: 3 Volvo VNL 670 Análise: CFD - PowerFLOW	Arrasto: 21% a 105 km/h e 5 m
Autor: LAMMERT et al. Ano: 2014 Veículos: 2 Peterbilt 386 Análise: Experimental - Pista de corrida	Consumo: 6% a 89 km/h e 9,1 m
Autor: MIHELIC; SMITH; ELLIS Ano: 2015 Veículos: 2 Peterbilt 579 Análise: CFD - PowerFLOW	Arrasto: 12.8% a 105 km/h e 9,1 m
Autor: NUSZKOWSKI et al. Ano: 2017 Veículos: 2 Freightliners Análise: Experimental - Rodovia	Consumo: 8% ^(*) a 100 km/h e 67,4 m
Autor: TSUGAWA Ano: 2014 Veículos: 4 caminhões (misto) Análise: Experimental - Pista de corrida	Consumo: 18% a 80 km/h e 4,7 m
Autor: VEGENDLA et al. Ano: 2015 Veículos: 3 caminhões médios Análise: CFD - STAR-CCM	Consumo: 12% a 89 km/h e 9,1 m

Fonte: Autor.

(*) Apenas caminhão seguidor.

Figura 9 – Estrutura de quatro componentes para a manutenção do comboio. A dinâmica veicular se refere aos modelos matemáticos que descrevem a movimentação dos integrantes do comboio. O fluxo de informação determina como é feito o compartilhamento de dados entre os caminhões envolvidos. Com estas informações, os controladores são responsáveis por manter a distância de separação definida pela geometria de formação escolhida.

Fonte: Li et al. (2017).

A dinâmica veicular pode ser caracterizada por diferentes tipos de modelos e comboios. Aqui, o foco consiste nos modelos longitudinais que descrevem a dinâmica acoplada do conjunto de veículos. Os modelos podem ser do tipo integrador simples (LIN; FARDAD; JOVANOVIC, 2012), uma entrada - uma saída (HERMAN et al., 2015), segunda ordem (PETERS; MIDDLETON; MASON, 2014), terceira ordem (ZHENG et al., 2016b) e não linear (ZHENG et al., 2017). Os comboios são classificados de acordo com a sua homogeneidade, por exemplo, comboios compostos por veículos iguais são chamados de homogêneos (HO) (HERMAN et al., 2015). Neste caso, o projeto de controle é significativamente simplificado. Em contrapartida, quando veículos diferentes formam comboios, o conjunto é chamado de heterogêneo (HE) (ZHENG et al., 2017).

A topologia do fluxo de informação define como as informações de cada integrante são espalhadas pelo comboio. Esta conectividade permite o envio dos dados de posição, velocidade e aceleração em tempo real. Existem seis tipos de topologias comumente utilizadas (ZHENG et al., 2016b) e elas se encontram ilustradas na Figura 10. A primeira é chamada de predecessor-seguidor (PF, predecessor-following) e é alcançada quando o veículo seguidor recebe informação apenas do veículo precedente (PLOEG et al., 2014). Quando um veículo recebe informações do seguidor e do precedente a topologia é chamada de bidirecional (BD, bidirectional) (ZHENG et al., 2016a). Ambos os casos podem ser implementados utilizando apenas sensores de distância. Entretanto, com o desenvolvimento das comunicações V2V, estas topologias podem receber uma informação adicional do líder resultando nas topologias predecessor-

líder-seguidor (PLF, predecessor-leader-following) (PETERS; MIDDLETON; MASON, 2014) e bidirecional-líder (BDL, bidirectional-leader) (ZHENG et al., 2016a).

Além disso, outras duas variantes são as topologias dois-predecessores-seguidor (TPF, two-predecessors-following) (PLOEG et al., 2014) e dois-predecessores-líder-seguidor (TPLF, two-predecessors-leader-following) (GAO et al., 2016) que consideram as informações dos dois veículos à frente. Uma topologia que não se enquadra em nenhuma das mencionadas acima é considerada uma topologia genérica (GT, generic topology). Cada topologia tem suas vantagens e limitações para atingir a estabilidade da cadeia. Por exemplo, sob a topologia PF a estabilidade da cadeia não pode ser garantida para uma série de estratégias de controle (SEILER; PANT; HEDRICK, 2004). Uma discussão mais detalhada sobre os impactos da topologia do fluxo de informação pode ser encontrada em Zheng et al. (2016b). Detalhes sobre a estrutura de comunicação estão fora do escopo desta tese. Entretanto, o leitor interessado pode verificar o trabalho de Dey et al. (2016). Nele, os autores apresentaram uma revisão sobre os métodos de comunicação, seus protocolos e adequação às aplicações de comboio.

Figura 10 – Topologias do fluxo de informação comumente utilizadas em comboios de veículos.

Fonte: Zheng et al. (2016b).

Os objetivos dos controladores da movimentação em comboio são manutenção dos veículos dentro da faixa de rolamento (*lane keeping*), controle da velocidade de tráfego (*speed control*), prevenção de colisão (*collision avoidance*) e regulação da distância de separação entre

os veículos (*gap keeping*) (TSUGAWA; JESCHKE; SHLADOVER, 2016). Duas abordagens de processamento são utilizadas, centralizada e descentralizada. Na centralizada, todas as informações vão para uma unidade central que processa a informação e repassa as instruções para os veículos. Neste caso, um sistema de comunicação entre veículos e infraestrutura (V2I, *vehicle-to-infrastructure*) é necessário. No processamento descentralizado, os veículos devem decidir o próprio comportamento baseado apenas no processamento local podendo se aproveitar de informações adicionais provenientes das comunicações V2V e V2I.

Esquemas de controle descentralizados são desenvolvidos para reduzir os problemas de atraso devido à comunicação sem fio entre os veículos (VERGINIS et al., 2017). Na literatura, autores apresentam principalmente controladores do tipo linear (MILANÉS et al., 2014), ótimo (ALAM et al., 2014), H_∞ (XIA et al., 2017), modos deslizantes (SMC, *sliding mode control*) (KWON; CHWA, 2014), preditivo (MPC, *model predictive control*) (DUNBAR; CAVENEY, 2012), *backstepping* (YUE et al., 2015) e baseados em desigualdades matriciais lineares (LMI, *linear matrix inequality*) (SALVI; SANTINI; VALENTE, 2017). As métricas de desempenho que estes controladores devem cumprir são estabilidade da cadeia, margem de estabilidade (*stability margin*) e coerência (*coherence behavior*) (LI et al., 2017). Como mencionado anteriormente, a estabilidade da cadeia é alcançada quando as perturbações são atenuadas ao longo do comboio. A margem de estabilidade caracteriza a velocidade de convergência do sistema e coerência é calculada usando a norma H_2 do sistema em malha fechada.

A geometria de formação desejada é especificada de acordo com três políticas: distância constante (CD, *constant distance*), tempo constante (CTH, *constant time headway*) e distância não linear (ND, *nonlinear distance*). Utilizando a primeira, os controladores longitudinais procuram manter uma distância constante entre os dois veículos adjacentes e é independente da velocidade do comboio (PETERS; MIDDLETON; MASON, 2014). Em contrapartida, a distância desejada no caso CTH varia linearmente com a velocidade dos veículos (DI BERNARDO; SALVI; SANTINI, 2015; MARZBANRAD; MOGHADDAM, 2016). Por fim, quando a distância de interesse é descrita como uma função não linear da velocidade do comboio, a geometria alcançada é a ND (ZHANG; SUN; OROSZ, 2017). Estabilidade e capacidade de fluxo de veículos constituem a principal relação de compromisso entre estas três políticas de separação.

Na Tabela 2, algumas aplicações experimentais de controladores em comboios veiculares são brevemente detalhadas. Note que os estudos utilizando carros de passeio foram acrescentados mediante interpretação dos carros como plataformas de validação para controladores que poderiam ser usados em comboios de caminhões. De maneira análoga, os estudos pura-

mente numéricos são apresentados na Tabela 3. Em todos os casos, a estabilidade da cadeia foi alcançada.

Tabela 2 – Detalhes dos estudos experimentais dedicados à manutenção do comboio.

1º Autor	Ano	Controlador	Tipo	Geometria	Topologia	Comboio
Alam	2014	Ótimo	HE	CTH	PF	2 Scania HDVs
Fritz	2004	Não linear	HE	CTH	PLF	2 Actros 1853 LS
Milanés	2014	Linear	HO	CTH	PF	4 Infiniti M56s
Ploeg	2014	H_∞	HO	CTH	PF e TPF	3 Toyota Prii
Verginis	2017	GAPPC ⁽¹⁾	HE	CD	PF e BD	5 robôs pequenos
Xia	2017	H_∞	HE	CD	Várias ⁽²⁾	11 veículos ⁽³⁾
Yue	2015	Backstepping	HE	CD	PLF	4 carros em escala
Zheng	2016a	Linear	HO	CD	BD e GT	5 robôs pequenos

Fonte: Autor.

⁽¹⁾ Global approximation-free prescribed performance control (GAPPC) (BECHLIOULIS; ROVITHAKIS, 2014).

⁽²⁾ PF, BD e BDL.

⁽³⁾ Hardware in the loop.

Tabela 3 – Detalhes dos estudos numéricos dedicados à manutenção do comboio.

1º Autor	Ano	Controlador	Tipo	Geometria	Topologia	Comboio
Bernardo	2015	Linear	HE	CTH	GT	5 veículos
Dunbar	2012	MPC	HE	CD	PLF	7 veículos
Gao	2016	H_∞	HE	CD	TPLF	11 veículos
Herman	2015	Linear	HO	CD	BD	>11 veículos
Kwon	2014	SMC	HE	CD	BD	6 veículos
Lin	2012	Ótimo	HO	CD	BD	>11 veículos
Marzbanrad	2016	SMC	HE	CTH	PF	2 veículos
Moser	2017	MPC	HE	CTH	TPF	BMW 3 series
Peters	2014	Linear	HO	CD	PLF	10 veículos
Salvi	2017	LMI	HE	CTH	Várias ⁽¹⁾	8 veículos
Zhang	2017a	SMC	HE	ND	GT	4 veículos
Zheng	2017a	MPC	HE	CD	Várias ⁽²⁾	8 veículos
Zheng	2017b	H_∞	HO	CD	GT	11 veículos
Zheng	2016b	Linear	HO	CD	Várias ⁽³⁾	11 veículos

Fonte: Autor.

⁽¹⁾ PLF, TPF e GT.

⁽²⁾ PF, PLF, TPF e TPLF.

⁽³⁾ PF, PLF, BD, BDL, TPF e TPLF.

2.3 COORDENAÇÃO DE CAMINHÕES

A coordenação de veículos em rodovias consiste no controle da velocidade de cada veículo envolvido num determinado cenário para que manobras sincronizadas sejam realizadas. Com o foco em aumentar a capacidade de tráfego das rodovias, estudos foram conduzidos em simuladores de direção (SARVI; KUWAHARA; CEDER, 2004) e em testes experimentais (MILANÉS et al., 2011) explorando o cenário de coordenação em rampa de acesso de rodovia. Nesta situação, os veículos na rodovia devem ajustar a sua velocidade em resposta ao veículo que se aproxima pela rampa de acesso. A coordenação de um conjunto de veículos próximos num trecho de rodovia foi proposta por Khan e Boloni (2005) usando o chamado *Convoy Driving Device* que auxilia o motorista em como alterar a sua velocidade para integrar ou abandonar um comboio. De maneira semelhante, um sistema de automação para entrar e sair de comboios foi proposto por Hallé e Chaib-draa (2005) usando uma arquitetura hierárquica com três camadas cobrindo comunicação, gerenciamento e atuação de cada integrante. Estes estudos focaram principalmente no aumento do tráfego em rodovias. Em contrapartida, estudos recentes sobre os cenários de coordenação em rampas de acesso (RIOS-TORRES; MALIKOPOULOS, 2017a,b) e manobras em trechos de rodovias (GOLI; ESKANDARIAN, 2014) consideraram benefícios adicionais. Por exemplo, Rios-Torres e Malikopoulos (2017b) propuseram um controlador ótimo centralizado para coordenar até 30 veículos em rampas de acesso reduzindo consumo de combustível e tempo de manobra.

Comboios podem ser formados através do ajuste dos horários de partida dos caminhões de forma que eles iniciem a viagem juntos ou se encontrem em alguma interseção da rodovia. Nesta linha de pesquisa, Zhang, Jenelius e Ma (2017) investigaram a coordenação de dois caminhões com mesma origem e mesmo destino, porém com horários de chegada distintos. Neste caso, a movimentação em comboio até o destino implica impontualidade de ao menos um dos caminhões, pois os diferentes horários de chegada não podem ser atendidos simultaneamente. O problema de ajuste do horário de partida considera não apenas o consumo, mas também custo de mão de obra e penalidades por impontualidade, para verificar se a movimentação em comboio é mais econômica do que a individual. A restrição que impõe o horário de chegada foi relaxada e o custo associado ao desvio do horário de chegada em relação ao horário programado foi incluído na função objetivo. Por exemplo, a chegada antecipada pode acarretar custos como aluguel de pátio para espera e o atraso pode acarretar multas contratuais. Com base na

diferença dos horários de entrega programados, os autores identificam se a movimentação em comboio é vantajosa ou se os caminhões devem realizar a entrega individualmente.

Outra aplicação das estratégias de coordenação consiste na formação de comboios a partir da organização eficiente de veículos dispersos numa malha rodoviária. Nos últimos anos, esta abordagem se tornou praticável devido ao desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação e posicionamento. Anteriormente, a maioria dos estudos focavam em veículos já em formação de comboio, como discutido na Seção 2.2, enquanto a coordenação de veículos dispersos foi praticamente negligenciada (LIANG, K. Y.; MÅRTENSSON, J.; JOHANSSON, K. H., 2016; SAEEDNIA; MENENDEZ, 2017). Para ilustrar este cenário, uma oportunidade de formação de comboio numa interseção de rodovia é mostrada na Figura 11. Neste caso, um caminhão solitário e um comboio de três caminhões se aproximam de uma interseção por caminhos distintos. A velocidade dos caminhões deve ser alterada para garantir que eles cheguem na interseção no mesmo instante e um comboio de quatro caminhões possa ser formado.

Figura 11 – Exemplo de uma oportunidade de coordenação de caminhões numa rodovia em que um comboio de três veículos e um caminhão solitário se aproximam de uma interseção por meio de rotas distintas.

Fonte: Kuo-Yun Liang et al. (2016)

A primeira estratégia de coordenação de veículos dispersos para redução do consumo de combustível foi apresentada por Meisen, Seidl e Henning (2008) e consiste num algoritmo de mineração de dados para planejar e organizar comboios. Em geral, a coordenação de dois caminhões separados numa rodovia possui duas estratégias principais, alcance e desaceleração

(SAEEDNIA; MENENDEZ, 2017). A primeira é caracterizada pelo aumento da velocidade do caminhão seguidor para alcançar o líder. Em contrapartida, a segunda requer que o líder desacelere para permitir a aproximação do veículo seguidor. Ambas as estratégias são válidas, mas o perfil de velocidade necessário para reduzir o consumo total de combustível não é evidente. Na estratégia de alcance, o aumento da velocidade do seguidor causa um consumo adicional de energia que deve ser compensado durante a movimentação em comboio. Na estratégia de desaceleração, quando o comboio é formado, o conjunto deve aumentar a velocidade para que as restrições de horário sejam atendidas.

Na Figura 12, dois caminhões trafegam com velocidades v_p (precedente) e v_a (subsequente) com o mesmo destino e hora de chegada. Inicialmente, a distância entre eles é d_p e a distância do caminhão subsequente ao destino é d_d . Neste cenário, as estratégias de alcance e desaceleração podem ser implementadas e, dependendo das velocidades iniciais, o comboio pode ser formado antes dos caminhões chegarem ao destino. Entretanto, devido ao custo energético da aproximação, esta manobra pode não ser a solução com menor consumo total de combustível, mesmo havendo um trecho de movimentação em comboio. De maneira geral, para uma dada distância até o destino, o potencial de economia de combustível cai com o aumento da distância inicial de separação entre os veículos. Kuo-Yun Liang, Jonas Mårtensson e Karl Henrik Johansson (2013) mostraram que uma economia de combustível de 7% pode ser obtida com a estratégia de alcance num trecho de 350 km de rodovia e separação inicial de 10 km. Baseado na relação entre distância total de viagem e distância inicial de separação, d_d/d_p , os autores forneceram uma curva de compensação indicando as relações em que a estratégia de alcance seria benéfica.

K. Y. Liang, J. Mårtensson e K. H. Johansson (2016) propuseram um algoritmo de coordenação para formação de comboios através do ajuste da velocidade de caminhões dispersos numa rodovia. O algoritmo é capaz de coordenar veículos adjacentes aos pares para reduzir o consumo de combustível total da manobra. Um cenário semelhante ao ilustrado na Figura 12 serve de base para o algoritmo que utiliza um problema de otimização estática para identificar o potencial de economia entre os pares de caminhões adjacentes. Esta rotina de otimização faz uso da função *fmincon*¹ do programa Matlab. Numa dada iteração do algoritmo, as velocidades dos dois caminhões com o maior potencial de economia são ajustadas para que a formação do comboio ocorra. Na iteração seguinte, o potencial de economia é novamente calculado e um novo par de veículos é agrupado. Para avaliar o algoritmo proposto, os autores simularam um

¹<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>

Figura 12 – Exemplo do cenário de coordenação em que as estratégias de alcance e desaceleração podem ser aplicadas para a formação de comboio.

Fonte: Kuo-Yun Liang, Jonas Mårtensson e Karl Henrik Johansson (2013)

cenário de coordenação com dois caminhões num trecho de 280 km da rodovia entre as cidades de Södertälje e Jönköping na Suécia. A simulação considera a topografia da rodovia e um modelo validado de veículo sendo guiado por um sistema de CC que procura impor a velocidade de referência sugerida pelo algoritmo. Os testes realizados pelos autores mostraram uma redução de consumo de energia de 3,8%, 2,2% e 1,7% para as duplas de caminhões pesando 20, 40 e 60 toneladas, respectivamente.

O potencial de economia de combustível através da coordenação em larga escala foi explorado por K. Y. Liang, J. Mårtensson e K. H. Johansson (2014) usando dados de sistema de posicionamento global (GPS, global positioning system) fornecidos pelo sistema de gerenciamento de frota (FMS, fleet management system) da Scania. Um registro diário da posição de quase dois mil caminhões pesados foi usado para verificar as oportunidades de formação de comboios numa malha rodoviária da Europa. O algoritmo implementado fez uso de uma série de estratégias de coordenação, incluindo a apresentada por Kuo-Yun Liang, Jonas Mårtensson e Karl Henrik Johansson (2013). Os autores reportaram uma economia total de combustível de 0,22% sob a estratégia de alcance. Embora este número pareça pequeno, é importante notar que este dado considerou apenas caminhões Scania equipados com o FMS. Utilizando uma estratégia mais eficiente, Larson, Liang e Johansson (2015) propuseram uma estrutura de coordenação alocada em interseções de rodovias. Os controladores usados nas simulações conseguem ajustar a velocidade e alterar a rota dos caminhões que se aproximam para formar comboios econômi-

cos. Segundo os autores, a economia de combustível pode exceder 5% com mais de dois mil caminhões posicionados aleatoriamente na malha rodoviária considerada.

A influência da densidade de tráfego nas oportunidades de colaboração e eficiência da coordenação pode ser encontrada em Kuo-Yun Liang et al. (2016). Os autores relataram um atraso do instante de formação do comboio em condições de tráfego mais intensas em comparação ao tempo previsto com tráfego livre. Além disso, alguns comboios não conseguem nem ser formados, por exemplo, quando um veículo se coloca persistentemente entre os caminhões líder e seguidor. Saeednia e Menendez (2016) alertaram que os comboios são gargalos móveis que podem influenciar negativamente o fluxo geral da rodovia. Por este motivo, as autoras utilizaram um sistema de evento discreto para desenvolver uma plataforma que auxilia a decisão de formar ou desmanchar comboios com base nas condições de tráfego em volta. Em seguida, Saeednia e Menendez (2017) apresentaram um algoritmo iterativo baseado em consenso para formação de comboios sem variações excessivas da velocidade de cada veículo. Neste caso, os caminhões são tratados como agentes que devem concordar com uma determinada característica da formação e atuar apropriadamente para reduzir a distância de separação entre os veículos envolvidos. Devido a sua natureza iterativa, o algoritmo permite a adaptação do perfil de velocidade diante da variação da condição de tráfego ao longo da rodovia.

Como discutido até aqui, nos últimos anos, diversas estratégias de coordenação vem sendo desenvolvidas e apresentadas nos artigos acadêmicos. Entretanto, este tema apresenta tópicos ainda não inteiramente resolvidos e diversos aspectos que devem ser aperfeiçoados para implementação e início da fase experimental. Tratando de coordenação em rodovias, por exemplo, a contribuição de K. Y. Liang, J. Mårtensson e K. H. Johansson (2016) utiliza a coordenação de caminhões aos pares, o que proporciona uma solução subótima quando um maior número de caminhões é considerado. A flexibilização da restrição do horário de chegada proposta por Zhang, Jenelius e Ma (2017) fornece um aprimoramento da formulação do problema, porém cenários com apenas dois caminhões são considerados. Em ambos os casos, a extensão das estratégias para a coordenação simultânea de um maior número de caminhões não é trivial. Tratando esta limitação, o algoritmo baseado em consenso proposto por Saeednia e Menendez (2017) possibilita a coordenação simultânea, porém a redução de consumo de combustível e o desmanche da formação do comboio não são considerados na estratégia de geração dos perfis de velocidade.

Além dos desafios tecnológicos, a natureza competitiva do mercado de transporte de cargas impõe restrições adicionais às soluções de coordenação, pois as empresas querem preservar

a privacidade de suas operações. Isto é, os donos de transportadoras não estão dispostos a compartilhar detalhes do itinerário de seus caminhões com seus competidores, apesar dos potenciais benefícios da formação do comboio (FAROKHI; SHAMES; JOHANSSON, 2017). Por este motivo, as transportadoras se limitariam a formar comboios apenas com os caminhões de sua própria frota ou da frota de alguma empresa parceira (BHOOPALAM; AGATZ; ZUIDWIJK, 2018).

De modo geral, as abordagens de coordenação encontradas na literatura consideram cenários simplificados num único trecho de rodovia. Em alguns casos, os resultados obtidos nestes cenários simplificados são usados como heurística nos cenários que consideram diversos caminhões e as ramificações da malha rodoviária. Entretanto, estes extensos conjuntos de vias apresentam trechos de baixa velocidade devido aos limites impostos pela legislação, qualidade do pavimento, obras e congestionamentos. Nestas condições, a coordenação pode ter seus benefícios completamente perdidos e, inclusive, gerar manobras com maior consumo do que o caso sem coordenação. Com as limitações de velocidade, o efeito aerodinâmico passa a ser menos relevante e os perfis de velocidade não conseguem ser realizados. Esta situação pode ser agravada nas imediações de regiões metropolitanas. O que se tem na prática são trechos intermitentes que apresentam condições propícias para a formação de comboios.

Portanto, existe uma demanda por uma estratégia ótima de coordenação que considere simultaneamente três ou mais caminhões, o consumo de combustível, a privacidade das transportadoras e uma formulação do problema condizente com os aspectos práticos da movimentação. Além disso, as estratégias de coordenação devem ser avaliadas através de simulações com modelos validados experimentalmente ou testes práticos com caminhões instrumentados. Os principais aspectos a serem monitorados são o consumo de combustível e as emissões de GEEs.

3 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa consiste no desenvolvimento de uma estratégia ótima de coordenação de veículos pesados em trânsito para redução do consumo de combustível e aumento da densidade de tráfego em trechos de rodovias através da formação de comboios. Além disso, esta estratégia deve ser capaz de coordenar diversos caminhões simultaneamente preservando a privacidade das transportadoras e considerando a intermitência dos trechos propícios para coordenação de veículos em rodovias.

Nesta tese, portanto, optou-se por coordenar veículos num trecho intermediário de rota utilizando um problema de otimização estática (otimização não linear com restrições) e um problema de controle ótimo para a obtenção dos perfis de velocidade que minimizam o consumo de combustível total da movimentação. Uma central de processamento é responsável pelo monitoramento do trecho, execução do algoritmo de coordenação e transmissão dos perfis ótimos de velocidade aos controladores da dinâmica longitudinal de cada veículo. A avaliação da estratégia proposta é feita através da simulação de diferentes cenários utilizando modelos validados, disponíveis na literatura, da dinâmica longitudinal e de consumo. A presente tese contribui para o estado da arte através do desenvolvimento e avaliação de uma estratégia ótima de coordenação que, principalmente, leva em consideração dois ou mais caminhões simultaneamente, inclui a fase de desmanche do comboio e permite a formação de comboios parciais. Os métodos e resultados apresentados nesta tese estende diretamente o trabalho de K. Y. Liang, J. Mårtensson e K. H. Johansson (2016) considerando também as principais características dos trabalhos de Zhang, Jenelius e Ma (2017) e Saeednia e Menendez (2017). A lista completa das contribuições desta tese se encontra abaixo:

- a) coordenação de um número elevado de caminhões simultaneamente;
- b) consideração da fase de separação nos problemas de coordenação;
- c) viabilização da formação de comboios parciais;
- d) interpretação da malha rodoviária como um trecho equivalente de rodovia;
- e) generalização do problema de otimização para N caminhões;
- f) utilização da teoria de controle ótimo para resolução do problema de coordenação;
- g) análise de sensibilidade das diferentes condições de coordenação;
- h) desenvolvimento de um ambiente de simulação para avaliação de estratégias de coordenação.

De acordo com o conhecimento do autor desta tese, a coordenação de caminhões utilizando uma formulação semelhante de controle ótimo ainda não foi apresentada na literatura. Análises de sensibilidade de consumo em função de determinadas condições do problema de coordenação vem sendo tratadas por outros autores. Entretanto, nesta tese, diferentes condições são consideradas e analisadas. Pela primeira vez, um maior número de veículos são considerados simultaneamente numa estratégia ótima de coordenação que inclui também a fase de desmanche. A simulação do cenário de coordenação com modelos validados possibilita a avaliação da estratégia proposta e pode servir de base para avaliações de outras estratégias.

4 COORDENAÇÃO DE CAMINHÕES

Os modelos matemáticos e os problemas de coordenação necessários para a realização dos objetivos desta tese são apresentados a seguir. O modelo da dinâmica longitudinal e os controladores responsáveis pela movimentação do veículo são apresentados nas Seções 4.1 e 4.2, respectivamente. Em seguida, o modelo de consumo é descrito na Seção 4.3. Estes modelos são usados nas simulações de avaliação e servem de base para o desenvolvimento dos problemas de otimização estática (Seção 4.5) e controle ótimo (Seção 4.6). Os detalhes sobre o cenário de coordenação são descritos na Seção 4.4. Por fim, a descrição dos recursos computacionais se encontra na Seção 4.7.

4.1 DINÂMICA LONGITUDINAL

O modelo da dinâmica longitudinal utilizado nesta tese é baseado nos modelos apresentados em Wang e Rakha (2017), Turri, Besselink e Johansson (2017) e Li et al. (2017). O caminhão é interpretado como um ponto material e as dinâmicas lateral e vertical não são consideradas no modelo. O modelo físico da dinâmica longitudinal do caminhão se encontra ilustrado na Figura 13. A base $\{O\mathbf{I}\mathbf{J}\mathbf{K}\}$ é fixa ao referencial inercial e a base $\{T\mathbf{i}\mathbf{j}\mathbf{k}\}$ é solidária ao caminhão com origem no centro de massa. No referencial do caminhão, o vetor $\mathbf{i}$ aponta para frente na direção longitudinal e o vetor $\mathbf{j}$ aponta para cima. O plano horizontal é entendido como o plano normal ao vetor de aceleração gravitacional. O ângulo formado entre o caminhão e o plano horizontal é dado por θ . O caminhão tem apenas um grau de liberdade caracterizado pelo deslocamento na direção $\mathbf{i}$. Por fim, s mede a distância percorrida pelo ponto T desde a origem O .

Aplicando a segunda lei de Newton, tem-se

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} + \mathbf{D} + \mathbf{R} + \mathbf{G} + \mathbf{N}, \quad (4.1)$$

onde m é a massa total do veículo, $\mathbf{a}$ é o vetor de aceleração do centro de massa, $\mathbf{F}$ é o vetor da força longitudinal exercida pelos pneus, $\mathbf{D}$ é o vetor da força de arrasto aerodinâmico, $\mathbf{R}$ é o vetor da força de resistência ao rolamento, $\mathbf{G}$ é o vetor da força peso e $\mathbf{N}$ é o vetor da força normal exercida pelo pavimento.

O vetor aceleração é dado por

Figura 13 – Modelo físico do veículo com as forças consideradas.

Fonte: Autor.

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} \quad (4.2)$$

e os vetores de força são dados por

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= F \mathbf{i} \\ \mathbf{D} &= -D \mathbf{i} \\ \mathbf{R} &= -R \mathbf{i} \\ \mathbf{G} &= (-G \sin \theta) \mathbf{i} + (-G \cos \theta) \mathbf{j} \\ \mathbf{N} &= N \mathbf{j}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde F é a força longitudinal, D é a força de arrasto aerodinâmico, R é a força de resistência ao rolamento, G é a força peso e N é a força normal.

Substituindo as Equações (4.2) e (4.3) em (4.1), tem-se

$$m(a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}) = (F - D - R - G \sin \theta) \mathbf{i} + (N - G \cos \theta) \mathbf{j}. \quad (4.4)$$

Considerando apenas a dinâmica na direção do versor $\mathbf{i}$, a dinâmica longitudinal do veículo é dada por

$$\gamma m a_x = F - D - R - G \sin \theta. \quad (4.5)$$

onde γ é o fator de massa usado para contabilizar os efeitos inerciais associados aos elementos rotativos do trem de potência.

O vetor velocidade do caminhão é sempre tangente à trajetória e pode ser escrito como

$$\mathbf{v} = v \mathbf{i} = \dot{s} \mathbf{i}, \quad (4.6)$$

onde v é a velocidade longitudinal do veículo na direção $\mathbf{i}$.

Derivando a Equação (4.6) em relação ao tempo e comparando o resultado com a Equação (4.2), a aceleração a_x na direção $\mathbf{i}$ pode ser escrita como

$$a_x(t) = a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{s}(t). \quad (4.7)$$

As forças presentes na Equação (4.5) são descritas a seguir. A força longitudinal F é dada por

$$F = \eta T(t), \quad (4.8)$$

onde η é a eficiência da transmissão e $T(t)$ é a força de tração calculada a partir do torque do motor considerando apenas as relações de transmissão.

A força de arrasto aerodinâmico para um único veículo solitário é dada por

$$D_s = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2(t), \quad (4.9)$$

onde C_d é o coeficiente experimental de arrasto aerodinâmico, ρ é a densidade do ar e A é a projeção da área frontal do veículo (HUCHO; AHMED, 1998). Entretanto, como visto na Seção 2.1, quando veículos seguidores trafegam próximos de seus líderes, a força de arrasto aerodinâmico de cada integrante do comboio são reduzidas. Diversos autores (LIANG, K. Y.; MÅRTENSSON, J.; JOHANSSON, K. H., 2016; TURRI; BESSELINK; JOHANSSON, 2017) consideram o uso de um fator de redução da força de arrasto, Φ . Logo, a expressão (4.9) passa a ser escrita como

$$D = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2(t) \Phi(d) = c v(t)^2 \Phi(d), \quad (4.10)$$

onde $c = \frac{1}{2} C_d \rho A$ é o coeficiente aerodinâmico combinado e $\Phi(d) \in [0,1]$ é o fator que regula a intensidade da força de arrasto e depende da distância d entre o veículo considerado e o veículo precedente. Quando o veículo trafega solitário, Φ é igual a 1. Em comboio, Φ varia entre 0 e 1. O modelo de $\Phi(d)$ proposto por Turri, Besselink e Johansson (2017) é utilizado nesta tese. Os autores apresentam a curva

$$\Phi(d) = 1 - \frac{C_{D,1}}{C_{D,2} + d}, \quad (4.11)$$

onde os coeficiente $C_{D,1}$ e $C_{D,2}$ são identificados através do método dos mínimos quadrados não linear utilizando os dados experimentais disponíveis em Hucho e Ahmed (1998). Os dados experimentais e a curva ajustada estão ilustradas na Figura 14.

Figura 14 – Fator de redução da força de arrasto aerodinâmico em função da distância entre os veículos. O modelo proposto por Turri, Besselink e Johansson (2017) é ajustado aos dados experimentais de Hucho e Ahmed (1998) através do método dos mínimos quadrados não linear.

Fonte: Turri, Besselink e Johansson (2017) e Hucho e Ahmed (1998).

A resistência ao rolamento é caracterizada por uma força R que se opõem ao movimento do veículo e é causada, principalmente, pela dissipação de energia que ocorre durante a interação do pneu com o solo. Esta perda se deve à natureza não conservativa do atrito dinâmico presente no escorregamento parcial da área de contato do pneu com a pista e da deformação circunferencial do pneu em movimento (GILLESPIE, 1992). A força R é dada por

$$R = m g f, \quad (4.12)$$

onde g é o módulo da aceleração da gravidade e f é o coeficiente de resistência ao rolamento.

A força peso G é dada por

$$G = m g. \quad (4.13)$$

Substituindo as Equações (4.7), (4.8), (4.10), (4.12) e (4.13) em (4.5), a equação diferencial que descreve a dinâmica longitudinal do caminhão é dada por

$$\gamma m \dot{v}(t) = \eta T(t) - c v(t)^2 \Phi(d) - m g f - m g \sin \theta(s). \quad (4.14)$$

Por fim, a dinâmica do trem de potencia é modelada como um sistema de primeira ordem com constante de tempo τ . Logo, a dinâmica longitudinal completa do caminhão é dada pelo sistema de equações diferenciais

$$\dot{s}(t) = v(t) \quad (4.15)$$

$$\gamma m \dot{v}(t) = \eta T(t) - c v(t)^2 \Phi(d) - m g f - m g \sin \theta(s) \quad (4.16)$$

$$\tau \dot{T} + T = T_{des}, \quad (4.17)$$

onde $\Phi(d)$ é dado pela Equação (4.11) e T_{des} é a tração desejada.

4.2 CONTROLADORES DA DINÂMICA LONGITUDINAL

A implementação da estratégia de coordenação deve levar em consideração os perfis de velocidade provenientes dos problemas de otimização estática e controle ótimo para gerar as manobras dos caminhões ao longo do trecho de rodovia. Para isto, os caminhões devem ser equipados, ao menos, com sistemas do tipo CC ou ACC, além do sistema de comunicação V2I. O caminhão líder pode simplesmente utilizar o sistema CC para seguir um perfil de velocidade fornecido pela central de processamento que é detalhada na Seção 4.4. Em contrapartida, os caminhões seguidores devem necessariamente estar equipados com o sistema de ACC para que a manutenção da pequena distância de separação seja realizada com segurança quando o comboio é formado.

Nas simulações de avaliação dos perfis de velocidade de referência apresentadas nesta tese (Seção 7), o modelo da dinâmica longitudinal dos caminhões (Equações (4.15)-(4.17)) é implementado computacionalmente com um sistema de controle ACC. Em geral, os detalhes de implementação deste tipo de sistema são amplamente protegidos pelas montadoras e seus fornecedores, ou seja, resultados e métodos não estão facilmente disponíveis na literatura acadêmica. Desta forma, os proprietários podem se beneficiar de uma vantagem comercial sobre seus competidores (XIAO; GAO, 2010). Entretanto, apesar de não ser o foco desta tese, os controladores implementados nas simulações de avaliação devem apresentar as principais características dos sistemas usados na prática.

Na Figura 15, é possível observar a arquitetura típica do sistema de controle ACC (XIAO; GAO, 2010). O sistema é composto pelas partes de aquisição, processamento, atuação e exibição. A primeira delas é responsável por adquirir as informações do motorista e do ambiente para alimentar a parte de processamento, composta pelo chamado controle de alto nível (RAJAMANI, 2012). A parte de atuação realiza o controle de baixo nível com base na aceleração desejada fornecida pela parte de processamento (BJORNBERG, 1994). A parte de exibição mostra ao usuário informações associadas à operação do veículo. Esta arquitetura modular apresenta um maior nível de segurança devido à preservação de funcionalidades em casos de falhas locais (KIENCKE, 1988). Por exemplo, uma falha no módulo de controle de velocidade não compromete os módulos de controle do motor e de frenagem, ao contrário do que poderia acontecer com o uso de um arranjo centralizado. Além disso, as patentes de Kustosch (2007) e Shin (2010) corroboram a arquitetura modular de controle longitudinal como a ilustrada na Figura 15.

Figura 15 – Arquitetura típica do sistema ACC.

Fonte: Xiao e Gao (2010)

O botão de acionamento sinaliza a permissão para a atuação do sistema ACC. O seletor de velocidade permite que o usuário especifique a velocidade desejada de cruzeiro quando nenhum obstáculo é captado pelo sensor de distância. Os sensores de velocidade e curva complementam o sensoramento necessário para a parte de processamento. O seletor de tempo

especifica a separação desejada entre os veículos em função do tempo e as posições dos pedais de acelerador e freio são usadas para desativar o sistema ACC. Maiores detalhes sobre os controladores das partes de processamento e atuação são apresentados abaixo.

A técnica de *feedback linearization* é aplicada pelo controlador de baixo nível para converter o modelo não linear descrito nas Equações (4.15)-(4.17) num modelo linear que deve servir de base para o projeto do controlador longitudinal de alto nível (SWAROOP et al., 1994; XIAO; GAO, 2011; ZHENG et al., 2016b). A tração desejada que lineariza a Equação (4.16) é dado por

$$T_{des}(t) = \frac{1}{\eta} (c v (2 \tau \dot{v} + v) \Phi + m g f + \gamma m u), \quad (4.18)$$

onde u é a noval variável de entrada do sistema.

A partir da dinâmica longitudinal, a força de tração pode ser escrita como

$$T = \frac{1}{\eta} (\gamma m \dot{v} + m g f + c v^2 \Phi). \quad (4.19)$$

Note que a componente longitudinal da força peso é desprezada na Equação (4.19), pois será interpretada como perturbação do sistema. Derivando a força de tração em relação ao tempo, tem-se

$$\dot{T} = \frac{1}{\eta} (\gamma m \dot{a} + c 2 v \dot{v} \Phi). \quad (4.20)$$

Substituindo as Equações (4.18), (4.19) e (4.20) em (4.17), tem-se

$$\tau \frac{1}{\eta} (\gamma m \dot{a} + c 2 v \dot{v} \Phi) + \frac{1}{\eta} (\gamma m \dot{v} + m g f + c v^2 \Phi) = \frac{1}{\eta} (c v (2 \tau \dot{v} + v) \Phi + m g f + \gamma m u). \quad (4.21)$$

Reescrevendo, tem-se

$$\tau \gamma m \dot{a}(t) + c v (2 \tau \dot{v} + v) \Phi + \gamma m \dot{v}(t) + m g f = c v (2 \tau \dot{v} + v) \Phi + m g f + \gamma m u. \quad (4.22)$$

Logo,

$$\tau \dot{a}(t) + a(t) = u(t), \quad (4.23)$$

onde a aceleração desejada é dada por $a_{des} = u$. A dinâmica longitudinal do veículo é dada pela Equação (4.23) quando a lei de controle em (4.18) é implementada no módulo de baixo

nível ilustrado na Figura 15. Qualquer erro de modelagem ou perturbação do sistema deve ser compensado pelos controladores embarcados nos módulos de controle de velocidade e de distância que serão descritos a seguir. Os valores típicos de τ variam entre 0,5 e 1,0 s (ZHOU; PENG, 2005). As hipóteses simplificadoras consideradas e a equação diferencial (4.23) são amplamente utilizadas na literatura (ZHENG et al., 2016b; LI et al., 2017).

É possível observar que, para a implementação da lei de controle na Equação (4.18), a medição ou estimação da aceleração longitudinal é necessária. Com esta informação disponível, seria possível reduzir o modelo (4.15)-(4.17) a simplesmente $\dot{a} = u$. Entretanto, manter a constante de tempo na equação linearizada se mostra mais conveniente considerando as metodologias de projeto de controle de alto nível tipicamente aplicadas (STANKOVIC; STANOJEVIC; SILJAK, 2000). Alternativamente, Zheng et al. (2018) não consideram a medição de aceleração na lei de controle de baixo nível. Ainda assim, os autores projetam o controlador de alto nível para a planta apresentada na Equação (4.23) assumindo que os efeitos dos termos de aceleração não cancelados são rejeitados pelo controlador de alto nível.

Num estudo com 125 sujeitos, 98% das acelerações longitudinais num veículo de passeio se mantiveram entre -2,17 e 1,77 m/s² indicando a faixa de valores que seria natural ao ser humano (MOON; YI, 2008). Em concordância com estes dados, os limites de aceleração típicos em sistemas de controle longitudinal de veículos são $a_{max}=1$ m/s² e $a_{min}=-2$ m/s² (MAYR, 1994; YI; LEE; KWON, 2001). Portanto, estes limites são implementados em todos os controladores de alto nível desta tese. Além disso, estes valores estão de acordo com os limites de conforto impostos pela legislação (NAUS et al., 2010).

Baseado na equação diferencial (4.23), a função de transferência que representa a dinâmica da velocidade em relação à aceleração desejada é dada por

$$G(s) = \frac{V(s)}{A_{des}(s)} = \frac{1}{\tau s^2 + s}. \quad (4.24)$$

O controle de velocidade para a planta (4.24) pode ser obtido utilizando controladores lineares do tipo proporcional (P) ou proporcional-integral (PI). O primeiro não rejeita adequadamente as perturbações impostas sobre a planta e o segundo requer uma solução *anti windup* para evitar o acúmulo da integral do erro nos casos de saturação da variável manipulada. Como o objetivo é controlar a velocidade que descreve uma determinada movimentação de interesse, um controlador do tipo PI é implementado, pois o termo integral penaliza o desvio da posição do veículo real em relação à posição do veículo imaginário que se movimenta com a velocidade de referência. Portanto, o controle de velocidade é dado pela equação

$$a_{des} = k_p(v_{ref} - v) + K_i \int_0^{t_t} (v_{ref} - v) dt, \quad (4.25)$$

onde v_{ref} é a velocidade de referência. Além disso, uma solução *anti windup* do tipo *back calculation* é utilizada. Num sistema convencional de CC, v_{ref} é a velocidade especificada pelo motorista. Na estratégia de coordenação, v_{ref} consiste no valor associado ao perfil de velocidade obtido através dos algoritmos propostos nesta tese. A Equação (4.25) pode ser escrita como

$$a_{des} = k_p(v_{ref} - v) + K_i(x_{ref} - x). \quad (4.26)$$

O diagrama de blocos associado ao modelo longitudinal (4.24) com a lei de controle (4.26) e com a malha *anti windup* é ilustrado na Figura 16. Para exemplificar o desempenho do controlador, uma simulação é apresentada a seguir. A constante de tempo do modelo é dada por $\tau=0,5$ e os ganhos do controlador são $K_p=0,75$ e $K_i=0,19$ para que a resposta do sistema em malha fechada não apresente elevado sobressinal (RAJAMANI, 2012). Com a eventual saturação da variável manipulada, o termo integral acumula erro provocando um esforço de controle excessivo e indesejado. Para prevenir este comportamento, uma parcela proporcional à diferença entre o esforço de controle saturado u_s e o esforço de controle demandado u é descontada do sinal a ser integrado através de um ramo de realimentação com ganho $K_b=1$. Os limites da aceleração desejada são $a_{max} = 1 \text{ m/s}^2$ e $a_{min} = -2 \text{ m/s}^2$.

Figura 16 – Diagrama de blocos do controle de velocidade para uma entrada degrau na velocidade de referência. Uma entrada degrau adicional simula uma perturbação equivalente ao início da subida de uma ladeira.

Fonte: Autor.

O caminhão trafega inicialmente com uma velocidade de 20 m/s quando, após um segundo, a velocidade de referência assume o valor de 22 m/s. No instante 20 segundos, uma

perturbação é introduzida no sistema simulando o início da subida de uma ladeira com 6% de inclinação. No gráfico superior da Figura 17, a curva da velocidade do veículo é mostrada. É possível observar um sobressinal de 15% com o pico ocorrendo 4,6 segundos após o início do degrau. O veículo diminui a velocidade quando entra na ladeira, porém o controlador é capaz de rejeitar a perturbação constante em aproximadamente 10 segundos. No gráfico inferior da Figura 17, o valor de u indica o esforço de controle que sai do controlador PI e u_s indica o esforço de controle saturado. Além disso, é possível observar a saturação da aceleração desejada em 1 m/s^2 . Ao final, o valor da aceleração desejada estabiliza em aproximadamente $0,6 \text{ m/s}^2$ para compensar o efeito provocado pela subida da ladeira.

Figura 17 – Resultado da simulação do controle de velocidade. O gráfico superior indica a velocidade do veículo ao longo do tempo e o gráfico inferior indica a aceleração desejada passada para a malha de baixo nível.

Fonte: Autor.

O desenvolvimento apresentado até aqui considera apenas o seguimento de uma velocidade de referência. Ao se aproximar de um outro caminhão à frente, a velocidade precisa ser ajustada para que uma distância segura de separação seja mantida. Uma possibilidade consiste em implementar uma lei de controle que faça a manutenção de uma distância constante de separação, geometria de formação CD. Entretanto, este tipo de lei de controle possui limitações para garantir a estabilidade de cadeia num comboio com um maior número de veículos participantes (LI et al., 2017). Alternativamente, utiliza-se uma lei de controle que mantém o tempo de separação constante, geometria de formação CTH, isto é, a distância de separação desejada

entre o veículo considerado e o veículo precedente depende da velocidade e é escrita de forma simplificada como

$$d_{i,des} = t_h v_i, \quad (4.27)$$

onde v_i é a velocidade do veículo seguidor e t_h é uma constante a ser escolhida e representa o tempo que separa dois veículos consecutivos. Os valores típicos de t_h variam entre 1 e 2 segundos (ZHOU; PENG, 2005). A lei de controle utilizada é dada por

$$a_{des} = \frac{1}{t_h} ((v_1 - v_2) + \lambda((s_1 - s_2) - d_{des})), \quad (4.28)$$

onde λ é um parâmetro de ajuste do controlador e os índices 1 e 2 se referem aos caminhões líder e seguidor, respectivamente (RAJAMANI, 2012). A lei de controle em (4.28) penaliza a diferença de velocidade entre os dois caminhões e o desvio do valor de separação em relação à distância desejada dependente da velocidade. É possível demonstrar que a lei de controle (4.28) garante a estabilidade em cadeia quando $t_h \geq 2\tau$ (RAJAMANI, 2012).

Na Figura 18, é possível observar o diagrama de blocos que simula dois caminhões se movimentando em comboio. O bloco chamado de *Modelo caminhão* implementa a dinâmica longitudinal dada pela Equação (4.23) e o bloco *Controlador* implementa a lei de controle (4.28) com $t_h=1,0$ s e $\lambda=1$.

Figura 18 – Diagrama de blocos do controle de distância do veículo seguidor em relação ao veículo precedente. Uma entrada degrau altera a velocidade do veículo precedente.

Fonte: Autor

Os caminhões trafegam com velocidades iguais $v_1=v_2=20$ m/s a uma distância inicial de separação de 20 metros. Note que esta é a distância desejada para $t_h=1,0$. Na tentativa de reproduzir o pior cenário em uma frenagem brusca, a velocidade do caminhão líder é alterada através de uma entrada degrau para $v_1=18$ m/s. No gráfico superior da Figura 19, é possível observar a redução da distância de separação em função do tempo até a nova distância desejada de 18 metros, de acordo com a Equação (4.27). No segundo gráfico, as velocidades dos caminhões são ilustradas. O caminhão seguidor reduz a sua velocidade até estabilizar em $v_2=18$ m/s. Por fim, no gráfico inferior, a aceleração desejada é mostrada. Na tarefa de seguimento, por questões de segurança, a saturação associada ao conforto dos passageiros não é implementada.

Figura 19 – Resultado da simulação do controle de distância. O gráfico superior indica a distância de separação em função do tempo. O segundo gráfico mostra as velocidades de ambos os caminhões ao longo da manobra e o gráfico inferior ilustra a aceleração desejada.

Fonte: Autor

Os controladores de velocidade e distância implementados nos diagramas das Figuras 16 e 18 compõem os dois módulos que equipam a parte de processamento na arquitetura ilustrada na Figura 15. Entretanto, um módulo de chaveamento precisa ser desenvolvido para que, ao encontrar um veículo à frente, o sistema de controle deixe de seguir a velocidade de referência e passe a fazer a manutenção da distância de separação. O diagrama R – $\dot{R}$ proposto por

Fancher e Bareket (1994) é utilizado para promover a transição de uma estratégia de controle para a outra. O termo R consiste na distância de separação entre os dois veículos e o termo $\dot{R}$ se refere à velocidade relativa, ou seja, para dois caminhões consecutivos

$$\begin{aligned} R &= s_p - s_s \\ \dot{R} &= v_p - v_s, \end{aligned} \quad (4.29)$$

onde o índice p indica o veículo precedente e o índice s indica o veículo seguidor.

O diagrama $R - \dot{R}$ e a lógica de transição estão ilustrados na Figura 20. A movimentação de um par de veículos pode ser representada por um ponto no diagrama $R - \dot{R}$ dependendo da distância de separação e velocidade relativa. A distância de separação constante R_s entre os veículos define a reta de chaveamento entre os controladores de velocidade e distância. Na Figura 20, a região 1 caracteriza os pontos de operação em que o controle de velocidade é implementado. Na região 2, o controlador da dinâmica longitudinal procura manter a distância de separação especificada pela reta de referência até a distância desejada de separação R_{des} .

Figura 20 – Diagrama $R - \dot{R}$ proposto por Fancher e Bareket (1994). R se refere à distância de separação e $\dot{R}$ à velocidade relativa dos dois veículos. Na região 1, o veículo seguidor procura manter a velocidade de referência. Na região 2, a distância de referência deve ser mantida.

Fonte: Autor

Por exemplo, se a movimentação de um par de veículos for caracterizada pelo ponto A, o veículo seguidor deve operar através do módulo de controle de velocidade. Ao reduzir a distância de separação, a representação do par de veículos chega ao ponto B sobre a reta de chaveamento. Na região 2, o módulo de controle de distância deve operar. Como a distância de separação ainda é elevada ao entrar na região 2, a distância final desejada não pode ser usada como sinal de referência, pois isso geraria um esforço de controle elevado. Para suavizar a transição, uma reta de referência é utilizada para alterar a distância desejada linearmente em função da velocidade relativa do ponto B ao ponto C. A reta de referência ilustrada na Figura 20 é definida como

$$R = -T \dot{R} + R_{des}, \quad (4.30)$$

onde T é a inclinação da reta de chaveamento e $R_{des} = t_h v_p$. Ou seja, durante a transição, a distância de separação desejada é calculada com base no tempo de separação e utiliza a velocidade do caminhão precedente, pois é a velocidade para a qual a velocidade do caminhão seguidor tende quando o comboio é formado. A inclinação T depende do ponto de chaveamento entre as duas regiões e é calculada como

$$T = (R_{des} - R_s) / \dot{R}_s \quad (4.31)$$

Durante a transição do ponto B ao ponto C, o módulo de controle de distância de alto nível é implementado e o caminhão seguidor opera sob a lei de controle

$$a_{des} = \frac{1}{t_h} \lambda (R - R_{des}). \quad (4.32)$$

Ao formar o comboio no ponto C, o caminhão seguidor faz a manutenção da distância de separação com a lei de controle definida na Equação (4.28).

Originalmente, a lógica de chaveamento apresentada por Fancher e Bareket (1994) utiliza a própria reta de referência como a reta de chaveamento, ao invés de uma distância fixa R_s . A estratégia dos autores foca na prevenção de colisão em situações de elevada velocidade relativa (RAJAMANI, 2012), isto é, quando um veículo em alta velocidade encontra um veículo lento à frente e o sistema de controle precisa regular a distância de separação de forma segura. Diferentemente destes casos, em cenários de coordenação, as velocidades de referência, a princípio, devem garantir a formação do comboio de forma segura. Entretanto, os limites de potência podem atrapalhar o seguimento da velocidade de referência, especialmente em tre-

Neste exemplo, a constante de tempo do trem de potência é $\tau=0,5$ s, os parâmetros do controle de velocidade são $K_p=0,75$, $K_i=0,19$ e $K_b=1$ e os parâmetros do controle de distância são $\lambda=1$ e $t_h=1,0$ segundos. A reta de chaveamento do módulo de transição é definida pela distância $R_s=50$ m. A velocidade constante do caminhão líder é 15 m/s e a velocidade desejada do caminhão seguidor é 23 m/s. No gráfico superior da Figura 22, é possível observar a distância de separação entre os dois caminhões em função do tempo. Os dois caminhões estão separados inicialmente por 60 m e, ao final da simulação, por 15 m, como esperado. O perfil de velocidade de ambos os caminhões pode ser observado no gráfico inferior da Figura 22. O caminhão seguidor trafega por 1,25 segundos com velocidade constante. Neste período, o módulo de controle de velocidade está ativo e faz com o que o caminhão siga a velocidade de referência com a lei de controle (4.26). Como o caminhão líder está com uma velocidade menor, a distância de separação entre os dois caminhões é reduzida até o ponto em que o módulo de controle de distância é ativado e a velocidade do caminhão seguidor é reduzida a 15 m/s através da rampa $R - \dot{R}$ com a lei de controle (4.32).

Figura 22 – Resultado da simulação de aproximação com um sistema de controle do tipo ACC. O diagrama $R - \dot{R}$ é utilizado para fazer o chaveamento entre os controles de velocidade e distância.

Fonte: Autor

A mesma movimentação pode ser verificada no diagrama $R - \dot{R}$ ilustrado na Figura 23. A manobra se inicia com $R=60$ m e $\dot{R}=-8$ m/s. Enquanto o módulo de controle de velocidade

está ativo, o ponto de operação descreve uma trajetória vertical até cruzar a reta de chaveamento escolhida. Neste momento, a inclinação da reta T é calculada utilizando a Equação (4.31) e vale 4,375 s. A operação subsequente é conduzida pelo módulo de controle de distância até o ponto de operação convergir para $R=15$ m e $\dot{R}=0$.

Figura 23 – Trajetória do ponto de operação da manobra de aproximação no diagrama $R - \dot{R}$. O módulo de controle de velocidade atua durante a trajetória vertical até cruzar a reta de chaveamento. No restante da manobra, o módulo de controle de distância atua.

Fonte: Autor

4.3 MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Nesta tese, utiliza-se o modelo de consumo de caminhões equipados com motores diesel proposto por Wang e Rakha (2017) chamado Virginia Tech Comprehensive Power-based Fuel consumption Model (VT-CPFM). Este modelo é aplicado no problema de controle ótimo (Seção 4.6) e na avaliação de desempenho da estrutura de coordenação (Seção 7). O problema de otimização estática utiliza uma outra abordagem, detalhada na Seção 4.5, para contabilizar o consumo energético da movimentação.

A potência instantânea consumida pelo veículo é dada por

$$P(t) = T(t)v(t). \quad (4.33)$$

Com esta informação, a taxa de consumo de diesel é calculada como

$$F_C(t) = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 P(t) + \alpha_2 P(t)^2 & , \forall P(t) \geq 0 \\ \alpha_0 & , \forall P(t) < 0 \end{cases} \quad (4.34)$$

onde os coeficientes α_0 , α_1 e α_2 são identificados utilizando informações de testes experimentais realizados na Universidade da Califórnia. Para isto, os autores utilizaram o Laboratório Móvel de Pesquisa sobre Emissões (MERL, Mobile Emissions Research Laboratory) que pode ser visto na Figura 24. Este laboratório é montado num semirreboque e é capaz de medir o consumo de combustível e as emissões do veículo trator. O conjunto MERL e semirreboque possui massa de aproximadamente 20 t (WANG; RAKHA, 2017; BROWAND; MCARTHUR; RADOVICH, 2004).

Figura 24 – À esquerda, uma ilustração do MERL. À direita, o MERL sendo puxado pelo caminhão líder em um comboio.

Fonte: Browand, McArthur e Radovich (2004)

Os oito caminhões utilizados no estudo de Wang e Rakha (2017) estão listados na Tabela 4, onde as informações de potência, capacidade volumétrica e massa são apresentadas. As análises apresentadas nesta tese utilizam os dados desses veículos devido ao bom desempenho do modelo VT-CPFM ao estimar o consumo de combustível e emissões. Os valores dos coeficientes da Equação (4.34) foram ajustados para os oito caminhões e se encontram na Tabela 5.

Para ilustrar o desempenho do modelo, a curva de consumo obtida experimentalmente pelo caminhão 1 (Tabela 4) num trecho de rodovia em Coachella Valley na Califórnia e a respectiva curva de consumo estimada pelo modelo VT-CPFM podem ser vistas na Figura 25.

O desempenho do modelo em quantificar o consumo dos caminhões é indicado pelo coeficiente de determinação, quadrado do coeficiente de correlação, da regressão linear utilizando a nuvem de pontos num diagrama de dispersão envolvendo os dados experimentais e as esti-

Tabela 4 – Detalhes dos oito caminhões com dados disponíveis para os estudos desta tese.

#	Caminhão	Pot. [hp]	Cap. vol. [l]	Massa [kg]
1	Modelo: International/9800 SBA Ano: 1997 Motor: Cummings/M11-330	330	10,8	7.182
2	Modelo: Freightliner/D120 Ano: 1997 Motor: DDC/C-60	360	12,7	7.758
3	Modelo: Freightliner/D120 Ano: 1997 Motor: Cummins/N14	370	14,0	7.029
4	Modelo: Freightliner/C120 Ano: 1997 Motor: Cummins/N14	370	14,0	7.623
5	Modelo: Freightliner/C120 Ano: 1998 Motor: DDC/C-60	370	12,7	8.028
6	Modelo: Freightliner/FDL120 Ano: 1999 Motor: DDC/C-60	470	12,7	8.118
7	Modelo: Freightliner/FDL120 Ano: 1999 Motor: DDC/C-60	360	12,7	8.118
8	Modelo: Freightliner/FDL120 Ano: 2001 Motor: CAT/C-15	475	14,6	7.092

Fonte: Wang e Rakha (2017).

Figura 25 – Comparação da taxa de consumo obtida experimentalmente e a estimativa do modelo de consumo VT-CPFM para o caminhão 1 trafegando num trecho de rodovia em Coachella Valley na Califórnia.

Fonte: Wang e Rakha (2017).

Tabela 5 – Valores dos parâmetros do modelo de consumo VT-CPFM para motores diesel.

Caminhão ¹	α_0	α_1	α_2
1	1,56E-03	8,10E-05	1,00E-08
2	2,48E-03	7,14E-05	1,00E-08
3	2,26E-03	7,82E-05	1,00E-08
4	1,80E-03	7,96E-05	1,00E-08
5	2,02E-03	7,59E-05	1,00E-08
6	1,45E-03	8,48E-05	1,00E-08
7	1,31E-03	8,63E-05	1,00E-08
8	2,16E-03	7,98E-05	1,00E-08

Fonte: Rakha et al. (2001) e Wang e Rakha (2017).

¹ Ver referência na Tabela 4.

mativas do modelo. Por exemplo, o caminhão 1 (Tabela 4) possui coeficiente de determinação dado por $R^2 = 0,8$. Além disso, a inclinação da reta de regressão linear entre as estimativas do modelo e as medições experimentais é 0,87 indicando que o modelo subestima o consumo. O desempenho dos demais caminhões considerados pode ser verificado na Tabela 6.

Tabela 6 – Desempenho do modelo VT-CPFM em estimar corretamente as medições experimentais de consumo. R^2 é o coeficiente de determinação e C indica a inclinação da reta de regressão linear entre as estimativas do modelo e as medições experimentais.

Caminhão ¹	R^2	C (Inclinação)
1	0,80	0,87
2	0,81	0,76
3	0,83	0,81
4	0,86	0,88
5	0,64	0,69
6	0,77	0,86
7	0,81	0,78
8	0,84	0,84

Fonte: Rakha et al. (2001) e Wang e Rakha (2017).

¹ Ver referência na Tabela 4.

Além disso, uma análise do modelo em regime estacionário, velocidade constante, pode ser vista na Figura 26. É possível observar a característica côncava da curva de consumo para diferentes inclinações de pista. Conforme a inclinação aumenta, o consumo também aumenta para uma dada velocidade constante de tráfego.

Figura 26 – Consumo de combustível em função da velocidade de movimentação para diferentes inclinações de pista.

Fonte: Wang e Rakha (2017)

Para baixas velocidades e valores negativos de inclinação de pista, a potência calculada pela Equação (4.34) é negativa e a taxa de consumo, l/s, é constante, pois considera apenas o efeito da marcha lenta do motor. Neste caso, a modulação do pedal de freio é responsável por manter a velocidade constante até uma velocidade máxima na qual a componente longitudinal da força peso se iguala às forças resistivas. A partir deste ponto, o pedal de acelerador deve ser pressionado para que o veículo assuma uma velocidade superior, aumentando o consumo de combustível. Como pode ser visto na Figura 26, quanto maior a inclinação de descida, maior é a velocidade máxima alcançável sem a intervenção do pedal de aceleração. A descontinuidade nas curvas de -1% e -2% indica a velocidade a partir da qual o acionamento do pedal de aceleração passa a ser necessário para a manutenção da velocidade constante de tráfego.

Com base nos valores de R^2 e inclinação da reta de regressão linear das estimativas do modelo em relação aos dados experimentais, conclui-se que modelo VT-CPFM é o que melhor representa o consumo e emissões dos caminhões listados na Tabela 4 quando comparados aos modelos CMEM (AN et al., 1997) e MOVES (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2010). Portanto, o modelo de consumo de combustível utilizado nesta tese é dado pela Equação (4.34) com os parâmetros da Tabela 5.

4.4 COORDENAÇÃO NA MALHA RODOVIÁRIA

Nesta tese, uma abordagem alternativa ainda não explorada na literatura é apresentada e tem como base a coordenação de dois ou mais caminhões dispersos numa malha rodoviária. Na parte superior da Figura 27, é possível observar um cenário de coordenação hipotético com três caminhões, três origens (O), três destinos (D) e quatro interseções (I). Os caminhões 1 e 3 partem das origens O1 e O3, respectivamente, e seus caminhos convergem inicialmente para a interseção I1. O caminhão 2 parte da origem O2 pelo trecho que converge para a interseção I2. As interseções I2 e I3 delimitam o trecho comum do itinerário dos três caminhões considerados. A partir da interseção I3, o caminhão 3 segue para o destino D3. Mais adiante, na interseção I4, os caminhões 1 e 2 assumem caminhos distintos em direção aos destinos D1 e D2, respectivamente. Portanto, as interseções I3 e I4 são entendidas como as interseções de saída dos caminhões 3 e 1, respectivamente.

Figura 27 – Exemplo de três caminhões numa malha rodoviária e trecho unificado equivalente.

Fonte: Autor.

Apesar destas ramificações típicas de uma malha rodoviária, é possível interpretar o cenário de coordenação como um único trecho equivalente unificando as vias, porém respeitando a sequência dos caminhões e as respectivas distâncias em relação ao caminhão à frente. A parte inferior da Figura 27 ilustra esta representação. A equivalência de ambas as representações é garantida através de restrições que impõem os trechos em que a formação do comboio pode ser realizada. Por exemplo, no caso ilustrado, o problema de coordenação deve ser capaz de restringir a formação do comboio com os caminhões 1 e 3 após a interseção I1 e do comboio com os três caminhões apenas após a interseção I2. Raciocínio semelhante deve ser empregado

nas ramificações envolvendo os diferentes destinos. Caso um comboio de 3 caminhões tenha sido formado com sucesso entre as interseções I2 e I3, o caminhão 3 deve abandonar o grupo até a interseção I3 e os caminhões 1 e 2 conseguem se manter juntos até a interseção I4.

É possível observar que cenários mais complexos com diversos caminhões espalhados por todos os trechos e um maior número de ramificações da malha rodoviária ainda podem ser simplificados e representados por um único trecho equivalente com as restrições apropriadas. Logo, o restante desta tese trata predominantemente dos problemas de coordenação num único trecho de rodovia assumindo que eles podem representar, quando devidamente configurados, cenários complexos com diversas ramificações.

Na Figura 28, é possível observar o cenário de coordenação num dado trecho de rodovia. No primeiro instante, o caminhão 1 entra no trecho e fornece à central de processamento uma velocidade nominal, velocidade média que este veículo tem interesse em manter durante o percurso. Enquanto o caminhão 1 estiver sozinho no trecho, o controlador da dinâmica longitudinal procura manter a velocidade nominal. No instante seguinte, o caminhão 2 entra no trecho e fornece também a sua velocidade nominal. Durante o período de travessia, os caminhões transmitem os dados de GPS para a central através do sistema de comunicação V2I. Caso a coordenação seja feita sobre uma malha rodoviária, a interseção de saída de cada veículo deve ser também informada. Com base nessas informações, a central de processamento executa o algoritmo de coordenação. Caso a formação de comboio forneça uma economia de combustível, os respectivos perfis de velocidade são usados como referência dos controladores da dinâmica longitudinal e promovem a movimentação apropriada como ilustrado na Figura 28. Caso contrário, a velocidade nominal é mantida e o comboio não é formado.

Quando a formação de comboio é considerada, a movimentação completa é composta por três fases: aproximação, comboio e separação. Na primeira fase, os veículos alteraram a velocidade para que a distância de separação diminua até o início da fase de movimentação em comboio. A fase de separação é incluída na manobra para que as alterações de velocidade não gerem reflexos negativos no itinerário dos caminhões ao saírem do trecho.

Com as velocidades nominais de cada caminhão, a chamada trajetória nominal é calculada. Isto é, a trajetória que os caminhões teriam se nenhuma coordenação ocorresse e eles mantivessem a velocidade média de interesse durante todo o percurso. Se a formação de comboio for benéfica, os caminhões devem se aproximar, andar em formação e desmanchar o comboio. A trajetória resultante neste caso é chamada de trajetória coordenada. Ao sair do trecho de coordenação, a posição de cada caminhão deve coincidir com a nominal, ou seja, os caminhões

Figura 28 – Coordenação num trecho intermediário de rota. O caminhão 1 entra no trecho de coordenação e fornece as informações necessárias à central de processamento. Com a entrada do caminhão 2 no trecho, os veículos recebem os perfis ótimos de velocidade gerados pelo algoritmo de coordenação. A movimentação completa é composta por três fases: aproximação, comboio e separação.

Fonte: Autor.

dentro do trecho podem alterar a sua velocidade para formar comboios, porém eles devem sair do trecho no instante previsto pela trajetória nominal como se nenhuma alteração de velocidade tivesse ocorrido. Esta abordagem procura manter as alterações de velocidade dentro do trecho escolhido sem interferir nas restrições de horário de cada caminhão.

As curvas de posição em função do tempo são ilustradas na Figura 29 para dois caminhões. O caminhão 1 se refere ao veículo precedente e caminhão 2 se refere ao veículo subsequente. As linhas escuras indicam a trajetória coordenada e as linhas claras indicam a trajetória nominal. É possível observar que os caminhões estão inicialmente separados e cada um assume uma velocidade diferente da nominal para que a distância entre eles seja reduzida. Após a formação do comboio, os veículos procuram trafegar com a mesma velocidade fazendo a manutenção da pequena distância entre eles. Para que os dois caminhões cheguem ao fim do trecho de coordenação no mesmo instante em que chegariam através da trajetória nominal, as velocidades são novamente alteradas e o comboio é desmanchado.

Figura 29 – Curvas de posição em função do tempo de 2 caminhões num trecho intermediário de rota. As linhas escuras indicam a trajetória coordenada e as linhas claras indicam a trajetória nominal. A movimentação completa é composta por três fases: aproximação, comboio e separação.

Fonte: Autor

A coordenação em trechos intermediários de rota é atraente, pois permite que a estrutura de coordenação seja montada em locais onde as restrições de velocidade não sejam severas. Caso o trecho apresente baixos limites de velocidade, pavimento de baixa qualidade, bloqueios e congestionamentos frequentes, as restrições de velocidade podem tornar o efeito aerodinâmico menos relevante e, inclusive, impedir que os perfis de velocidade sejam realizados. Além disso, a central de processamento recebe de cada caminhão apenas as informações sobre a velocidade nominal, a posição instantânea e a interseção de saída. Portanto, o compartilhamento do itinerário não é realizado, pois ele não é necessário para a coordenação, atendendo aos requisitos de privacidade das transportadoras.

Toda vez que um caminhão entra no trecho de coordenação, o cenário é redefinido com base na velocidade nominal, na posição instantânea e na interseção de saída de cada caminhão. Estas informações são usadas na resolução do problema de coordenação que fornece os perfis ótimos de velocidade que minimizam o consumo de combustível levando em consideração a formação de comboios. Nesta tese, dois problemas são utilizados para obtenção dos perfis ótimos de velocidade, o problema de otimização estática e o problema de controle ótimo. Os perfis provenientes do primeiro são capazes de gerar manobras econômicas e podem ser usados como ponto de partida viável do problema de controle ótimo que é capaz de flexibilizar algumas

restrições originais do problema de otimização e gerar perfis de velocidade ainda mais econômicos. Os detalhes sobre a formulação dos problemas de otimização estática e controle ótimo podem ser encontrados nas Seções 4.5 e 4.6, respectivamente. Por fim, os perfis de velocidade são usados como sinal de referência do sistema de controle longitudinal ACC de cada caminhão visto na Seção 4.2.

4.5 PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO ESTÁTICA

O problema de otimização estática apresentado nesta seção é baseado no problema formulado por K. Y. Liang, J. Mårtensson e K. H. Johansson (2016). Os autores apresentaram uma formulação capaz de fornecer os perfis de velocidade de dois caminhões num cenário de coordenação envolvendo apenas as fases de aproximação e comboio. Nesta tese, a formulação de K. Y. Liang, J. Mårtensson e K. H. Johansson (2016) é estendida para que um número ilimitado de caminhões sejam considerados simultaneamente no problema de otimização estática. Além disso, a fase de separação é incluída no método para que a proposta de coordenação num trecho de rodovia seja atendida. A formulação simplificada considerando apenas dois caminhões pode ser encontrada em Mendes, Leonardi e Fleury (2019).

Na Figura 30, é possível observar uma ilustração da abordagem proposta para a coordenação de N caminhões em três fases: aproximação, comboio e separação. As linhas escuras representam a trajetória coordenada e as linhas claras representam a trajetória nominal. As trajetórias nominais são obtidas assumindo que os caminhões trafegam com velocidades nominais constantes $v_{n(1)}, v_{n(2)}, \dots, v_{n(N-1)}$ e $v_{n(N)}$. A distância inicial de separação dos caminhões é $d_{i(i|j)}$, onde os índices $i \in \mathbb{N}$ e $j \in \mathbb{N}$ indicam o par de caminhões ao qual a distância se refere. Na fase de aproximação, todos os caminhões devem alterar a sua velocidade para que eles formem o comboio no instante t_m e na posição d_m . Nesta fase, os caminhões trafegam com velocidade $v_{m(i)}$, onde o índice i indica o respectivo caminhão. Em qualquer cenário, $v_{m(i)} < v_{m(i+1)}$, onde $1 < i < N - 1$. A fase de movimentação em comboio ocorre ao longo da distância d_p e se encerra no instante t_s . Nesta fase, todos os caminhões andam com a mesma velocidade v_p mantendo a distância de separação desejada entre eles. Para que a trajetória coordenada de cada veículo coincida com a trajetória nominal ao sair do trecho, a fase de separação é executada do instante t_s ao t_f com os caminhões trafegando com velocidades $v_{s(i)}$. Apesar do algoritmo permitir a ultrapassagem dos caminhões, como será mostrado na Seção 5.1.2, a relação de velocidades dos caminhões 1 e 2 na fase de separação precisa ser respeitada, $v_{s(1)} > v_{s(2)}$. Durante a

separação, o veículo líder percorre uma distância d_s . A distância de separação final dos veículos é dada por $d_{f(i|j)}$.

Figura 30 – Curvas de posição e velocidade em função do tempo de N caminhões num trecho intermediário de rota. As linhas escuras indicam o caso coordenado e as linhas claras indicam o caso nominal. A movimentação completa é composta por três fases: aproximação, comboio e separação.

Fonte: Autor

O problema de otimização estática deve ter a seguinte estrutura geral

$$\begin{aligned}
& \min_{\text{Velocidades}} && \text{Custo aproximação} + \text{Custo comboio} + \text{Custo separação} \\
& \text{sujeito a} && \text{Distância mínima em comboio} \\
& && \text{Distância mínima de aproximação} \\
& && \text{Distância mínima de separação} \\
& && \text{Velocidades} \in [\text{Velocidade mínima}, \text{Velocidade máxima}],
\end{aligned}$$

onde as variáveis de decisão são as velocidades de cada caminhão durante as fases de aproximação, comboio e separação. A distância mínima em comboio impõe a permanência dos caminhões nesta formação e as distâncias mínimas de aproximação e separação garantem a coordenação adequada quando as ramificações da malha rodoviária estão presentes conforme discutido na Seção 4.4.

Para o desenvolvimento do problema de otimização estática, a dinâmica longitudinal de um único caminhão é dada pela equação diferencial (4.16) e o consumo de energia associado à movimentação é descrito pela equação

$$E = \int_{t_i}^{t_f} T v dt = \int_{s_i}^{s_f} T ds, \quad (4.35)$$

onde os limites de integração s_i e s_f indicam a posição inicial e final, respectivamente.

O objetivo desta otimização consiste na obtenção de perfis de velocidade que gerem manobras com menor custo energético quando comparadas ao caso nominal. Ou seja,

$$J_{coord} < J_{nom}, \quad (4.36)$$

onde J_{coord} é o custo energético total quando os veículos alteram a sua velocidade para formar um comboio e J_{nom} é o custo energético quando nenhuma coordenação ocorre e os caminhões percorrem o trecho com a velocidade nominal.

Para o problema de otimização, algumas simplificações são adotadas. Substituindo a Equação (4.16) em (4.35) e assumindo $\eta = 1$, tem-se

$$J = \int_{s_i}^{s_f} \left(\gamma m \ddot{s} + m g f + m g \sin \theta(s) + c \dot{s}^2 \right) ds. \quad (4.37)$$

Note que, neste caso, $\Phi(d) = 1$, pois trata-se do custo de movimentação de um único veículo.

Como é do interesse utilizar um modelo dinâmico e função custo que sejam simples e capazes de proporcionar orientações de movimentação adequadas, algumas manipulações são

realizadas para simplificar o modelo. A integral do termo da aceleração em (4.37) pode ser escrito como

$$\int_{s_i}^{s_f} \gamma m \ddot{s} ds = \int_{s_i}^{s_f} \gamma m \dot{v} ds = \int_{v_i}^{v_f} \gamma m v dv = \gamma m \frac{v_f^2 - v_i^2}{2}. \quad (4.38)$$

Na Equação (4.38), é possível observar que se a velocidade final v_f e a velocidade inicial v_i forem iguais, este termo se anula e a contribuição da aceleração pode ser omitida da Equação (4.37). Note que este é o caso quando consideramos as velocidades constantes em cada fase (Ver Figura 30). Portanto, a função custo passa a ser

$$J = \int_{s_i}^{s_f} (m g f + m g \sin \theta(s) + c \dot{s}^2) ds. \quad (4.39)$$

Além disso, de acordo com a Equação (4.39), as contribuições das forças peso e resistência ao rolamento nos casos coordenado e nominal são iguais para um dado percurso, pois uma é constante e a outra depende apenas da posição. Logo, na avaliação da Equação (4.36) utilizando a Equação (4.39), as contribuições das forças peso e resistência ao rolamento nos casos coordenado e nominal se cancelam. Portanto, é possível excluir ambas as contribuições da Equação (4.39), uma vez que o interesse consiste apenas em comparar os benefícios da redução de consumo entre os casos coordenado e nominal, e não em estimar precisamente o custo energético. Com isso, a função custo passa a ser

$$J = \int_{s_i}^{s_f} c \dot{s}^2 ds. \quad (4.40)$$

Repetindo o mesmo raciocínio da simplificação anterior, ao avaliar a Equação (4.36), a constante que multiplica o termo $\dot{s}^2$ pode ser desprezado. Com estas simplificações, o custo associado à movimentação de um único veículo pode ser escrito como

$$J = \int_{s_i}^{s_f} \dot{s}^2 ds. \quad (4.41)$$

Por fim, avaliando a integral com os limites de integração no tempo, tem-se a função custo dada por

$$J = \int_{t_i}^{t_f} v^3 dt. \quad (4.42)$$

Com base na Equação (4.42), o custo associado à coordenação de N caminhões, conforme a Figura 30, pode ser escrito como

$$J = \underbrace{\int_{t_i}^{t_m} (v_{m(1)}^3 + \dots + v_{m(N)}^3) dt}_{\text{Aproximação}} + \underbrace{\int_{t_m}^{t_s} \Phi_{(1|N)} v_p^3 dt}_{\text{Comboio}} + \underbrace{\int_{t_s}^{t_f} (v_{s(1)}^3 + \dots + v_{s(N)}^3) dt}_{\text{Separação}}, \quad (4.43)$$

onde $t_m, t_s \in [t_i, t_f]$. A constante $\Phi_{(1|N)} = \sum_{k=1}^N \Phi_k$ é o fator de redução do arrasto aerodinâmico combinado para os N caminhões conforme Equação (4.11). Os subscritos numéricos indicam a sequência dos caminhões no trecho. As fases de aproximação, comboio e separação são indicadas pelos subscritos m, p e s , respectivamente.

Assumindo uma movimentação com velocidade constante durante cada fase, o custo energético total definido na Equação (4.43) pode ser escrito como

$$J = \underbrace{\sum_{k=1}^N v_{m(k)}^3 \Delta t_m}_{\text{Aproximação}} + \underbrace{\Phi_{(1|N)} v_p^3 \Delta t_p}_{\text{Comboio}} + \underbrace{\sum_{k=1}^N v_{s(k)}^3 \Delta t_s}_{\text{Separação}}. \quad (4.44)$$

Todos os caminhões se encontram no instante t_m e se separam no instante t_s . Com será mostrado adiante, as restrições impostas à coordenação permitem a formulação de um problema de otimização estática com apenas quatro variáveis de decisão independentemente do número de caminhões envolvidos.

4.5.1 Fase de aproximação

Como o encontro de todos os caminhões ocorre no mesmo instante t_m , a velocidade de cada caminhão durante a fase de aproximação é dada por

$$v_{m(1)} = \frac{d_m - d_{i(1|N)}}{\Delta t_m} \quad (4.45)$$

$$v_{m(2)} = \frac{d_m - d_{i(2|N)}}{\Delta t_m} \quad (4.46)$$

$$v_{m(3)} = \frac{d_m - d_{i(3|N)}}{\Delta t_m} \quad (4.47)$$

$\vdots$

$$v_{m(N-1)} = \frac{d_m - d_{i(N-1|N)}}{\Delta t_m} \quad (4.48)$$

$$v_{m(N)} = \frac{d_m}{\Delta t_m}. \quad (4.49)$$

Combinando as equações acima aos pares através de d_m , a duração da fase de aproximação é

$$\Delta t_m = \frac{d_{i(1|2)}}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} = \frac{d_{i(1|3)}}{v_{m(3)} - v_{m(1)}} = \dots = \frac{d_{i(1|N)}}{v_{m(N)} - v_{m(1)}}. \quad (4.50)$$

Logo, a distância d_m pode ser escrita na forma

$$d_m = \frac{d_{i(1|2)}v_{m(1)}}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} + d_{i(1|N)} = \frac{d_{i(1|3)}v_{m(1)}}{v_{m(3)} - v_{m(1)}} + d_{i(1|N)} = \dots = \frac{d_{i(1|N)}v_{m(1)}}{v_{m(N)} - v_{m(1)}} + d_{i(1|N)}. \quad (4.51)$$

A normalização do problema é feita através da divisão dos principais parâmetros pelo comprimento total do trecho considerado ℓ .

Dividindo as Equações (4.50) e (4.51) por ℓ , tem-se

$$\Delta \hat{t}_m = \frac{\Delta t_m}{\ell} = r_{d(1|2)} \frac{1}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} \quad (4.52)$$

$$\hat{d}_m = \frac{d_m}{\ell} = r_{d(1|2)} \frac{v_{m(1)}}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} + r_{d(1|N)}. \quad (4.53)$$

onde $r_{d(1|2)}$ é a distância inicial de separação normalizada entre os caminhões 1 e 2. De forma genérica, tem-se

$$r_{d(i|j)} = \frac{d_{i(i|j)}}{\ell}, \quad \text{onde } i, j \in \mathbb{N} \quad (4.54)$$

Para que a velocidade de um dado caminhão seja escrita em função das velocidades dos caminhões 1 e 2, utiliza-se novamente as informações da Equação (4.50), por exemplo, considerando os caminhões 1, 2 e 3, tem-se

$$\frac{d_{i(1|2)}}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} = \frac{d_{i(1|3)}}{v_{m(3)} - v_{m(1)}}. \quad (4.55)$$

Logo, a velocidade do terceiro caminhão é dada por

$$v_{m(3)} = v_{m(1)} + d_{i(1|3)} \frac{v_{m(2)} - v_{m(1)}}{d_{i(1|2)}}. \quad (4.56)$$

Analogamente, para o caminhão 4, tem-se

$$v_{m(4)} = v_{m(1)} + d_{i(1|4)} \frac{v_{m(2)} - v_{m(1)}}{d_{i(1|2)}} \quad (4.57)$$

e assim sucessivamente. Genericamente, tem-se

$$v_{m(k)} = v_{m(1)} + d_{i(1|k)} \frac{v_{m(2)} - v_{m(1)}}{d_{i(1|2)}}. \quad (4.58)$$

Utilizando a notação com as distâncias iniciais de separação normalizadas, tem-se

$$v_{m(k)} = v_{m(1)} + r_{d(1|k)} \frac{v_{m(2)} - v_{m(1)}}{r_{d(1|2)}} \quad (4.59)$$

4.5.2 Fase de separação

A velocidade de cada caminhão na fase de separação é dada por

$$v_{s(1)} = \frac{d_s}{\Delta t_s} \quad (4.60)$$

$$v_{s(2)} = \frac{d_s - d_{f(1|2)}}{\Delta t_s} \quad (4.61)$$

$$v_{s(3)} = \frac{d_s - d_{f(1|3)}}{\Delta t_s} \quad (4.62)$$

$$\vdots$$

$$v_{s(N-1)} = \frac{d_s - d_{f(1|N-1)}}{\Delta t_s}. \quad (4.63)$$

$$v_{s(N)} = \frac{d_s - d_{f(1|N)}}{\Delta t_s}. \quad (4.64)$$

Combinando as equações acima aos pares através de d_s , tem-se

$$\Delta t_s = \frac{d_{f(1|2)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}} = \frac{d_{f(1|3)}}{v_{s(1)} - v_{s(3)}} = \dots = \frac{d_{f(1|N)}}{v_{s(1)} - v_{s(N)}}. \quad (4.65)$$

Logo, a distância d_s pode ser escrita na forma

$$d_s = \frac{d_{f(1|2)} v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}} = \frac{d_{f(1|3)} v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(3)}} = \dots = \frac{d_{f(1|N)} v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(N)}}. \quad (4.66)$$

A distância final de separação deve ser escrita em função das velocidades nominais e das distâncias iniciais de separação. Para isto, utiliza-se o tempo total de coordenação Δt_T escrito em função das velocidades nominais dos caminhões 1 e 2,

$$\Delta t_T = \frac{\ell - d_{i(1|N)}}{v_{n(1)}} \quad (4.67)$$

e

$$\Delta t_T = \frac{\ell - d_{i(2|N)} - d_{f(1|2)}}{v_{n(2)}}. \quad (4.68)$$

Como

$$d_{i(1|N)} = d_{i(1|2)} + d_{i(2|N)}, \quad (4.69)$$

tem-se

$$d_{i(2|N)} = d_{i(1|N)} - d_{i(1|2)}. \quad (4.70)$$

Substituindo a Equação (4.70) em (4.68), tem-se

$$\Delta t_T = \frac{\ell - (d_{i(1|N)} - d_{i(1|2)}) - d_{f(1|2)}}{v_{n(2)}}. \quad (4.71)$$

Igualando as Equações (4.67) e (4.71), tem-se

$$\frac{\ell - d_{i(1|N)}}{v_{n(1)}} = \frac{\ell - d_{i(1|N)} + d_{i(1|2)} - d_{f(1|2)}}{v_{n(2)}} \quad (4.72)$$

ou

$$(\ell - d_{i(1|N)}) \frac{v_{n(2)}}{v_{n(1)}} = \ell - d_{i(1|N)} + d_{i(1|2)} - d_{f(1|2)}. \quad (4.73)$$

Reescrevendo, a distância final de separação entre os dois primeiros caminhões é

$$d_{f(1|2)} = (\ell - d_{i(1|N)}) \left(1 - \frac{v_{n(2)}}{v_{n(1)}}\right) + d_{i(1|2)}. \quad (4.74)$$

Note que, se as velocidades nominais são iguais, $d_{f(1|2)} = d_{i(1|2)}$, ou seja, a distância inicial de separação é igual a distância final de separação. A formulação genérica da distância final de separação é dada por

$$d_{f(1|k)} = (\ell - d_{i(1|N)}) \left(1 - \frac{v_{n(k)}}{v_{n(1)}}\right) + d_{i(1|k)} \quad \text{para } k=2, 3, \dots, N. \quad (4.75)$$

Substituindo a Equação (4.74) nas Equações (4.65) e (4.66) para os caminhões 1 e 2, tem-se

$$\Delta t_s = \left((\ell - d_{i(1|N)}) \left(1 - \frac{v_{n(2)}}{v_{n(1)}}\right) + d_{i(1|2)} \right) \frac{1}{v_{s(1)} - v_{s(2)}} \quad (4.76)$$

e

$$d_s = \left((\ell - d_{i(1|N)}) \left(1 - \frac{v_{n(2)}}{v_{n(1)}}\right) + d_{i(1|2)} \right) \frac{v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}}. \quad (4.77)$$

Dividindo as Equações (4.76) e (4.77) pela distância total do trecho de coordenação ℓ , tem-se

$$\Delta \hat{t}_s = \frac{\Delta t_s}{\ell} = \left(r_{v(1|2)} - r_{v(1|2)} r_{d(1|N)} + r_{d(1|2)} \right) \frac{1}{v_{s(1)} - v_{s(2)}} \quad (4.78)$$

e

$$\hat{d}_s = \frac{d_s}{\ell} = \left(r_{v(1|2)} - r_{v(1|2)} r_{d(1|N)} + r_{d(1|2)} \right) \frac{v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}} \quad (4.79)$$

onde $r_{v(1|2)}$ é a relação de velocidades nominais dos caminhões 1 e 2. Genericamente, a relação de velocidades nominais é dada por

$$r_{v(1|k)} = \left(1 - \frac{v_{n(k)}}{v_{n(1)}} \right) \quad \text{para } k=2, 3, \dots, N. \quad (4.80)$$

Como todos os caminhões se separam no mesmo instante, é possível utilizar novamente as informações da Equação (4.65). Por exemplo, considerando os caminhões 1, 2 e 3, tem-se

$$\frac{d_{f(1|2)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}} = \frac{d_{f(1|3)}}{v_{s(1)} - v_{s(3)}}. \quad (4.81)$$

Logo, a velocidade do terceiro caminhão é

$$v_{s(3)} = v_{s(1)} - d_{f(1|3)} \frac{v_{s(1)} - v_{s(2)}}{d_{f(1|2)}}. \quad (4.82)$$

Analogamente, a velocidade de separação do quarto caminhão é

$$v_{s(4)} = v_{s(1)} - d_{f(1|4)} \frac{v_{s(1)} - v_{s(2)}}{d_{f(1|2)}}. \quad (4.83)$$

Genericamente,

$$v_{s(k)} = v_{s(1)} - d_{f(1|k)} \frac{v_{s(1)} - v_{s(2)}}{d_{f(1|2)}}. \quad (4.84)$$

Substituindo a Equação (4.75) em (4.84), tem-se

$$v_{s(k)} = v_{s(1)} - \left(\left(\ell - d_{i(1|N)} \right) \left(1 - \frac{v_{n(k)}}{v_{n(1)}} \right) + d_{i(1|k)} \right) \frac{v_{s(1)} - v_{s(2)}}{\left(\ell - d_{i(1|N)} \right) \left(1 - \frac{v_{n(2)}}{v_{n(1)}} \right) + d_{i(1|2)}}. \quad (4.85)$$

Utilizando as distâncias iniciais de separação normalizadas e as relações de velocidades nominais, tem-se

$$v_{s(k)} = v_{s(1)} - \left(r_{v(1|k)} - r_{v(1|k)} r_{d(1|N)} + r_{d(1|k)} \right) \frac{v_{s(1)} - v_{s(2)}}{\left(r_{v(1|2)} - r_{v(1|2)} r_{d(1|N)} + r_{d(1|2)} \right)}. \quad (4.86)$$

4.5.3 Fase em comboio

Assumindo $t_i = 0$, o tempo final é dado por

$$t_f = \Delta t_m + \Delta t_p + \Delta t_s \quad (4.87)$$

ou, em função das velocidades do caminhão 1, tem-se

$$\frac{\ell - d_{i(1|N)}}{v_{n(1)}} = \frac{d_m - d_{i(1|N)}}{v_{m(1)}} + \Delta t_p + \frac{d_s}{v_{s(1)}}. \quad (4.88)$$

Portanto, a duração da fase em comboio é dada por

$$\Delta t_p = \frac{\ell - d_{i(1|N)}}{v_{n(1)}} - \frac{d_m - d_{i(1|N)}}{v_{m(1)}} - \frac{d_s}{v_{s(1)}} \quad (4.89)$$

e distância percorrida durante a fase de comboio é dada por

$$d_p = \ell - d_m - d_s. \quad (4.90)$$

Dividindo as Equações (4.89) e (4.90) por ℓ , o tempo e a distância percorrida em comboio normalizados são dados por

$$\Delta \hat{t}_p = \frac{\Delta t_p}{\ell} = \frac{1 - r_{d(1|N)}}{v_{n(1)}} - \frac{\hat{d}_m - r_{d(1|N)}}{v_{m(1)}} - \frac{\hat{d}_s}{v_{s(1)}}. \quad (4.91)$$

$$\hat{d}_p = \frac{d_p}{\ell} = 1 - \hat{d}_m - \hat{d}_s. \quad (4.92)$$

Substituindo as Equações (4.53) e (4.79) em (4.91) e em (4.92), tem-se

$$\Delta \hat{t}_p = \frac{1 - r_{d(1|N)}}{v_{n(1)}} - r_{d(1|2)} \frac{1}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} - \left(r_{v(1|2)} - r_{v(1|2)} r_{d(1|N)} + r_{d(1|2)} \right) \frac{1}{v_{s(1)} - v_{s(2)}}. \quad (4.93)$$

$$\hat{d}_p = 1 - \left(r_{d(1|2)} \frac{v_{m(1)}}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} + r_{d(1|N)} \right) - \left(r_{v(1|2)} - r_{v(1|2)} r_{d(1|N)} + r_{d(1|2)} \right) \frac{v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}}. \quad (4.94)$$

Utilizando as Equações (4.93) e (4.94), a velocidade em comboio é dada por

$$v_p = \frac{\hat{d}_p}{\Delta \hat{t}_p} = \frac{1 - \left(r_{d(1|2)} \frac{v_{m(1)}}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} + r_{d(1|N)} \right) - \left(r_{v(1|2)} - r_{v(1|2)} r_{d(1|N)} + r_{d(1|2)} \right) \frac{v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}}}{\frac{1 - r_{d(1|N)}}{v_{n(1)}} - r_{d(1|2)} \frac{1}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} - \left(r_{v(1|2)} - r_{v(1|2)} r_{d(1|N)} + r_{d(1|2)} \right) \frac{1}{v_{s(1)} - v_{s(2)}}} \quad (4.95)$$

4.5.4 Restrições

Com o intuito de aumentar a densidade de tráfego, é possível impor uma distância mínima de movimentação em comboio estendendo o tempo de viagem com os veículos numa formação mais compacta. A fase de comboio deve existir e a permanência nesta formação deve ser forçada conforme demanda. Para isto, a restrição

$$d_p > d_{p,min} \quad (4.96)$$

deve ser satisfeita, onde $d_{p,min}$ é a distância mínima imposta para movimentação em comboio. Dividindo a inequação por ℓ , tem-se

$$\hat{d}_p > r_p, \quad (4.97)$$

onde

$$r_p = \frac{d_{p,min}}{\ell} \quad (4.98)$$

indica a distância mínima em comboio normalizada, ou seja, a fração entre a distância mínima a ser percorrida na formação de comboio e o comprimento total do trecho de coordenação.

Para que as fases de aproximação e separação existam e as respectivas distâncias atendam aos requisitos impostos pelas ramificações da malha rodoviária ilustrada na Figura 27, as restrições

$$d_m > d_{m,min} \quad (4.99)$$

e

$$d_s > d_{s,min} \quad (4.100)$$

devem ser satisfeitas.

Dividindo estas desigualdades por ℓ , tem-se

$$\hat{d}_m > r_m \quad (4.101)$$

e

$$\hat{d}_s > r_s, \quad (4.102)$$

onde

$$r_m = \frac{d_{m,min}}{\ell} \quad (4.103)$$

e

$$r_s = \frac{d_{s,min}}{\ell} \quad (4.104)$$

indicam a distância mínima de aproximação normalizada e a distância mínima de separação normalizada, respectivamente.

Por fim, todas as velocidades de coordenação devem estar contidas entre os limites de velocidade mínima v_{min} e velocidade máxima v_{max} .

4.5.5 Formulação do problema de otimização estática

O problema de otimização estática para N caminhões é dado por

$$\begin{aligned}
\min_{v_{m(1)}, v_{m(2)}, v_{s(1)}, v_{s(2)}} & \underbrace{\sum_{k=1}^N \frac{r_{d(1|2)} \left(v_{m(1)} + \frac{r_{d(1|k)}(v_{m(2)} - v_{m(1)})}{r_{d(1|2)}} \right)^3}{(v_{m(2)} - v_{m(1)})}}_{\text{Aproximação}} + \\
& + \underbrace{\Phi_{(1|N)} v_p^2 \left(1 - r_{d(1|2)} \frac{v_{m(1)}}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} - r_{d(1|N)} - r_{dv(1|2)} \frac{v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}} \right)}_{\text{Comboio}} + \\
& + \underbrace{\sum_{k=1}^N \frac{r_{dv(1|2)} \left(v_{s(1)} - \frac{r_{dv(1|k)}(v_{s(1)} - v_{s(2)})}{r_{dv(1|2)}} \right)^3}{(v_{s(1)} - v_{s(2)})}}_{\text{Separação}} \quad (4.105)
\end{aligned}$$

sujeito a

$$0 \geq r_p - \left(1 - r_{d(1|2)} \frac{v_{m(1)}}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} - r_{d(1|N)} - r_{dv(1|2)} \frac{v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}} \right) \quad (4.106)$$

$$0 \geq r_m - r_{d(1|2)} \frac{v_{m(1)}}{v_{m(2)} - v_{m(1)}} \quad (4.107)$$

$$0 \geq r_s - r_{dv(1|2)} \frac{v_{s(1)}}{v_{s(1)} - v_{s(2)}} \quad (4.108)$$

$$v_{m(1)}, \dots, v_{m(N)}, v_p, v_{s(1)}, \dots, v_{s(N)} \in [v_{min}, v_{max}] \quad (4.109)$$

onde

$$r_{dv(1|k)} = r_{v(1|k)} - r_{v(1|k)} r_{d(1|N)} + r_{d(1|k)}. \quad (4.110)$$

A função custo (4.105) é obtida utilizando as Equações (4.59), (4.52), (4.95), (4.93), (4.86) e (4.78) em (4.44). Utilizando as Equações (4.53), (4.79) e (4.94), as restrições (4.106), (4.107) e (4.108) garantem a existência e a distância mínima percorrida nas fases de aproximação, comboio e separação conforme definição nas desigualdades (4.97), (4.101) e (4.102). Por fim, a restrição (4.109) impõe os limites máximos e mínimos a todas as velocidades de coordenação. As velocidades $v_{m(1)}$, $v_{m(2)}$, $v_{s(1)}$ e $v_{s(2)}$ que satisfazem o problema são obtidas e as demais velocidades de coordenação são calculadas a posteriori utilizando as Equações (4.59), (4.86) e (4.95). Os detalhes da implementação computacional do problema de otimização estática estão descritos na Seção 4.7.

É possível demonstrar que, considerando apenas dois caminhões, o problema de otimização em (4.105)-(4.110) se torna equivalente ao problema apresentado por Mendes, Leonardi e Fleury (2019). Além disso, considerando velocidades nominais iguais e desprezando a fase de separação, o problema de otimização proposto se torna equivalente ao problema apresentado por K. Y. Liang, J. Mårtensson e K. H. Johansson (2016). Isto é, as formulações apresentadas

anteriormente na literatura são casos particulares da abordagem mais abrangente proposta nesta tese.

O problema de otimização com N caminhões impõe que todos os caminhões se encontrem no mesmo instante após a fase de aproximação e iniciem a manobra de separação ao mesmo tempo. Esta restrição é intrínseca à formulação utilizada e representa uma limitação significativa do método. Por exemplo, espera-se que o algoritmo de coordenação seja capaz de coordenar diversos caminhões formando, quando for conveniente, comboios parciais enquanto os demais veículos se aproximam. Além disso, na fase de separação, um caminhão pode se desvincular do comboio enquanto os remanescentes seguem juntos pela rodovia. Esta flexibilização é alcançada através da resolução do problema de controle ótimo abordado na Seção 4.6 desta tese. Além disso, o problema de controle ótimo é conveniente, inclusive para o caso de dois caminhões, pois os perfis de velocidade são suavizados evitando altas demandas de torque do motor. Entretanto, mesmo com estas restrições presentes, o problema de otimização estática é capaz de gerar sugestões econômicas de velocidade como pode ser verificado na Seção 7.

Neste momento, é importante enfatizar que o problema de otimização estática desenvolvido até aqui não garante uma movimentação coordenada mais econômica do que a movimentação nominal, uma vez que a imposição da formação de comboio pode gerar uma manobra com maior custo energético. Portanto, o custo energético da movimentação nominal precisa ser calculado separadamente e comparado ao custo obtido através do problema de otimização estática. Caso a solução ótima indique uma movimentação coordenada mais econômica do que o caso nominal, o perfil ótimo de velocidade deve ser usado como referência dos controladores longitudinais.

4.5.6 Ajuste do perfil de velocidade

Como visto na Figura 30, o perfil ótimo de velocidade gerado pelo problema de otimização estática apresenta sucessivas variações de velocidade do tipo degrau. Caso este perfil de velocidade seja usado como referência pelos controladores da dinâmica longitudinal, a demanda energética se eleva comprometendo os benefícios esperados através da coordenação. Portanto, os perfis de velocidade provenientes do problema de otimização estática devem ser suavizados com a introdução de rampas de aceleração e desaceleração a cada variação de velocidade. A Figura 31 ilustra o ajuste realizado num cenário com dois caminhões.

Figura 31 – Ajuste do perfil de velocidade proveniente do problema de otimização estática para dois caminhões.

Fonte: Autor

Para que este procedimento não altere os principais aspectos da coordenação, os instantes e as posições de encontro e separação dos caminhões são os mesmos, ou seja, o comboio continua sendo formado no instante t_m e na posição d_m enquanto a separação se mantém no instante t_s e na posição $d_m + d_p$. Além disso, a velocidade em comboio é preservada e as velocidades dos caminhões no início e no fim da coordenação são iguais às respectivas velocidades nominais. Para que estas restrições sejam atendidas, as velocidades de coordenação nas fases de aproximação e separação devem ser atualizadas. Escolhendo a aceleração a_u e a desaceleração a_d , em módulo, as velocidades ajustadas dos caminhões 1 e 2 durante a fase de aproximação são

$$v'_{m(1)} = \frac{a_d v_p + a_u v_{n(1)} + a_d a_u C_1 - a_d a_u t_m}{a_d + a_u} \quad (4.111)$$

$$v'_{m(2)} = \frac{a_d v_{n(2)} + a_u v_p - a_d a_u C_2 + a_d a_u t_m}{a_d + a_u} \quad (4.112)$$

e, durante a fase de separação, as velocidades são

$$v'_{s(1)} = \frac{a_d v_p + a_u v_{n(1)} - a_d a_u C_3 + a_d a_u t_s}{a_d + a_u} \quad (4.113)$$

$$v'_{s(2)} = \frac{a_d v_{n(2)} + a_u v_p + a_d a_u C_4 - a_d a_u t_s}{a_d + a_u}, \quad (4.114)$$

onde

$$\begin{aligned} C_1 &= \sqrt{\frac{a_d a_u t_m^2 - 2(a_u v_{n(1)} + a_d v_p)t_m - v_{n(1)}^2 + 2 v_{n(1)} v_p - v_p^2 + 2(a_d + a_u)d_{m(1)}}{a_d a_u}} \\ C_2 &= \sqrt{\frac{a_d a_u t_m^2 + 2(a_d v_{n(2)} + a_u v_p)t_m - v_{n(2)}^2 + 2 v_{n(2)} v_p - v_p^2 - 2(a_d + a_u)d_{m(2)}}{a_d a_u}} \\ C_3 &= \sqrt{\frac{a_d a_u t_s^2 + 2(a_u v_{n(1)} + a_d v_p)t_s - v_{n(1)}^2 + 2 v_{n(1)} v_p - v_p^2 - 2(a_d + a_u)d_{s(1)}}{a_d a_u}} \\ C_4 &= \sqrt{\frac{a_d a_u t_s^2 - 2(a_d v_{n(2)} + a_u v_p)t_s - v_{n(2)}^2 + 2 v_{n(2)} v_p - v_p^2 + 2(a_d + a_u)d_{s(2)}}{a_d a_u}}. \end{aligned}$$

Os valores de $d_{m(1)}$ e $d_{m(2)}$ indicam as distâncias percorridas pelos caminhões 1 e 2 do início da coordenação à formação do comboio. Analogamente, os valores de $d_{s(1)}$ e $d_{s(2)}$ indicam as distâncias percorridas pelos caminhões 1 e 2 do início da separação ao fim da coordenação, respectivamente.

Para complementar o ajuste do perfil de velocidade, os tempos $\Delta t_{1(1)}$ a $\Delta t_{7(1)}$ do caminhão 1 e os tempos $\Delta t_{1(2)}$ a $\Delta t_{7(2)}$ do caminhão 2 precisam ser devidamente ajustados. Conforme os dois gráficos inferiores da Figura 31, tem-se

$$\Delta t_{4(1)} = \Delta t_{4(2)} = \Delta t_p. \quad (4.115)$$

As durações das rampas de aceleração e desaceleração para o caminhão 1 são dadas por

$$\begin{aligned} \Delta t_{1(1)} &= (v_{n(1)} - v'_{m(1)})/a_d \\ \Delta t_{3(1)} &= (v_p - v'_{m(1)})/a_u \\ \Delta t_{5(1)} &= (v'_{s(1)} - v_p)/a_u \\ \Delta t_{7(1)} &= (v'_{s(1)} - v_{n(1)})/a_d \end{aligned} \quad (4.116)$$

e as durações das rampas de aceleração e desaceleração para o caminhão 2 são dadas por

$$\begin{aligned} \Delta t_{1(2)} &= (v'_{m(2)} - v_{n(2)})/a_u \\ \Delta t_{3(2)} &= (v'_{m(2)} - v_p)/a_d \\ \Delta t_{5(2)} &= (v_p - v'_{s(2)})/a_d \\ \Delta t_{7(2)} &= (v_{n(2)} - v'_{s(2)})/a_u \end{aligned} \quad (4.117)$$

As velocidades definidas nas Equações (4.111)-(4.114) são mantidas durante

$$\begin{aligned} \Delta t_{2(1)} &= t_m - \Delta t_{1(1)} - \Delta t_{3(1)} \\ \Delta t_{6(1)} &= t_s - \Delta t_{5(1)} - \Delta t_{7(1)} \\ \Delta t_{2(2)} &= t - m - \Delta t_{1(2)} - \Delta t_{3(2)} \\ \Delta t_{6(2)} &= t_s - \Delta t_{5(2)} - \Delta t_{7(2)}, \end{aligned} \quad (4.118)$$

respectivamente.

Os perfis de velocidade ajustados descritos nesta seção podem desempenhar duas finalidades. A primeira delas consiste em servir de sinal de referência para os controladores da dinâmica longitudinal dos veículos envolvidos na coordenação. Na Seção 7.1, a capacidade destes perfis em gerar manobras econômicas é avaliada. Alternativamente, como segunda finalidade, estes perfis podem ser usados como ponto de partida viável do problema de controle

ótimo descrito na Seção 4.6, aumentando a probabilidade de convergência e diminuindo o número de iterações do algoritmo.

4.6 PROBLEMA DE CONTROLE ÓTIMO

Esta seção apresenta o problema de controle ótimo utilizado na obtenção dos perfis de velocidade que os caminhões devem seguir para que o consumo de combustível total da manobra seja minimizado. Para isto, a coordenação é formulada como um problema de colocação direta. Neste caso, as curvas das variáveis de estado e de controle são discretizadas ao longo do período de análise. Em cada ponto de discretização, também chamado de nó, o algoritmo procura o esforço de controle que altera as variáveis de estado de maneira a minimizar uma função objetivo sem violar nenhuma restrição imposta ao problema. Assim como no problema de otimização estática, restrições não lineares de igualdade e desigualdade são consideradas. Entretanto, as equações diferenciais que descrevem a dinâmica do sistema são usadas como restrições adicionais do problema para promover a interpolação adequada das variáveis de estado entre os nós considerados.

No problema de otimização estática visto na Seção 4.5, a movimentação dos caminhões é dividida nas fases de aproximação, comboio e separação. Desta forma, o encontro de todos os caminhões ocorre simultaneamente ao final da fase de aproximação e o comboio é inteiramente desmanchado no início da fase de separação. Para superar esta limitação, as três fases não são explicitamente impostas na formulação do problema de controle ótimo tornando possível a formação de comboios parciais e a saída antecipada de caminhões de um dado comboio.

A dinâmica acoplada de caminhões idênticos é baseada na Equação (4.16) e descrita pelo sistema de equações diferenciais

$$\begin{aligned}
 m\dot{v}_1(t) &= T_1(t) - \frac{1}{2}C_d\rho A v_1^2(t) \\
 m\dot{v}_2(t) &= T_2(t) - \frac{1}{2}C_d\rho A v_2^2(t)\Phi(d_{(1|2)}) \\
 &\vdots \\
 m\dot{v}_N(t) &= T_N(t) - \frac{1}{2}C_d\rho A v_N^2(t)\Phi(d_{(N-1|N)}),
 \end{aligned} \tag{4.119}$$

onde Φ é dado pela Equação (4.11) e $d_{(i-1|i)} = s_{i-1} - s_i$ indica a distância do veículo i ao veículo precedente. Note que os termos associados à força de resistência ao rolamento e à

componente da força gravitacional foram desprezados, pois, assim como discutido na Seção 4.5, estes termos não contribuem significativamente para quantificar os benefícios da movimentação coordenada em relação à nominal. O modelo de consumo de combustível VT-CPFM (Equação (4.34)) é utilizado no problema de controle ótimo. Portanto, o consumo total de combustível considerando a contribuição de cada caminhão é calculado como

$$J = \int_{t_i}^{t_f} (F_{C(1)}(t) + F_{C(2)}(t) + \cdots + F_{C(N)}(t)) dt, \quad (4.120)$$

onde t_i e t_f são os instantes inicial e final, respectivamente.

Assim como no problema de otimização estática, as posições iniciais dos caminhões 1 a N são

$$\begin{aligned} s_1(t_i) &= d_{i(1|N)} \\ s_2(t_i) &= d_{i(2|N)} \\ &\vdots \\ s_N(t_i) &= 0 \end{aligned} \quad (4.121)$$

e as posições finais de cada caminhão são

$$\begin{aligned} s_1(t_f) &= s_{total} \\ s_2(t_f) &= s_{total} - d_{f(1|2)} \\ &\vdots \\ s_N(t_f) &= s_{total} - d_{f(1|N)}, \end{aligned} \quad (4.122)$$

onde s_{total} é o comprimento do trecho de coordenação.

As velocidades iniciais e finais são iguais às respectivas velocidades nominais, ou seja,

$$\begin{aligned} v_1(t_i) = v_1(t_f) &= v_{n(1)} \\ v_2(t_i) = v_2(t_f) &= v_{n(2)} \\ &\vdots \\ v_N(t_i) = v_N(t_f) &= v_{n(N)}. \end{aligned} \quad (4.123)$$

Esta hipótese está de acordo com o ajuste dos perfis de velocidade descrito na Seção 4.5.6. Novamente, o tempo de análise t_f é dado pelo tempo que o caminhão líder requer para chegar ao fim do trecho de coordenação trafegando com a sua velocidade nominal $v_{n(1)}$, ou seja,

$$t_f = \frac{(s_{total} - s_1(t_i))}{v_{n(1)}}. \quad (4.124)$$

Os limites inferior e superior da posição de cada caminhão são impostos de acordo com o comprimento do trecho de rodovia considerado, isto é,

$$\begin{aligned} 0 &\leq s_1(t) \leq s_{total} \\ 0 &\leq s_2(t) \leq s_{total} \\ &\vdots \\ 0 &\leq s_N(t) \leq s_{total}. \end{aligned} \quad (4.125)$$

Esta restrição procura apenas auxiliar o algoritmo na busca por uma solução ótima. A velocidade de cada caminhão deve respeitar os limites de velocidade mínima e máxima como

$$\begin{aligned} v_{min} &\leq v_1(t) \leq v_{max} \\ v_{min} &\leq v_2(t) \leq v_{max} \\ &\vdots \\ v_{min} &\leq v_N(t) \leq v_{max}. \end{aligned} \quad (4.126)$$

e as forças de tração devem ser limitadas conforme

$$\begin{aligned} T_{min} &\leq T_1(t) \leq T_{max} \\ T_{min} &\leq T_2(t) \leq T_{max} \\ &\vdots \\ T_{min} &\leq T_N(t) \leq T_{max}. \end{aligned} \quad (4.127)$$

Nesta tese, os limites de velocidade e tração são iguais para todos os caminhões.

A distância mínima de separação entre dois caminhões em sequência é definida como

$$\begin{aligned}
s_1(t) - s_2(t) &\geq d_{min} \\
s_2(t) - s_3(t) &\geq d_{min} \\
&\vdots \\
s_{N-1}(t) - s_N(t) &\geq d_{min},
\end{aligned} \tag{4.128}$$

onde d_{min} indica a distância mínima de separação entre os veículos.

Portanto, com base na descrição dos principais elementos acima, o problema de controle ótimo para coordenação de N caminhões num trecho de rodovia é definido como

$$\min_{T_1(t), T_2(t), \dots, T_N(t)} \int_{t_i}^{t_f} \left(F_{C(1)}(t) + \dots + F_{C(N)}(t) \right) dt \quad (4.129)$$

sujeito a Dinâmica

$$\begin{aligned} m\dot{v}_1(t) &= T_1(t) - \frac{1}{2}C_d\rho A v_1^2(t) \\ &\vdots \\ m\dot{v}_N(t) &= T_N(t) - \frac{1}{2}C_d\rho A v_N^2(t)\Phi(d_{(N-1|N)}) \end{aligned} \quad (4.130)$$

Condições de contorno

$$\begin{aligned} s_1(t_i) &= d_{i(1|N)} \\ &\vdots \\ s_N(t_i) &= 0 \end{aligned} \quad (4.131)$$

$$\begin{aligned} s_1(t_f) &= s_{total} \\ &\vdots \\ s_N(t_f) &= s_{total} - d_{f(1|N)} \end{aligned} \quad (4.132)$$

$$\begin{aligned} v_1(t_i) &= v_1(t_f) = v_{n(1)} \\ &\vdots \\ v_N(t_i) &= v_N(t_f) = v_{n(N)} \end{aligned} \quad (4.133)$$

Restrições de caminho

$$\begin{aligned} s_1 - s_2 &\geq d_{min} \\ &\vdots \\ s_{N-1} - s_N &\geq d_{min} \end{aligned} \quad (4.134)$$

Limites

$$\begin{aligned} s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t) &\in [0, s_{total}] \\ v_1(t), v_2(t), \dots, v_N(t) &\in [v_{min}, v_{max}] \\ T_1(t), T_2(t), \dots, T_N(t) &\in [T_{min}, T_{max}] \end{aligned} \quad (4.135)$$

onde a função custo é definida pela Equação (4.129) e a dinâmica dos caminhões é descrita pelo sistema de equações diferenciais em (4.130). As posições e velocidades iniciais e finais dos caminhões são definidas como condições de contorno nas Equações (4.131)-(4.133). As distâncias mínimas entre os caminhões são definidas como restrições de caminho em (4.134).

Por fim, os limites de cada variável de estado e de controle são definidos em (4.135). Os detalhes da implementação computacional do problema de controle ótimo estão descritos na Seção 4.7.

O ponto de partida viável do problema de controle ótimo é obtido a partir dos perfis de velocidade provenientes do problema de otimização estática definido em (4.105)-(4.110) e ajustados conforme procedimento descrito na Seção 4.5.6. Com a velocidade ajustada, estima-se o deslocamento de cada veículo baseado na própria cinemática de movimentação. O ponto de partida da força longitudinal leva em consideração o modelo da Equação (4.119) assumindo condição em regime (aceleração longitudinal igual a zero) e $\Phi = 1$, logo,

$$\begin{aligned} T_1(t) &= \frac{1}{2}C_d\rho A v_1^2(t) \\ T_2(t) &= \frac{1}{2}C_d\rho A v_2^2(t) \\ &\vdots \\ T_N(t) &= \frac{1}{2}C_d\rho A v_N^2(t). \end{aligned} \quad (4.136)$$

Por fim, com o perfil de velocidade e força longitudinal, estima-se o ponto de partida do consumo de combustível ao longo do tempo utilizando o modelo VT-CPFM definido nas equações em (4.34).

4.7 DADOS COMPUTACIONAIS

As simulações apresentadas nesta tese são realizadas num computador Intel(R) Core(TM) i5 com unidade de processamento de 2,30 GHz e 6,0 GB de memória RAM. O sistema operacional é o Windows 10 de 64 Bits.

O problema de otimização estática definido na Seção 4.5 é resolvido utilizando o algoritmo de ponto interior da função `fmincon` do programa Matlab. A configuração padrão da função é usada com exceção da tolerância de violação das restrições (*ConstraintTolerance*) alterada de 1,0E-06 (padrão) para 1,0E-04. Com esta configuração, a convergência do algoritmo é alcançada em todas as análises desta tese sem comprometer a precisão do resultado. Este aumento da tolerância de violação das restrições garante a convergência do problema de otimização estática em todas as análises desta tese, inclusive, nas análises de sensibilidade apresentadas na Seção 6.

O problema de controle ótimo definido na Seção 4.6 é formulado como um problema de colocação direta e resolvido através do algoritmo de ponto interior do tipo primal-dual

(WRIGHT, 1997) (Biblioteca IPOPT¹) com o programa em código aberto Bocop² desenvolvido pelo grupo Inria³. Em todos os exemplos, o problema é discretizado em 200 nós pelo método de Euler implícito com a tolerância relativa de convergência dada por $10E-10$, conforme padrão da biblioteca IPOPT. Maiores detalhes sobre o funcionamento do programa, instalação, exemplos e configurações podem ser encontrados em Bonnans et al. (2017).

Por fim, as integrações numéricas de avaliação dos problemas de coordenação (Seção 7) são realizadas utilizando a função ode45 do programa Matlab destinada à integração de equações diferenciais não duras através do método de Runge-Kutta. A configuração padrão da função é utilizada.

¹<https://coin-or.github.io/Ipopt/>

²<http://bocop.org/>

³<https://www.inria.fr/en/>

5 PERFIS DE VELOCIDADE DE REFERÊNCIA

Como apresentado na seção de métodos, os perfis de velocidade de referência podem ser obtidos através dos problemas de otimização estática e de controle ótimo. Nesta seção, são apresentados os perfis de velocidade provenientes destes dois métodos para diferentes cenários de coordenação. A topografia da rodovia não é considerada nesta seção.

5.1 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO ESTÁTICA

Para ilustrar o potencial do problema de otimização estática em fornecer perfis de velocidade, os exemplos são organizados de acordo com o número de caminhões envolvidos na coordenação. Em todos os exemplos, o custo nominal da manobra considera a movimentação com velocidade nominal e é calculado como

$$J_n = \sum_{k=1}^N v_{n(k)}^3 (t_f - t_i) \quad (5.1)$$

e o custo da movimentação coordenada é dado por

$$J_c = \ell J, \quad (5.2)$$

onde J é a função custo do problema de otimização estática definido na Equação (4.105).

5.1.1 Problema de otimização estática com 2 caminhões

O primeiro exemplo de solução do problema de otimização estática considera dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h, sobre um trecho de rodovia de 100 km. A distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km e, portanto, a distância inicial de separação normalizada é dada por $r_{d(1|2)}=0,05$ e o tempo de simulação é $t_f=4275$ s. O fator de redução do coeficiente de arrasto aerodinâmico é dado por $\Phi_{(1|2)}=\Phi_1+\Phi_2=1,7$, considerando as contribuições do primeiro caminhão $\Phi_1=1,0$ e do segundo caminhão $\Phi_2=0,7$. Esta redução de 30% do coeficiente de arrasto é esperada pelo segundo caminhão quando, durante a formação em comboio, a distância de separação é aproximadamente 22 m (Ver Figura 14). A Tabela 7 resume os principais dados deste cenário de coordenação.

Tabela 7 – Cenário de coordenação com dois caminhões e velocidades nominais iguais.

Caminhão	Vel. nom. [km/h]	Posição [km]
1	80	5
2	80	0

Fonte: Autor

Figura 32 ilustra os perfis ótimos de velocidade e o deslocamento resultante de ambos os caminhões durante as fases de aproximação, comboio e separação. Durante a fase de aproximação, o caminhão precedente reduz a velocidade e o caminhão subsequente aumenta a velocidade. As velocidades de aproximação são $v_{m(1)}=55$ km/h and $v_{m(2)}=92$ km/h. Os dois caminhões se encontram no instante $t_m=490$ s e na posição $d_m=12$ km e passam a trafegar com velocidade $v_p=82$ km/h. No instante $t_s=3785$ s e na posição $d_m + d_p=88$ km, a fase de separação começa com velocidades $v_{s(1)}=92$ km/h e $v_{s(2)}=55$ km/h. A velocidade do primeiro caminhão durante a fase de aproximação é igual à velocidade do segundo caminhão durante a fase de separação e vice-versa. Além disso, é possível observar que ambas as fases possuem a mesma duração. Neste exemplo, a movimentação coordenada é 8,5% mais econômica do que a nominal. Note que os dois caminhões concluem a coordenação na mesma posição em que estariam caso as velocidades nominais tivessem sido seguidas.

Outro cenário de interesse envolve dois caminhões com velocidades nominais diferentes, por exemplo, quando a velocidade do caminhão à frente é maior do que a velocidade daquele que vem em seguida, ou seja, os caminhões tendem a se afastar. Este caso particular é apresentado também num trecho de 100 km de rodovia com distância inicial de separação de $d_{i(1|2)}=5$ km, porém com velocidades nominais $v_{n(1)}=90$ km/h e $v_{n(2)}=80$ km/h. A distância inicial de separação normalizada é dada por $r_{d(1|2)}=0,05$ e o tempo de simulação é $t_f=3800$ s. Nesta configuração, a distância final de separação esperada é $d_{f(1|2)}=15,6$ km. O fator de redução do arrasto aerodinâmico é $\Phi_{(1|2)} = \Phi_1 + \Phi_2=1,7$. A Tabela 8 contém os detalhes deste cenário de coordenação.

Tabela 8 – Cenário de coordenação com dois caminhões e velocidades nominais diferentes.

Caminhão	Vel. nom. [km/h]	Posição [km]
1	90	5
2	80	0

Fonte: Autor

Figura 32 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de energia alcançada é 8,5%.

Fonte: Autor

Conforme ilustrado na Figura 33, as velocidades de aproximação são $v_{m(1)}=60$ km/h e $v_{m(2)}=100$ km/h, a velocidade em comboio é $v_p=90$ km/h e as velocidades de separação são $v_{s(1)}=100$ km/h e $v_{s(2)}=60$ km/h. Novamente, a velocidade do primeiro caminhão durante a fase de aproximação (separação) é igual a velocidade do segundo caminhão durante a fase de separação (aproximação), entretanto, a duração da fase de separação é três vezes maior do que a duração da fase de aproximação. Os caminhões se encontram na mesma posição $d_m=12$ km do caso com velocidades nominais iguais, porém, de forma antecipada no instante $t_m=448$ s. A separação é também antecipada e ocorre no instante $t_s=2406$ s e na posição $d_m + d_p=61$ km. Como esperado, as restrições do problema são atendidas e, quando o primeiro caminhão alcança o fim do trecho de coordenação, o deslocamento de cada veículo coincide com o caso nominal. Apesar deste cenário representar uma condição mais exigente, uma economia de 1,5% ainda é alcançada.

É possível observar que, ao introduzir velocidades nominais que caracterizam movimentações divergentes, a economia energética é reduzida de 8,5% a 1,5%, devido ao menor

Figura 33 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais diferentes, $v_{n(1)}=90$ km/h e $v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de energia alcançada é 1,5%.

Fonte: Autor

tempo de permanência dos veículos em formação de comboio. Espera-se que distâncias de separação menores do que 5 km resultem em reduções de consumo de combustível ainda mais acentuadas em ambos os exemplos explorados nesta seção. Além disso, a redução da diferença de velocidades nominais entre os dois caminhões deve beneficiar o consumo até os casos de movimentações convergentes.

5.1.2 Problema de otimização estática com 3 caminhões

Esta seção apresenta cenários de coordenação com três caminhões num trecho de 100 km. No primeiro exemplo, as velocidades nominais são $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. A distância inicial de separação de caminhões adjacentes é $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km resultando numa distância inicial de separação normalizada de $r_{d(1|3)}=0,1$ e num tempo de simulação de $t_f=4050$ s. Neste caso, o fator de redução do arrasto aerodinâmico é $\Phi_{(1|3)} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3=2,4$, pois $\Phi_1=1$ e $\Phi_2=\Phi_3=0,7$. Os detalhes deste cenário estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Cenário de coordenação com três caminhões e velocidades nominais iguais.

Caminhão	Vel. nom. [km/h]	Posição [km]
1	80	10
2	80	5
3	80	0

Fonte: Autor

Os perfis ótimos de velocidade dos três caminhões e o respectivo deslocamento durante as fases de aproximação, comboio e separação estão ilustrados na Figura 34. Durante a fase de aproximação, os caminhões 1 e 2 reduzem a velocidade enquanto o terceiro caminhão aumenta a velocidade em relação à velocidade nominal. As velocidades de aproximação são $v_{m(1)}=45$ km/h, $v_{m(2)}=72$ km/h e $v_{m(3)}=99$ km/h. A fase de comboio dura desde o instante $t_m=674$ s (posição $d_m=18$ km) até $t_s=3376$ s (posição $d_m + d_p=82$ km) enquanto os veículos trafegam com velocidade $v_p=84$ km/h. As velocidades de separação são $v_{s(1)}=99$ km/h, $v_{s(2)}=72$ km/h and $v_{s(3)}=45$ km/h. Como no exemplo de dois caminhões e velocidades nominais iguais, as fases de aproximação e separação apresentam mesma duração. Além disso, a velocidade do primeiro caminhão na fase de aproximação (separação) é igual à velocidade do último caminhão durante a fase de separação (aproximação). As velocidades de aproximação e separação do segundo caminhão são iguais. A economia total de energia é 7,3%.

Em relação ao exemplo com dois caminhões e velocidades nominais iguais, a inclusão de um caminhão adicional à frente com a mesma distância de separação inicial dos demais exige maiores distâncias de aproximação e separação sem alcançar o mesmo nível de economia.

No próximo exemplo, a capacidade de tratar diferentes velocidades nominais é verificada num cenário com três caminhões. Neste caso, as velocidades nominais são $v_{n(1)}=80$ km/h, $v_{n(2)}=72$ km/h and $v_{n(3)}=83$ km/h. Os caminhões adjacentes estão separados por $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km, ou seja, a distância inicial de separação normalizada é $r_{d(1|3)}=0,1$. Esta configuração resulta numa coordenação de $t_f=4050$ s. O resumo do cenário está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Cenário de coordenação com três caminhões e velocidades nominais diferentes.

Caminhão	Vel. nom. [km/h]	Posição [km]
1	80	10
2	72	5
3	83	0

Fonte: Autor

Figura 34 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de três caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de energia alcançada é 7,3%.

Fonte: Autor

A Figura 35 ilustra a solução ótima deste exemplo com três caminhões e velocidades nominais diferentes. Como no exemplo anterior, os dois primeiros caminhões reduzem a velocidade e o último caminhão aumenta a velocidade até a formação do comboio. Ao iniciar a fase de separação, o primeiro caminhão é o mais veloz enquanto os demais trafegam com velocidades abaixo da nominal. Entretanto, neste exemplo, o segundo caminhão é o mais lento permitindo a ultrapassagem do terceiro caminhão. Esta manobra é necessária para garantir o atendimento das restrições de saída do trecho de coordenação. O comboio é formado no instante $t_m=678$ s e na posição $d_m=18$ km de forma semelhante ao caso com velocidades nominais iguais. O desmanche do comboio acontece no instante $t_s=3124$ s e na posição $d_m + d_p=75$ km. As velocidades ótimas de coordenação são $v_{m(1)}=45$ km/h, $v_{m(2)}=72$ km/h, $v_{m(3)}=98$ km/h, $v_p=84$ km/h, $v_{s(1)}=96$ km/h, $v_{s(2)}=42$ km/h e $v_{s(3)}=76$ km/h. Note que nenhuma velocidade de aproximação e separação é igual à outra. Neste exemplo, a economia energética é 3,9%.

Novamente, o efeito negativo das diferentes velocidades nominais está presente, porém a possibilidade de levá-las em consideração é um atrativo do método proposto nesta tese. Mesmo

Figura 35 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de três caminhões com velocidades nominais diferentes, $v_{n(1)}=80$ km/h, $v_{n(2)}=72$ km/h e $v_{n(3)}=83$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de energia alcançada é 3,9%.

Fonte: Autor

quando caminhões possuem trajetórias divergentes, é possível economizar energia através da formação do comboio. Além disso, este último exemplo enfatiza a flexibilidade do problema de otimização estática em contemplar ultrapassagens dos caminhões envolvidos.

5.1.3 Problema de otimização estática com 10 caminhões

Para explorar a capacidade do método em coordenar vários caminhões simultaneamente, esta seção apresenta um cenário de coordenação com dez caminhões uniformemente dispersos numa rodovia de 100 km com distância inicial de separação de 2 km entre caminhões adjacentes. Neste caso, a distância inicial de separação normalizada é dada por $r_{d(1|10)}=0,18$ e tempo de simulação é dado por $t_f=3690$ s. As velocidades nominais são $v_{n(1)}=\dots=v_{n(10)}=80$ km/h. Maiores detalhes podem ser observados na Tabela 11.

A Figura 36 ilustra a solução ótima da coordenação dos dez caminhões no cenário apresentado. Durante a fase de aproximação, os caminhões 1 ao 6 reduzem a velocidade enquanto

Tabela 11 – Cenário de coordenação com dez caminhões e velocidades nominais iguais.

Caminhão	Vel. nom. [km/h]	Posição [km]
1	80	18
2	80	16
3	80	14
4	80	12
5	80	10
6	80	8
7	80	6
8	80	4
9	80	2
10	80	0

Fonte: Autor

os caminhões 7 ao 10 aumentam a velocidade em relação à velocidade nominal. Como esperado, o aspecto geral do perfil de velocidade se inverte durante a fase de separação, quando os caminhões 1 ao 4 trafegam com velocidade acima da nominal e os caminhões 5 ao 10 diminuem a velocidade em relação à nominal. O comboio é formado na posição $d_m=24$ km ($t_m=780$ s) e desmanchado na posição $d_m + d_p=76$ km ($t_s=2910$ s). Neste exemplo, as velocidades de aproximação e separação variam de $v_{m(1)}=v_{s(10)}=28$ km/h até $v_{m(10)}=v_{s(1)}=111$ km/h. A velocidade em comboio é $v_p=87$ km/h e a economia de energia esperada é 4,7%.

É importante ressaltar que a economia de energia proporcionada pelo problema de otimização estática proposto nesta tese não entra em conflito com as restrições do itinerário de cada caminhão, mesmo com um elevado número de veículos envolvidos e em cenários em que ultrapassagem se faz necessária. Contanto que o perfil ótimo de velocidade seja adequadamente seguido, os caminhões envolvidos devem sair do trecho de coordenação como se nenhuma alteração de velocidade tivesse ocorrido, porém se beneficiando de uma operação de transporte mais eficiente. Além disso, o tempo de processamento da função f_{mincon} não excede um décimo de segundo em todos os exemplos da Seção 5.1.

5.2 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE CONTROLE ÓTIMO

Nesta seção, os perfis de velocidade obtidos através do problema de otimização estática são ajustados e depois usados como ponto de partida viável do problema de controle ótimo definido nas Equações (4.129)-(4.135). O veículo escolhido para as simulações desta seção é o caminhão 8 da Tabela 4. Como discutido na Seção 4, os dados dos modelos da dinâmica

Figura 36 – Resultado do problema de otimização estática para a coordenação de dez caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)} = \dots = v_{n(10)} = 80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e distância inicial de separação de 2 km entre caminhões adjacentes. A economia de energia alcançada é 4,7%.

Fonte: Autor

longitudinal e consumo de combustível são retirados de Rakha et al. (2001) e Wang e Rakha (2017) e os dados do modelo de redução do arrasto aerodinâmico são retirados de Hucho e Ahmed (1998) e Turri, Besselink e Johansson (2017). Todos os parâmetros dos modelos utilizados estão resumidos na Tabela 12.

O primeiro cenário estende o problema de dois caminhões idênticos definido na Tabela 7. A Figura 37 ilustra a solução do problema de controle ótimo para a coordenação destes dois caminhões num trecho de 100 km. As linhas que se apresentam com variações sucessivas do tipo degrau compõem a solução do problema de otimização estática já apresentada na Figura 32. Estes perfis de velocidade são ajustados conforme o método descrito na Seção 4.5.6 e estão também ilustrados na Figura 37. Os perfis de velocidade ajustados e as correspondentes variáveis de estado e controle são utilizados como ponto de partida viável do problema de controle ótimo. A solução deste problema complementa o gráfico da Figura 37 estabelecendo a oportunidade de comparação entre os três perfis de velocidade.

Tabela 12 – Parâmetros dos modelos da dinâmica longitudinal, redução do arrasto aerodinâmico e consumo de combustível utilizados no problema de controle ótimo para obtenção dos perfis ótimos de velocidade.

Item	Descrição	Valor	Unidade
C_d	Coeficiente de arrasto aerodinâmico	0,78	-
A	Área frontal do caminhão	10,0	m ²
m	Massa do caminhão	40	t
C_1	Coeficiente 1 de redução de arrasto	14,0766	m
C_2	Coeficiente 2 de redução de arrasto	24,4626	m
α_0	Coeficiente 0 do modelo VT-CPFM	2,16e-03	l/s
α_1	Coeficiente 1 do modelo VT-CPFM	7,98e-05	l/s.kW ⁻¹
α_2	Coeficiente 2 do modelo VT-CPFM	1,00e-08	l/s.kW ⁻²
ρ	Densidade do ar	1,0	kg/m ³
g	Aceleração da gravidade	9,81	m/s ²

Fonte: Autor.

O perfil de velocidade ajustado suaviza o degrau originalmente presente na solução do problema de otimização estática. Entretanto, a restrição que garante a formação e o desmanche do comboio no mesmo local e instante, provoca uma alteração exagerada das velocidades coordenadas de aproximação e separação, especialmente, das velocidades abaixo da nominal. Além disso, o aspecto geral da solução do problema de controle ótimo é significativamente mais suave do que a alternativa via otimização estática e sua versão ajustada. Na Figura 37, é possível observar que as fases de aproximação e separação são estendidas e a variação total das velocidades de coordenação é reduzida.

Os detalhes sobre a cinemática da movimentação podem ser verificados na Figura 38. O comboio é formado no instante $t_m=663$ s e na posição $d_m=16$ km, aproximadamente 4 km à frente da posição que o problema de otimização estática sugere. Por sua vez, a separação ocorre no instante $t_s=3634$ s e na posição $d_m + d_p=84$ km, antecipando o desmanche do comboio em 4 km. Conforme a solução do problema de controle ótimo, as velocidades dos caminhões se mantêm entre 55 e 91 km/h. Apesar da faixa de velocidades mais estreita, a velocidade de movimentação em comboio se mantém em aproximadamente 82 km/h. A economia de combustível esperada é 5,4% quando a solução do problema de controle ótimo é considerada. É importante ressaltar que o valor de economia reportado nesta seção se refere ao consumo de combustível calculado com o modelo descrito na Equação (4.34), diferentemente do modelo de consumo energético utilizado pelo problema de otimização estática definido na Equação (4.43).

Figura 37 – Comparação dos perfis de velocidade provenientes dos problemas de otimização estática (bruto e ajustado) e controle ótimo para dois caminhões.

Fonte: Autor

Figura 38 – Resultado do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 5,4%.

Fonte: Autor

O segundo cenário apresentado nesta seção estende o problema de três caminhões idênticos definido na Tabela 9 com os dados da Tabela 12. A Figura 39 ilustra a solução do problema de controle ótimo neste cenário. A título de comparação, a solução do problema de otimização estática da Figura 34 e o perfil de velocidade ajustado são também apresentados. Novamente, o problema de controle ótimo suaviza o perfil de velocidade proveniente do problema de otimização estática. Além disso, é possível observar que, apesar dos caminhões iniciarem a manobra com a mesma distância de separação, o encontro de todos os caminhões não ocorre no mesmo instante. Um comboio parcial é formado pelos caminhões 2 e 3 na fase de aproximação antes da chegada do caminhão 1 para compor o grupo. Na fase de separação, o caminhão 3 abandona o comboio de três caminhões de forma antecipada e os caminhões 1 e 2 seguem como um comboio parcial.

Figura 39 – Comparação dos perfis de velocidade provenientes dos problemas de otimização estática (bruto e ajustado) e controle ótimo para três caminhões.

Fonte: Autor

Os detalhes da movimentação estão ilustrados na Figura 40. O comboio parcial composto pelos caminhões 2 e 3 é formado no instante 587 s e na posição 16 km e trafega a uma velocidade de aproximadamente 90 km/h. Enquanto isso, o caminhão 1 mantém a velocidade mais baixa de aproximadamente 54 km/h até o encontro do comboio parcial no instante 1013 s e na posição 27 km. Após a formação do comboio, o conjunto de três veículos trafega a 84 km/h. A separação dos veículos não ocorre simultaneamente. O caminhão 3 abandona o comboio no instante 2977 s e na posição 72 km. Os caminhões 1 e 2 mantêm a formação de comboio

por mais 12 km até o desmanche completo do comboio no instante 3443 s. Uma economia de combustível de 5,2% é obtida nesta análise.

Figura 40 – Resultado do problema de controle ótimo para a coordenação de três caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 5,2%.

Fonte: Autor

A solução apresentada na Figura 40 indica o benefício de antecipar a formação de comboios parciais e atrasar o desmanche completo do comboio. Caminhões com velocidades de referência mais elevadas tendem a permanecer em comboio por mais tempo. De fato, a não linearidade do custo energético em função da velocidade de movimentação faz com que, em altas velocidades, o efeito aerodinâmico seja predominante sobre a demanda energética. Portanto, nesta condição, justifica-se a formação precoce de comboios parciais com os veículos mais velozes numa tentativa de compensar o acréscimo da demanda energética associada à movimentação com elevadas velocidades de referência. O mesmo raciocínio pode ser aplicado à fase de separação. Os veículos que teriam velocidades de referência mais elevadas se mantêm em comboio na tentativa de mitigar os efeitos aerodinâmicos negativos da movimentação. É importante ressaltar que, dentre os métodos explorados nesta tese, a solução ótima com formação de comboios parciais só é alcançada através do problema de controle ótimo.

O aspecto geral da solução para dois caminhões se repete no caso com três caminhões. O encontro de um par de caminhões ocorre sempre a uma velocidade ligeiramente menor do que a velocidade em comboio que é assumida em seguida. Após o encontro, os caminhões aceleram juntos até a velocidade de referência do comboio. Antes da saída de um dado caminhão do comboio, o conjunto reduz a velocidade. Os caminhões remanescentes em formação de comboio retomam o patamar de velocidades mais elevadas em seguida. Por fim, os resultados apresentados nesta seção mostram a capacidade do problema de controle ótimo em suavizar os perfis de velocidade e flexibilizar a coordenação em cenários com três caminhões permitindo a formação de comboios parciais com dois caminhões.

O programa Bocop resolve o problema de controle ótimo com dois caminhões em 178 iterações e o problema com três caminhões em 122 iterações. Em ambos os casos, a solução ótima é encontrada em menos de 40 s. Os demais dados computacionais estão descritos na Seção 4.7.

6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Para adquirir maior entendimento sobre a estratégia de coordenação e sobre o problema de otimização estática, análises de sensibilidade são apresentadas a seguir. O problema de otimização definido nas Equações (4.105)-(4.110) é resolvido para diferentes distâncias iniciais de separação, velocidades nominais e distâncias mínimas percorridas em cada fase. Análises semelhantes podem ser encontradas em K. Y. Liang, J. Mårtensson e K. H. Johansson (2016) e Mendes, Leonardi e Fleury (2019), entretanto, nesta tese, a fase de separação e um maior número de caminhões são abordados. Como nas soluções apresentadas na Seção 5.1, o fator de redução do arrasto aerodinâmico do caminhão seguidor é 0,7 representando 30% de redução do coeficiente de arrasto. O custo nominal da manobra é dado pela Equação (5.1) e o custo da movimentação coordenada é dado pela Equação (5.2). Além disso, as velocidades de aproximação e separação do i -ésimo caminhão e a velocidade em comboio são normalizadas utilizando a velocidade nominal do primeiro caminhão como

$$\bar{v}_{m(i)} = \frac{v_{m(i)}}{v_{n(1)}} \quad (6.1)$$

$$\bar{v}_{s(i)} = \frac{v_{s(i)}}{v_{n(1)}} \quad (6.2)$$

$$\bar{v}_p = \frac{v_p}{v_{n(1)}}, \quad (6.3)$$

onde $i = 1, 2, \dots, N$.

6.1 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA INICIAL DE SEPARAÇÃO

O efeito da distância inicial de separação sobre as velocidades coordenadas e sobre o consumo total de energia é abordado nesta seção. Aqui, apenas caminhões igualmente espaçados são considerados, isto é, a distância inicial de separação entre todos os caminhões adjacentes é a mesma. Além disso, as análises subsequentes são realizadas utilizando a distância inicial de separação normalizada definida conforme equação

$$r_{d(1|N)} = \frac{d_{i(1|N)}}{\ell}, \quad (6.4)$$

ou seja, a distância inicial de separação normalizada é a distância do primeiro caminhão ao último dividida pelo comprimento total do trecho de coordenação. As distâncias mínimas percor-

ridas em cada fase são configuradas como 1% da distância total do trecho ℓ e impostas através dos parâmetros $r_m=r_p=r_s=0,01$. Todos os caminhões possuem velocidades nominais iguais. A Figura 41 ilustra as velocidades normalizadas para os cenários com 2, 3 e 10 caminhões.

Figura 41 – Velocidades normalizadas de coordenação em função da distância inicial de separação normalizada $r_{d(1|N)}$ para $N=2, 3$ e 10 caminhões. Nesta análise, $r_m=r_p=r_s=0,01$ e todas as velocidades nominais são iguais.

Num cenário com dois caminhões, o primeiro caminhão trafega com velocidade acima da nominal e o segundo caminhão trafega com velocidade abaixo da nominal. Este resultado se inverte durante a fase de separação. Portanto, $\bar{v}_{m(1)} < 1$, $\bar{v}_{m(2)} > 1$, $\bar{v}_{s(1)} > 1$ e $\bar{v}_{s(2)} < 1$. Durante a fase em comboio, a velocidade do grupo de caminhões é mais elevada que a velocidade nominal durante toda a faixa de distâncias iniciais analisada. Conforme o parâmetro $r_{d(1|N)}$

aumenta, as velocidades normalizadas aumentam. Para uma dada velocidade nominal e uma dada distância inicial de separação, o aumento de $r_{d(1|N)}$ representa a diminuição da distância do caminhão líder até o fim do trecho de coordenação, exigindo que os caminhões trafeguem com velocidade mais elevada durante cada fase para atender as restrições do problema. Em cenários com um maior número de caminhões, a tendência geral prevalece.

A relação entre as velocidades de aproximação e separação é dada por

$$v_{m(i)} = v_{s(N-i+1)}, \quad (6.5)$$

isto é, a simetria observada nas Figuras 32, 34 e 36 se repete para toda a faixa de $r_{d(1|N)}$.

O custo normalizado é mostrado na Figura 42 como a razão dos custos coordenado e nominal (Ver Equações (5.1) e (5.2)). Conforme $r_{d(1|N)}$ diminui, os caminhões possuem uma maior distância disponível para formar o comboio e compensar o custo adicional associado às fases de aproximação e separação. O custo normalizado cresce monotonicamente conforme a distância inicial de separação cresce. A formação do comboio se torna benéfica quando o parâmetro $r_{d(1|N)}$ é suficientemente pequeno para gerar um custo normalizado $J_c/J_n < 1$. Quando $J_c/J_n = 1$, o valor de $r_{d(1|N)}$ representa o valor de transição abaixo do qual a coordenação é mais eficiente. Com este valor, tem-se a distância máxima de separação que os caminhões podem ter para que uma manobra econômica seja possível num dado trecho de rodovia. Este valor de transição para os conjuntos de 2, 3 e 10 caminhões ocorre quando $r_{d(1|2)}=0,106$, $r_{d(1|3)}=0,146$ e $r_{d(1|10)}=0,207$ e a economia de combustível excede 10% quando $r_{d(1|2)} \leq 0,039$, $r_{d(1|3)} \leq 0,081$ e $r_{d(1|10)} \leq 0,146$, respectivamente.

Para ilustrar este resultado, considere um cenário de coordenação com dois caminhões num trecho de 100 km de rodovia. Para que a manobra apresente uma economia energética, no início da coordenação, os veículos não podem estar separados por mais de 11 km. Caso contrário, a formação do comboio acarretará um custo energético coordenado maior do que a contrapartida nominal. Além disso, é possível observar que os valores apresentados na Figura 42 são consistentes com os valores de redução de consumo reportados nos casos ilustrados nas Figuras 32, 34 e 36. Nestes casos, as distâncias iniciais de separação normalizadas $r_{d(1|2)}=0,05$, $r_{d(1|3)}=0,1$ e $r_{d(1|10)}=0,18$ resultaram em reduções de consumo dadas por 8,5%, 7,3% e 4,7%, respectivamente.

Figura 42 – Custo normalizado em função da distância inicial de separação normalizada $r_{d(1|N)}$ para $N=2, 3$ e 10 caminhões. Nesta análise, $r_m=r_p=r_s=0,01$ e todas as velocidades nominais são iguais.

6.2 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE NOMINAL

Caminhões podem apresentar movimentações nominais divergentes caracterizadas pelas velocidades nominais distintas. Na Figura 43, as velocidades normalizadas de dois caminhões são mostradas para diferentes valores de $r_{v(1|2)}$ (Ver Equação (4.80)). As distâncias mínimas de cada fase estão limitadas novamente em 1% do trecho total de coordenação, isto é, $r_m=r_p=r_s=0,01$. Nessa figura, $r_{d(1|2)}=0,09$ e a faixa de valores $-0,0875 < r_{v(1|2)} < +0,0875$ representa cenários em que o primeiro caminhão possui velocidade nominal $v_{n(1)}=80$ km/h e a velocidade nominal do segundo caminhão assume valores entre 73 e 87 km/h.

Durante todas as fases, as velocidades normalizadas de coordenação diminuem conforme $r_{v(1|2)}$ cresce. Este efeito é explicado pela diminuição na demanda energética quando a velocidade de um dos caminhões é reduzida. Assumindo que o caminhão líder trafega com velocidade constante de $v_{n(1)}=80$ km/h, se o caminhão seguidor trafegar a $v_{n(2)}=87$ km/h ($r_{v(1|2)}=-0,08725$), a demanda energética é maior do que a demanda no caso oposto em que $v_{n(1)}=80$ km/h e $v_{n(2)}=73$ km/h ($r_{v(1|2)}=+0,08725$). Portanto, o nível total de energia consumida na manobra é reduzido permitindo a redução das velocidades de cada caminhão em todas as fases de coordenação.

As velocidades normalizadas seguem a tendência já identificada na Figura 33, onde a velocidade de aproximação do primeiro (segundo) caminhão é igual à velocidade de separação

Figura 43 – Velocidades normalizadas de coordenação em função da relação de velocidades nominais $r_{v(1,2)}$. Nesta análise, $r_m=r_p=r_s=0,01$ e $r_{d(1|2)}=0,09$.

do segundo (primeiro) caminhão. Para $r_{v(1|2)}>0$, o deslocamento de cada caminhão deve ser predominantemente divergente para atender as restrições impostas pelo deslocamento nominal e isto é alcançado reduzindo o comprimento da fase de aproximação e aumentando o comprimento da fase de separação.

A Figura 44 ilustra o custo normalizado da coordenação em função de $r_{v(1|2)}$. Quando esta relação de velocidades nominais é igual a zero, ou seja, as velocidades nominais são iguais, os valores de consumo são os mesmos apresentados na Figura 42 para dois caminhões. Para que uma economia de 5% seja alcançada, os perfis de velocidade devem promover a coordenação dos caminhões em manobras com $r_{v(1|2)}=-0,023$, $r_{v(1|2)}=-0,034$ e $r_{v(1|2)}=-0,044$ para valores de $r_{d(1|2)}=0,085$, $r_{d(1|2)}=0,09$ e $r_{d(1|2)}=0,095$, respectivamente. Por outro lado, os caminhões podem assumir deslocamentos ligeiramente divergentes e ainda economizarem energia. O ponto de transição ocorre em $r_{v(1|2)}=0,048$, $r_{v(1|2)}=0,036$ e $r_{v(1|2)}=0,024$ para os valores de $r_{d(1|2)}=0,085$, $r_{d(1|2)}=0,09$ e $r_{d(1|2)}=0,095$, respectivamente. Portanto, caminhões mais próximos no início conseguem realizar manobras divergentes e econômicas com maiores diferenças de velocidade nominal.

Apesar do custo energético nominal diminuir com o aumento de $r_{v(1|2)}$, assumindo $v_{n(1)}$ constante, o custo normalizado cresce com o aumento de $r_{v(1|2)}$, devido à característica dificultadora da formação de comboio nas manobras em que os veículos tendem a se afastar. Entretanto,

Figura 44 – Custo normalizado em função da relação de velocidades nominais $r_{v(1,2)}$. Nesta análise, $r_m=r_p=r_s=0,01$ e $r_{d(1|2)}=0,09$.

mesmo nos cenários em que as manobras são divergentes, uma economia de energia através da formação de comboio é possível.

6.3 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA EM COMBOIO

Sob certas circunstâncias, uma distância mínima em comboio é desejada para aumentar a densidade de tráfego e aumentar o fluxo de veículos numa rodovia. Entretanto, considerando a estrutura de coordenação proposta nesta tese, manter a formação de comboio por mais tempo pode implicar maior consumo de combustível, pois as fases de aproximação e separação seriam reduzidas.

A Figura 45 ilustra as velocidades normalizadas de coordenação de dois caminhões em função do parâmetro r_p (Ver Equação (4.98)) para $r_{d(1|2)}=0,09$. Na faixa $0 < r_p < 0,55$, as velocidades normalizadas são constantes e não sofrem influência da distância mínima em comboio, pois a otimização converge naturalmente para uma distância em comboio mais extensa que a distância imposta pela desigualdade (4.106). Acima de $r_p=0,55$, a velocidade normalizada de aproximação do primeiro caminhão e a velocidade normalizada de separação do segundo caminhão decrescem abruptamente com o aumento de r_p . Em contraste, um leve aumento das demais velocidades normalizadas é esperado. Isto ocorre devido à redução das distâncias associadas às fases de aproximação e separação exigindo uma diferença maior de velocidade entre

os caminhões para que as distâncias de separação no início e no fim da coordenação sejam atendidas.

Figura 45 – Velocidades normalizadas de coordenação em função da distância mínima em comboio normalizada r_p . Nesta análise, $r_m=r_s=0,01$ e $r_{d(1|2)}=0,09$.

O custo normalizado é mostrado na Figura 46 em função de r_p para diferentes valores de $r_{d(1|2)}$. Assim como as velocidades normalizadas, o custo se mantém constante ao longo da faixa inicial de r_p . Assim que a distância mínima em comboio passa a influenciar a solução do problema de otimização, o custo normalizado aumenta conforme o valor de r_p cresce. Particularmente, para $r_{d(1|2)}=0,085$, $r_{d(1|2)}=0,09$ e $r_{d(1|2)}=0,095$, a coordenação deixa de ser econômica a partir de $r_p=0,79$, $r_p=0,75$ e $r_p=0,70$, respectivamente. Portanto, uma maior distância inicial de separação reduz a faixa de r_p que resulta numa movimentação econômica. Neste exemplo, a relação de compromisso entre densidade de tráfego e redução de consumo se torna evidente.

6.4 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA DE APROXIMAÇÃO

Na Figura 27, as ramificações da malha rodoviária estão ilustradas. Com a adoção da representação por um único trecho, é preciso garantir a equivalência com restrições apropriadas nas fases de aproximação e separação. O algoritmo de coordenação não deve sugerir o encontro dos veículos num ponto do trecho equivalente que não é compartilhado por todos os veículos na malha rodoviária original ou sugerir a separação num ponto em que um dos caminhões já deveria ter abandonado o trecho. Portanto, nesta seção e na seguinte, são explorados os efeitos

Figura 46 – Custo normalizado em função da distância mínima em comboio normalizada r_p . Nesta análise, $r_m=r_s=0,01$ e $r_{d(1|2)}=0.09$.

da distância mínima de aproximação e separação para que as sugestões de coordenação sejam condizentes com os itinerários dos caminhões envolvidos e com os aspectos construtivos da malha rodoviária considerada.

Na Figura 47, é possível observar as velocidades normalizadas de coordenação de dois caminhões em função da distância mínima de aproximação normalizada r_m (Ver Equação (4.103)) com $r_{d(1|2)} = 0,09$. Para pequenos valores de r_m , neste caso, $0 < r_m < 0,22$, a solução coordenada converge para valores de d_m maiores que os impostos pela restrição, logo nenhuma alteração é observada nos valores de velocidade normalizada. Quando o valor de r_m excede o limiar de 22% do comprimento ℓ do trecho de coordenação, as velocidades da fase de aproximação tendem ao valor da velocidade nominal, isto é, a velocidade de aproximação do caminhão 1 aumenta e a velocidade de aproximação do caminhão 2 diminui. Com o aumento da distância percorrida durante a fase de aproximação, a diferença de velocidades nesta fase é reduzida. As demais velocidades de coordenação apresentam ligeiro crescimento com o aumento de r_m .

O custo normalizado para diferentes valores de r_m pode ser observado na Figura 48. Assim como observado na Seção 6.3, o custo energético se mantém constante enquanto a restrição associada a r_m não é ativada. Para valores de r_m maiores que 22%, a distância de aproximação passa a ser imposta pela restrição e isso acarreta o aumento do custo energético da movimentação conforme o valor de r_m cresce. Se a distância mínima de aproximação for suficientemente grande, a movimentação resultante pode não apresentar benefícios associados à economia de

Figura 47 – Velocidades normalizadas de coordenação em função da distância mínima de aproximação normalizada r_m . Nesta análise, $r_p=r_s=0,01$ e $r_{d(1|2)}=0,09$.

energia. Por exemplo, a coordenação deixa de ser benéfica quando a distância mínima de aproximação normalizada excede $r_m=0,53$, $r_m=0,49$ e $r_m=0,44$ para os casos com $r_{d(1|2)}=0,085$, $r_{d(1|2)}=0,09$ e $r_{d(1|2)}=0,095$, respectivamente. Neste exemplo, se estabelece uma relação de compromisso entre a viabilidade da coordenação na malha rodoviária considerada e a redução de consumo.

Figura 48 – Custo normalizado em função da distância mínima de aproximação normalizada r_m . Nesta análise, $r_p=r_s=0,01$.

6.5 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA DE SEPARAÇÃO

De maneira análoga ao caso da seção anterior, a variação da distância mínima de separação explora a necessidade de dissolver o comboio de forma antecipada para que os itinerários dos caminhões sejam atendidos. As velocidades normalizadas de dois caminhões são ilustradas na Figura 49 em função da distância mínima de separação normalizada. O aspecto geral das curvas de velocidade é idêntico ao apresentado na Figura 47, porém, neste caso, são as velocidades de separação que tendem à velocidade nominal conforme r_s aumenta. Novamente, a distância inicial de separação normalizada é $r_{d(1|2)}=0,09$ e a simetria entre as fases de aproximação e separação deixa de existir quando o valor de r_s excede 22%.

Figura 49 – Velocidades normalizadas de coordenação em função da distância mínima de separação normalizada r_s . Nesta análise, $r_m=r_p=0,01$ e $r_{d(1|2)}=0,09$.

A curva do custo normalizado é exatamente a mesma apresentada na Figura 48 e é apresentada novamente na Figura 50 por completude. De fato, ao se impor uma distância maior na fase de separação, a diferença entre as velocidades de coordenação nesta fase diminui para que a mesma distância final de separação seja obtida. Como visto na seção anterior, este comportamento é também esperado quando a distância mínima é imposta sobre a fase de aproximação. Portanto, para o mesmo cenário de coordenação, o aumento da distância mínima de aproximação ou separação implica diminuição da diferença das velocidades de coordenação na fase em que a imposição é realizada.

Figura 50 – Custo normalizado em função da distância mínima de separação normalizada r_s .
Nesta análise, $r_m=r_p=0,01$.

7 AVALIAÇÃO DOS PROBLEMAS DE COORDENAÇÃO

Nesta seção, os perfis ótimos de velocidade provenientes dos problemas de otimização estática e controle ótimo são avaliados através de simulação usando modelos validados e dados topográficos de uma rodovia real. A escolha de um trecho propício e com bom potencial de economia de combustível através da formação de comboios envolve uma série de fatores como densidade de tráfego, topografia, quantidade de pedágios, existência de obras e frequência de fiscalizações de trânsito. Entretanto, nesta tese, o trecho de rodovia escolhido para a implementação da estrutura de coordenação proposta deve apresentar apenas elevada média de velocidade e inclinação de pista moderada.

Uma das principais estradas brasileiras é a BR-116 que conecta a região nordeste ao sul do país com quase 4500 km de extensão. Para as análises subsequentes, escolheu-se um trecho de 100 km da BR-116 entre as cidades de Cachoeira Paulista (lat: -22.677062, lon: -45.00198) e São José dos Campos (lat: -23.222642, lon: -45.903445) no estado de São Paulo. Na Figura 51, é possível verificar o trecho em questão. Além disso, este trecho é uma importante rota de transporte de carga e passageiros, pois liga as duas maiores cidades do país, Rio de Janeiro e São Paulo.

Figura 51 – Rodovia BR-116 entre as cidades de Cachoeira Paulista (lat: -22.677062, lon: -45.00198) e São José dos Campos (lat: -23.222642, lon: -45.903445).

Fonte: Autor.

A Figura 52 ilustra a elevação e a inclinação de pista ao longo do percurso escolhido da rodovia. É possível observar que a inclinação de pista permanece abaixo de 2% na maior parte de sua extensão. Além disso, o limite legal de velocidade do percurso considerado é de 90 km/h para veículos pesados¹.

Figura 52 – Elevação (superior) e inclinação de pista (inferior) do trecho de rodovia considerado entre as cidades de Cachoeira Paulista e São José dos Campos.

Fonte: Autor.

Nas avaliações desta seção, o consumo de combustível do caso coordenado é comparado ao consumo de combustível do caso nominal para verificação da economia total da manobra. A dinâmica do caminhão é descrita pelo sistema de equações diferenciais em (4.15)-(4.17) com o fator de redução do arrasto aerodinâmico descrito pela Equação (4.11). O consumo de combustível definido na Equação (4.34) é usado para verificar o consumo total de combustível de cada veículo. Um controlador longitudinal do tipo CACC é implementado conforme descrição apresentada na Seção 4.2. O tempo de separação considerado é $t_h=1$ s representando uma distância de separação de 22,2 m a uma velocidade de 80 km/h e 29,5% de redução da força de arrasto aerodinâmico. O cenário de coordenação envolve apenas caminhões idênticos com os dados da Tabela 13.

O fluxograma das etapas de avaliação está ilustrado na Figura 53. Primeiramente, o cenário de coordenação é definido com o identificador, a velocidade nominal e a posição inicial

¹<http://www.novadutra.com.br/resources/files/faq/RADARES%20RODOVIA%20PRESIDENTE%20DUTRA.pdf>

Tabela 13 – Dados dos caminhões.

Parâmetro	descrição	Valor	Unidade
m	Massa total	40	t
A	Área frontal	10	m ²
C_d	Coeficiente de arrasto	0,78	-
f	Coeficiente de resistência ao rolamento	24,4626	-
P_{max}	Potência máxima do motor	475	hp
η	Eficiência do trem de potência	0,94	-
τ	Constante de tempo do trem de potência	0,5	s
α_0	Coeficiente 0 do modelo VT-CPFM	2,16e-03	l/s
α_1	Coeficiente 1 do modelo VT-CPFM	7,98e-05	l/s.kW ⁻¹
α_2	Coeficiente 2 do modelo VT-CPFM	1,00e-08	l/s.kW ⁻²
C_1	Coeficiente 1 de redução de arrasto	14,0766	m
C_2	Coeficiente 2 de redução de arrasto	24,4626	m
K_p	Ganho proporcional do controlador	0,75	-
K_i	Ganho integral do controlador	0,19	-
K_b	Ganho da solução <i>anti windup</i>	1	-

de cada caminhão. Estas informações são passadas para o problema de coordenação. Nesta etapa, duas abordagens podem ser implementadas. A primeira consiste na obtenção do perfil de velocidade ajustado proveniente do problema de otimização estática e a segunda consiste na obtenção do perfil de velocidade proveniente do problema de controle ótimo. Em seguida, estes perfis de velocidade são utilizados como referência dos controladores da dinâmica longitudinal dos veículos. Nesta tese, um ambiente de simulação realiza a manobra e avalia o desempenho dos perfis de velocidade calculando o consumo e a economia de combustível.

7.1 AVALIAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO ESTÁTICA

O problema de otimização estática definido nas Equações (4.105)-(4.110) fornece velocidades de coordenação que são ajustadas conforme procedimento detalhado na Seção 4.5.6. A seguir, estes perfis de velocidade ajustados são utilizados como referência dos controladores da dinâmica longitudinal para verificação da economia de combustível no trecho de rodovia escolhido (Ver Figuras 51 e 52).

No primeiro exemplo, a coordenação de dois caminhões é explorada considerando o mesmo cenário definido na Tabela 7. Dois caminhões iniciam a coordenação a $d_{i(1|2)}=5$ km de distância um do outro e com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h, sobre o trecho escolhido de 100 km. Discussão detalhada sobre o perfil de velocidade de referência pode ser encontrada na Seção 5.1.1. A Figura 54 ilustra a movimentação dos dois caminhões de 40 t.

Figura 53 – Fluxograma para avaliação da estrutura de coordenação.

Fonte: Autor

No gráfico superior, é possível observar a movimentação nos casos nominal e coordenado em função do tempo e, no gráfico inferior, as velocidades de cada caminhão nos casos nominal e coordenado estão ilustradas. As linhas escuras identificam a movimentação nominal e as linhas coloridas identificam as três fases da movimentação coordenada. As linhas cheias estão associadas ao caminhão líder e as linhas pontilhadas estão associadas ao caminhão seguidor. O comboio é formado na posição 13 km após 517 s e os veículos passam a trafegar com uma velocidade de referência de $v_p=82$ km/h. Na posição 87 km e no instante 3785 s, o comboio se desfaz e os caminhões alteram a sua velocidade para concluírem a coordenação coincidentes com a movimentação nominal.

Durante as fases de aproximação e separação, o seguimento da velocidade de referência é realizado sem sofrer significativa influência da inclinação de pista. Entretanto, durante a fase em comboio, os veículos não conseguem sustentar a velocidade desejada nas posições 33 km e 66 km, onde as inclinações de pista mais elevadas se impõem por uma distância maior.

Figura 55 ilustra o consumo de combustível ao longo do tempo para cada caminhão nos cenários nominal e coordenado. Na figura superior, é possível observar o consumo de combustível ao longo de toda a manobra para os casos nominal e coordenado diferenciando cada fase da coordenação. Nos dois gráficos abaixo, as fases de aproximação e separação são ilustradas detalhadamente. No início da fase de aproximação, o caminhão 1 apresenta um menor consumo de combustível quando comparado ao caso nominal devido a sua redução

Figura 54 – Manobra resultante da avaliação do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,5%.

Fonte: Autor.

inicial de velocidade. Logo em seguida, o consumo cresce devido ao aumento de velocidade necessário para a formação do comboio. Por sua vez, no início da fase de aproximação, o caminhão 2 acelera consumindo mais combustível do que no caso nominal. Comportamento oposto é observado na fase de separação, quando o caminhão 1 precisa aumentar a velocidade e o caminhão 2 precisa diminuir a velocidade para que eles se afastem até o fim da coordenação.

Durante a formação em comboio, o caminhão 1 passa a consumir ligeiramente mais do que o caso nominal, pois a velocidade em comboio é maior do que a velocidade nominal e o caminhão 2 passa a consumir significativamente menos devido à redução da força de arrasto aerodinâmico, compensando o aumento do consumo de combustível do caminhão 1 na fase

Figura 55 – Consumo de combustível resultante da avaliação do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,5%.

Fonte: Autor.

de comboio e o aumento de consumo de combustível de ambos os caminhões nas fases de aproximação e separação.

No caso nominal, o caminhão 1 consome 46,34 litros de combustível enquanto o segundo caminhão consome 46,00 litros. Como cada veículo percorre 95 km no trecho de análise, o consumo médio dos caminhões 1 e 2 no caso nominal é dado por 2,05 e 2,07 km/l, respectivamente. Considerando o caso coordenado, o consumo de combustível do caminhão 1 é mais

alto do que o caso nominal, 47,16 litros, devido às variações de velocidade ao longo da coordenação, porém o consumo do caminhão 2 é significativamente reduzido alcançando a marca de 42,91 litros. Logo, o consumo médio dos caminhões 1 e 2 no caso coordenado chega a 2,01 km/l e 2,21 km/l, respectivamente. A economia de combustível nesta avaliação é 2,5%.

Estendendo a análise anterior para três caminhões, o cenário definido na Tabela 9 é considerado. Três veículos separados por $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h, são coordenados no trecho escolhido de 100 km. A movimentação deste caso é ilustrada na Figura 56. Os caminhões 1 e 2 diminuem a velocidade e o caminhão 3 acelera para que o comboio seja formado na posição 18 km e no instante 670 s. Assim como no exemplo com dois caminhões, os veículos não seguem adequadamente a referência de velocidade nas posições 33 km e 66 km devido ao prolongado trecho com inclinação de pista elevada. Os detalhes sobre o perfil de velocidade de referência podem ser encontrados na Seção 5.1.2.

A Figura 57 mostra o consumo de combustível para os três caminhões. Novamente, quando comparado ao caso nominal, o caminhão 1 apresenta um consumo de combustível menor no início da aproximação devido à sua redução de velocidade. Comportamento semelhante é observado para o caminhão 2, porém em menor escala devido à menor redução de velocidade sofrida nesta fase. Em contrapartida, o caminhão 3 apresenta elevado consumo de combustível na fase de aproximação devido à elevada velocidade que este veículo precisa sustentar. Com uma velocidade em comboio maior do que a nominal, o consumo do caminhão 1 durante esta fase é maior. Durante a movimentação em comboio, a tendência de crescimento da curva de consumo dos caminhões 2 e 3 apresenta uma queda significativa em relação ao caso nominal.

Na fase de separação, a alteração de velocidade do caminhão 2 não apresenta impacto notável na curva de consumo da Figura 57. Em contrapartida, nesta fase, o caminhão 1 acelera e sustenta uma velocidade mais elevada aumentando significativamente o seu consumo. Por outro lado, o caminhão 3 desacelera reduzindo drasticamente o consumo de combustível. Entretanto, para sair do trecho com a velocidade nominal, o caminhão 3 acelera novamente elevando o consumo de combustível nos últimos quilômetros.

No caso nominal, o consumo total de combustível do caminhão 1 é 44,29 litros e o consumo total dos caminhões 2 e 3 é 43,90 litros. Diferentemente do caso anterior, o trecho percorrido por cada veículo possui 90 km, logo, o consumo médio do primeiro caminhão é 2,03 km/l e dos demais é 2,05 km/l. No caso coordenado, o consumo total do caminhão 1 cresce e atinge 46,00 litros enquanto o consumo dos caminhões 2 e 3 é reduzido até 40,76 litros e 42,69

Figura 56 – Manobra resultante da avaliação do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,0%.

Fonte: Autor.

litros, respectivamente. Portanto, o consumo médio no caso coordenado é 1,96 km/l, 2,21 km/l e 2,11 km/l para os caminhões 1, 2 e 3, respectivamente. A redução do consumo de combustível alcançada nesta avaliação é 2,0%.

Apesar do procedimento de otimização desprezar a topografia da rodovia e impor o encontro simultâneo de todos os caminhões, ainda é possível obter perfis de velocidade mais eficientes do que o caso nominal. Além da economia de combustível, a fase de separação é considerada evitando uma potencial penalidade de desvio do itinerário ao sair do trecho de coordenação. Por fim, mesmo em situações em que a economia de combustível não é tão

Figura 57 – Consumo de combustível resultante da avaliação do problema de otimização estática para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,0%.

Fonte: Autor.

elevada, a manobra pode ser interpretada como benéfica, pois o fluxo da rodovia aumenta com o arranjo mais compacto dos veículos.

7.2 AVALIAÇÃO DO PROBLEMA DE CONTROLE ÓTIMO

A coordenação num trecho de rodovia utilizando o problema de controle ótimo é avaliada nesta seção. O fluxograma para avaliação é ilustrado na Figura 53, porém, nesta seção, o problema de otimização estática é resolvido, o perfil de velocidade é ajustado e serve de ponto de partida viável do problema de controle ótimo. Em seguida, a solução do problema de controle ótimo é usada como referência dos controladores da dinâmica longitudinal de todos os caminhões envolvidos. Nas análises seguintes, considera-se caminhões idênticos com os dados listados na Tabela 13 e o trecho de 100 km entre as cidades de Cachoeira Paulista e São José dos Campos ao longo da rodovia BR-116 (Ver Figura 51). Os dados de elevação e inclinação de pista estão ilustrados na Figura 52.

Na Figura 58, a movimentação de dois caminhões é ilustrada conforme cenário definido na Tabela 7. O deslocamento de cada caminhão pode ser observado no gráfico superior e, no gráfico inferior, as velocidades de movimentação nos casos nominal e coordenado são mostradas. A distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km e as velocidades nominais são iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. Os detalhes sobre o perfil de velocidade são discutidos na Seção 5.2. A movimentação nominal é apresentada com cores escuras e as demais curvas coloridas identificam as fases de aproximação, coordenação e separação. É possível observar que os perfis de velocidade apresentados na Figura 37 são adequadamente seguidos durante a maior parte da movimentação, apesar das quedas de velocidade nos quilômetros 33 e 66 do trecho, devido aos longos trechos de inclinação elevada. Os pontos de encontro e separação sugeridos pela solução do problema de controle ótimo são atendidos na simulação.

A Figura 59 ilustra o consumo de combustível ao longo do tempo para cada caminhão sob os casos nominal e coordenado. O consumo dos caminhões no caso nominal é igual ao caso analisado na Seção 7.1, ou seja, o caminhão 1 consome 46,34 litros de combustível e caminhão 2 consome 46,00 litros resultando num consumo médio de 2,05 para o caminhão 1 e 2,07 km/l para o caminhão 2 sobre os 95 km percorridos. No cenário coordenado, o caminhão 1 apresenta um consumo ligeiramente maior chegando a marca de 46,70 litros enquanto o caminhão 2 tem seu consumo reduzido a 42,86 litros. Logo, o consumo médio é dado por 2,03 km/l e 2,22 km/l para os caminhões 1 e 2, respectivamente. Portanto, devido à suavização do perfil de velocidade, o consumo total de combustível utilizando o problema de controle ótimo é ligeiramente menor do que o consumo total de combustível utilizando apenas o perfil de velocidade ajustado

Figura 58 – Manobra resultante da avaliação do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 3,0%.

Fonte: Autor.

proveniente do problema de otimização estática. A economia de combustível alcançada neste caso é 3,0%.

As curvas de consumo associadas ao seguimento dos perfis de velocidade provenientes do problema de controle ótimo, Figura 59, apresentam o mesmo aspecto geral das curvas de consumo associadas ao seguimento dos perfis de velocidade provenientes do problema de otimização estática, Figura 55. A redução de consumo do caminhão 1 e o aumento de consumo do caminhão 2 no início da manobra são novamente observados devido ao ajuste de velocidade necessário para a aproximação dos veículos. Em comboio, o caminhão seguidor passa a consumir significativamente menos combustível devido à redução do arrasto aerodinâmico. Por fim, no

Figura 59 – Consumo de combustível resultante da avaliação do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e a distância inicial de separação é $d_{i(1|2)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 3,0%.

Fonte: Autor.

início da fase de separação, o consumo do primeiro caminhão aumenta enquanto o consumo do segundo caminhão diminui devido às alterações de velocidade necessárias para que a separação do par seja realizada e as restrições de saída do trecho de coordenação sejam atendidas.

Um exemplo de coordenação com três caminhões é ilustrado na Figura 60 conforme cenário definido na Tabela 9. As distâncias iniciais de separação entre os caminhões são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km e as velocidades nominais são dadas por $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. Na

fase de aproximação, os caminhões 2 e 3 formam um comboio parcial enquanto o caminhão 1 se aproxima. Após a movimentação em comboio, o caminhão 3 abandona o grupo antecipadamente enquanto os caminhões 1 e 2 sustentam a formação até o desmanche completo mais adiante. Neste exemplo, os perfis de velocidade são adequadamente seguidos com exceção dos trechos de maior inclinação de pista nas posições 33 e 66 km do trecho de rodovia escolhido. Maiores detalhes sobre os perfis ótimos de velocidade de referência são discutidos na Seção 5.2.

Figura 60 – Manobra resultante da avaliação do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,4%.

Fonte: Autor.

Tabela 14 – Resumo da economia de combustível de acordo com o número de caminhões envolvidos e método de obtenção dos perfis de referência.

Caminhões	Método	Economia [%]
2	Otimização estática (Ajustado)	2,5
2	Controle ótimo	3,0
3	Otimização estática (Ajustado)	2,0
3	Controle ótimo	2,4

Fonte: Autor.

Figura 61 mostra o consumo de combustível para três caminhões. Os caminhões 1 e 2 apresentam uma redução do consumo de combustível no início da fase de aproximação devido às baixas velocidades de referência. O consumo aumenta quando os veículos entram na rampa de aceleração. O caso nominal apresenta o mesmo consumo ilustrado na Figura 57, ou seja, o consumo total de combustível do caminhão 1 neste trecho alcança 44,29 litros enquanto o consumo dos caminhões 2 e 3 alcança 43,90 litros. Portanto, o consumo médio é dado por 2,03 km/l, 2,05 km/l e 2,05 km/l para os caminhões 1, 2 e 3, respectivamente.

Considerando os perfis de velocidade provenientes do problema de controle ótimo, o caminhão 1 apresenta um aumento de consumo de combustível em relação ao seu consumo no caso nominal atingindo 45,31 litros ao longo dos 90 km. Em contrapartida, o consumo dos caminhões 2 e 3 é reduzido até 41,33 litros e 42,27 litros, respectivamente. Neste caso, o consumo médio é 1,99 km/l, 2,18 km/l e 2,13 km/l para os caminhões 1, 2 e 3, respectivamente. A redução do consumo de combustível alcançada é 2,4%.

A Tabela 14 resume os principais resultados da avaliação dos problemas de otimização estática e controle ótimo. A economia de combustível é apresentada de acordo com o número de caminhões e o método utilizado para obtenção dos perfis de referência dos controladores da dinâmica longitudinal.

Os resultados das avaliações dos problemas de coordenação mostram o grande potencial destas estratégias em promover manobras econômicas de caminhões em trechos de rodovias. Assumindo que, em rodovias com elevada densidade de tráfego, os caminhões candidatos aparecem com maior frequência, as distâncias iniciais de separação típicas são menores do que as adotadas nas simulações desta seção aumentando a eficiência esperada da coordenação. Além disso, contribuições recentes na área de comunicação veicular permitem uma maior proximidade dos veículos diminuindo ainda mais a resistência aerodinâmica e aumentando o potencial de economia de combustível através das estratégias de coordenação propostas nesta tese.

Figura 61 – Consumo de combustível resultante da avaliação do problema de controle ótimo para a coordenação de dois caminhões com velocidades nominais iguais, $v_{n(1)}=v_{n(2)}=v_{n(3)}=80$ km/h. O trecho considerado possui 100 km de comprimento e as distâncias iniciais de separação são $d_{i(1|2)}=d_{i(2|3)}=5$ km. A economia de combustível alcançada é 2,4%.

Fonte: Autor.

8 CONCLUSÕES

Esta tese apresenta uma estratégia ótima de coordenação de caminhões para a formação de comboios em rodovias utilizando um problema de otimização estática e um problema de controle ótimo para a obtenção dos perfis de velocidade de referência dos controladores da dinâmica longitudinal. Estes perfis de velocidade procuram minimizar o consumo de combustível total da movimentação e aumentar a densidade de tráfego na rodovia considerando a redução do arrasto aerodinâmico dos veículos seguidores.

O trabalho de K. Y. Liang, J. Mårtensson e K. H. Johansson (2016) é diretamente estendido com a generalização do problema de otimização estática para N caminhões e com a consideração da fase de separação dos veículos. Com este método, a velocidade dos caminhões é alterada na fase de aproximação para diminuir a distância entre os veículos até a formação do comboio. Após o encontro, o conjunto trafega com pequenas distâncias de separação promovendo uma redução do consumo de combustível aos veículos seguidores. Para atender às restrições impostas pelo itinerário de cada caminhão ao sair do trecho de coordenação, a velocidade de referência dos caminhões é novamente alterada e o comboio é desmanchado. A formulação de um problema de controle ótimo complementa a contribuição do método ao possibilitar a otimização dos perfis de velocidade de um maior número de caminhões simultaneamente incluindo a formação de comboios parciais de acordo com as principais considerações dos trabalhos de Zhang, Jenelius e Ma (2017) e Saeednia e Menendez (2017).

Devido a sua característica modular, a estratégia de coordenação proposta contorna as limitações impostas pelos trechos de baixa velocidade numa malha rodoviária. A implementação desta estratégia em diferentes trechos propícios para a formação de comboio é uma potencial solução para a redução do consumo de combustível e emissões do setor de transportes. Além disso, a privacidade do itinerário de cada caminhão envolvido na coordenação é preservada, pois cada caminhão deve apenas transmitir a sua posição, a interseção de saída e a velocidade desejada para uma central de processamento que retorna o perfil de velocidade de referência.

A análise de sensibilidade apresentada nesta tese contribui para a compreensão da comunidade sobre os principais aspectos da coordenação de caminhões dispersos numa rodovia. A relação de compromisso entre densidade de tráfego, viabilidade de coordenação e redução do consumo energético é evidenciada e analisada qualitativa e quantitativamente para diferentes cenários de coordenação e número de caminhões envolvidos.

Por fim, o ambiente de simulação desenvolvido com modelos validados e disponíveis na literatura permite a avaliação de estratégias de coordenação em diferentes cenários. Utilizando dados topográficos de um trecho da rodovia brasileira BR-116, este ambiente de simulação é capaz de apontar movimentações coordenadas mais econômicas do que o caso nominal em cenários com dois e três caminhões. Estes resultados são promissores devido à elevada distância inicial estudada. Na prática, em rodovias com alta densidade de tráfego e com uma maior taxa de penetração da tecnologia, as distâncias iniciais de separação tendem a ser menores aumentando o potencial de economia de combustível.

A movimentação de caminhões em comboio na malha rodoviária se configura como um vasto tema de estudos futuros com diversas oportunidades de contribuição nas três áreas que formam a base deste tema: consumo de combustível em comboios, manutenção da formação do comboio e coordenação de veículos. A seguir, as principais recomendações para trabalhos futuros são apresentadas e, ao final, as sugestões de trabalhos futuros que estendem diretamente esta tese são listadas.

Sobre o consumo de combustível em comboios, os benefícios decorrentes dos fenômenos aerodinâmicos presentes neste tipo de formação são evidentes e bem compreendidos. Entretanto, modelos matemáticos que descrevem a redução de consumo e a redução da força de arrasto aerodinâmico em função da distância de separação ainda exigem investigação e podem proporcionar informações relevantes para o desenvolvimento de estratégias de controle e coordenação, por exemplo, possibilitando a identificação da distância ótima de separação dos veículos em comboio. Além disso, trabalhos futuros nesta área devem considerar o desalinhamento lateral entre os caminhões, ventos laterais, desempenho do sistema de arrefecimento em comboios, efeito dos pacotes aerodinâmicos e análise de comboios heterogêneos com diferentes tipos de veículos, por exemplo, carros e caminhões.

A manutenção da formação do comboio é também uma área de estudo bem desenvolvida, entretanto, existem questões importantes ainda não inteiramente resolvidas. Os controladores da dinâmica longitudinal para a manutenção da formação do comboio devem ser aprimorados diante de perturbações, incertezas do modelo e falhas de comunicação. Com o objetivo de aprimorar estes controladores, estudos futuros devem desenvolver modelos mais realistas da dinâmica lateral e longitudinal considerando modelos de consumo e estratégias de troca de marcha. Diversos autores sugerem o estudo de novas metodologias sistemáticas para desenvolvimento de controladores seguros capazes de garantir a estabilidade da cadeia de forma probabilística. Comboios heterogêneos em que diferentes controladores, topologias de comu-

nicação e limitações de frenagem e aceleração estão presentes devem ser estudados. Portanto, controle robusto se coloca como uma das principais teorias de controle a serem exploradas em trabalhos futuros. Por fim, validação experimental dos atuais trabalhos teóricos é necessária.

Como discutido na revisão bibliográfica, os estudos sobre estratégias de coordenação focam em rampas de acesso e manobras de aproximação de veículos, isto é, os estudos envolvendo o desmanche do comboio foram menos explorados na literatura e são tópicos relevantes para investigação futura. A extensão dos métodos existentes deve considerar diferentes origens, destinos, restrições de tempo, topografia e condições de tráfego. Além disso, estas estratégias de coordenação precisam ser desenvolvidas e aplicadas em larga escala, portanto, pesquisadores devem focar também nos impactos da formação do comboio sobre o consumo e sobre o tráfego na malha rodoviária. Para aumentar o apelo das estratégias de coordenação, é preciso desenvolver um sistema colaborativo capaz de coordenar caminhões de diferentes fabricantes e donos de frota. Um dos principais desafios atuais consiste na elaboração de uma metodologia para distribuir de forma justa os benefícios da formação do comboio entre todos os participantes, uma vez que a redução do arrasto aerodinâmico se apresenta de forma desigual para cada caminhão dependendo de sua posição ao longo do comboio. Por fim, dados de transporte e tráfego devem ser adquiridos para ajudar a melhorar e validar as estruturas de coordenação.

Com acesso a dados de tráfego em rodovias, os resultados de consumo obtidos nesta tese podem ser usados como heurísticas em estudos de verificação do potencial de economia através da formação de comboios na malha rodoviária. Além disso, controladores do tipo CACC ainda não estão disponíveis na maior parte dos caminhões, portanto, os estudos sobre o potencial de economia devem considerar a taxa de penetração deste tipo de tecnologia na frota de veículos.

De maneira geral, benefícios adicionais podem ser obtidos se os dados topográficos forem considerados diretamente nos problemas de coordenação. Desta forma, os perfis ótimos de velocidade podem promover a redução do consumo de combustível, inclusive, em cenários sem a formação de comboios, ou seja, o problema de coordenação ajusta o perfil de velocidade dos veículos de acordo com a topografia da rodovia acelerando e freando o veículo eficientemente.

Outra oportunidade de pesquisa visa identificar os trechos propícios para a formação de comboio e o método adequado para a coordenação numa dada rodovia. Por exemplo, em trechos com baixas inclinações de pista e alta média de velocidade, a formação de comboio é indicada, porém, em trechos montanhosos e com baixa média de velocidade, o efeito aerodinâmico é menos relevante e a formação de comboio deixa de ser atraente. Neste caso, a otimização do perfil de velocidade considerando dados topográficos pode ser uma solução para redução do

consumo. Além disso, a verificação da disponibilidade do sinal de GPS, cobertura de redes móveis e demanda computacional complementam os estudos de viabilidade da implementação num determinado trecho de rodovia.

As estratégias propostas nesta tese devem ser estendidas considerando a coordenação de ônibus rodoviários interestaduais. Neste caso, os itinerários são públicos e as restrições de horários são diferentes daquelas que se impõem sobre os caminhões. Essas particularidades podem ser absorvidas na formulação dos problemas de otimização estática e controle ótimo para aumentar a eficiência da movimentação.

A transição entre as fases de coordenação (aproximação, comboio e separação) envolve o chaveamento dos controladores de velocidade e distância de separação. Na literatura, as soluções se restringem tipicamente aos critérios de segurança dos controladores ACC, entretanto, no contexto da formação de comboios, este chaveamento deve ser realizado considerando também o consumo energético durante cada transição de fase.

As estratégias de coordenação devem considerar características e condições de operação mais realistas. Em geral, os veículos pesados não são capazes de sustentar uma velocidade de referência elevada ao percorrer uma rodovia com inclinação de pista positiva. Isto pode implicar atraso ou inviabilidade do encontro dos veículos comprometendo a economia de combustível esperada. Portanto, mecanismos de compensação da saturação do trem de potência e de ajuste contínuo do perfil ótimo de velocidade precisam ser desenvolvidos. Por fim, o ambiente de simulação para a avaliação das estratégias de coordenação deve ser aperfeiçoado para estimar com maior precisão a redução energética esperada.

Resumindo, as sugestões de trabalhos futuros que estendem diretamente esta tese são:

- a) verificação do potencial de economia numa malha rodoviária com dados de tráfego;
- b) obtenção da taxa de penetração de controladores do tipo CACC necessária para a viabilização de um cenário econômico na malha rodoviária considerada.
- c) incorporação dos dados topográficos da rodovia nos problemas de otimização estática e controle ótimo para obtenção dos perfis ótimos de velocidade;
- d) desenvolvimento de metodologias para qualificação das rodovias e identificação de trechos propícios para formação de comboios e otimização do perfil de velocidade;
- e) adaptação dos problemas de otimização estática e controle ótimo para a coordenação de ônibus rodoviários interestaduais.

- f) desenvolvimento de estratégias de chaveamento entre os controladores de velocidade e distância durante a aproximação dos veículos e formação do comboio;
- g) desenvolvimento de mecanismos para compensar os desvios da movimentação desejada provocados pela saturação do trem de potência.
- h) aperfeiçoamento do ambiente de simulação com modelos mais realistas para avaliação de estratégias de coordenação;

REFERÊNCIAS

- 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**, v. 24, p. 33–41, 2014.
- AN, Feng; BARTH, Matthew; NORBECK, Joseph; ROSS, Marc. Development of Comprehensive Modal Emissions Model: Operating Under Hot-Stabilized Conditions. **Transportation Research Record**, v. 1587, n. 1, p. 52–62, 1997.
- BECHLIOULIS, Charalampos P.; ROVITHAKIS, George A. A low complexity global approximation free control scheme with prescribed performance for unknown pure feedback systems. **Automatica**, v. 50, n. 4, p. 1217–1226, 2014.
- BENGLER, Klaus; DIETMAYER, Klaus; FARBER, Berthold; MAURER, Markus; STILLER, Christoph; WINNER, Hermann. Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 6, n. 4, p. 6–22, 2014.
- BHOOPALAM, Anirudh Kishore; AGATZ, Niels; ZUIDWIJK, Rob. Planning of truck platoons: A literature review and directions for future research. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 107, p. 212–228, jan. 2018.
- BISHOP, Richard; BEVLY, David; HUMPHREYS, Luke; BOYD, Stephen; MURRAY, Daniel. Evaluation and testing of driver-assistive truck platooning: phase 2 final results. **Journal of the Transportation Research Board**, n. 2615, p. 11–18, 2017.
- BJORNBERG, A. Autonomous intelligent cruise control. In: IEEE Vehicular Technology Conference (VTC). Stockholm, Sweden: IEEE, jun. 1994. v. 1, p. 429–433.
- BONNANS, Frédéric; GIORGI, Pierre Martinon Daphné; GRÉLARD, Vincent; MAINDRAULT, Stéphan; TISSOT, Olivier; LIU, Jinyan. **BOCOP 2.1.0 - User Guide**. [S.l.], 2017.
- BONNET, Christophe; FRITZ, Hans. Fuel Consumption Reduction in a Platoon: Experimental Results with two Electronically Coupled Trucks at Close Spacing. In: SAE Technical Paper. [S.l.]: SAE International, ago. 2000.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas**, Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. V. 3, 2016.
- BROWAND, Fred; MCARTHUR, John; RADOVICH, Charles. **Fuel saving achieved in the field test of two tandem trucks**. [S.l.], 2004. Disponível em: <<https://escholarship.org/uc/item/29v570mm>>.

CARVALHO, Ashwin; LEFÉVRE, Stéphanie; SCHILDBACH, Georg; KONG, Jason; BORRELLI, Francesco. Automated driving: The role of forecasts and uncertainty - A control perspective. **European Journal of Control**, v. 24, p. 14–32, jul. 2015.

CHAN, Eric. SARTRE Automated Platooning Vehicles. In: TOWARDS INNOVATIVE FREIGHT AND LOGISTICS. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. cap. 10, p. 137–150.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Boletim estatístico**. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>.

DAVILA, Arturo. **Report on fuel consumption**. [S.l.], 2013. Disponível em: <http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/SARTRE_4_003_PU.pdf>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Frota nacional**. [S.l.: s.n.], out. 2016. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/261-frota-2016>>.

DEY, K. C.; YAN, L.; WANG, X.; WANG, Y.; SHEN, H.; CHOWDHURY, M.; YU, L.; QIU, C.; SOUNDARARAJ, V. A Review of Communication, Driver Characteristics, and Controls Aspects of Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC). **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 2, p. 491–509, fev. 2016.

DI BERNARDO, M.; SALVI, A.; SANTINI, S. Distributed Consensus Strategy for Platooning of Vehicles in the Presence of Time-Varying Heterogeneous Communication Delays. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n. 1, p. 102–112, fev. 2015.

DIAB, Hilal. **Experimental Validation and Mathematical Analysis of Cooperative Vehicles in a Platoon**. 2015. Diss. (Mestrado) – RWTH Aachen University.

DUNBAR, W. B.; CAVENEY, D. S. Distributed Receding Horizon Control of Vehicle Platoons: Stability and String Stability. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 57, n. 3, p. 620–633, mar. 2012.

EDENHOFER, Ottmar et al. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, USA: Cambridge University Press, 2014.

EILERS, S.; MÅRTENSSON, J.; PETTERSSON, H.; PILLADO, M.; GALLEGOS, D.; TOBAR, M.; JOHANSSON, K. H.; MA, X.; FRIEDRICHS, T.; BOROJENI, S. S.; ADOLFSON, M. COMPANION – Towards Co-operative Platoon Management of Heavy-Duty Vehicles. In: IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 18. Las Palmas de Gran Canaria, Spain: IEEE, set. 2015. p. 1267–1273.

ELLIS, Matthew; GARGOLOFF, Joaquin Ivan; SENGUPTA, Raja. Aerodynamic Drag and Engine Cooling Effects on Class 8 Trucks in Platooning Configurations. **SAE International Journal of Commercial Vehicles**, SAE International, v. 8, p. 732–739, set. 2015.

FANCHER, P.; BAREKET, Z. Evaluating Headway Control Using Range Versus Range-Rate Relationships. **Vehicle System Dynamics**, v. 23, n. 1, p. 575–596, jan. 1994.

FAROKHI, Farhad; SHAMES, Iman; JOHANSSON, Karl H. Private and Secure Coordination of Match-Making for Heavy-Duty Vehicle Platooning. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 7345–7350, 2017.

FRITZ, H.; GERN, A.; SCHIEMENZ, H.; BONNET, C. CHAUFFEUR Assistant: a driver assistance system for commercial vehicles based on fusion of advanced ACC and lane keeping. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Parma, Italy: IEEE, jun. 2004. p. 495–500.

GAO, F.; LI, S. E.; ZHENG, Y.; KUM, D. Robust control of heterogeneous vehicular platoon with uncertain dynamics and communication delay. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 10, n. 7, p. 503–513, 2016.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale: SAE International, 1992.

GOLI, Mohammad; ESKANDARIAN, Azim. A Systematic Multi-Vehicle Platooning and Platoon Merging: Strategy, Control, and Trajectory Generation. In: DYNAMIC SYSTEMS AND CONTROL CONFERENCE. San Antonio, Texas, USA: ASME, 2014.

HALLÉ, Simon; CHAIB-DRAA, Brahim. Collaborative Driving System Using Teamwork for Platoon Formations. In: _____. **Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation**. Basel: Birkhäuser Basel, 2005. p. 133–151.

HASPALAMUTGIL, K.; ADALI, E. Adaptive switching method for Adaptive Cruise Control. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM THEORY, CONTROL AND COMPUTING (ICSTCC), 21. Sinaia, Romania: IEEE, out. 2017. p. 140–145.

HERMAN, I.; MARTINEC, D.; HURÁK, Z.; ŠEBEK, M. Nonzero Bound on Fiedler Eigenvalue Causes Exponential Growth of H-Infinity Norm of Vehicular Platoon. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 60, n. 8, p. 2248–2253, ago. 2015.

HUCHO, Wolf Heinrich; AHMED, Syed R. **Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering**. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1998.

KHAN, M. A.; BOLONI, L. Convoy driving through ad-hoc coalition formation. In: IEEE Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 11. San Francisco, CA, USA: IEEE, mar. 2005. p. 98–105.

KIENCKE, U. A view of automotive control systems. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 8, n. 4, p. 11–19, ago. 1988.

KUNZE, Ralph; HABERSTROH, Max; RAMAKERS, Richard; HENNING, Klaus; JESCHKE, Sabina. Automated Truck Platoons on Motorways – A Contribution to the Safety on Roads. In: AUTOMATION, COMMUNICATION AND CYBERNETICS IN SCIENCE AND ENGINEERING 2009/2010. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, 2011. p. 415–426.

KUSTOSCH, Mario. **Method and device for controlling the traveling speed of a vehicle**. Abr. 2007. US 7,200,480 B2.

KWON, J. W.; CHWA, D. Adaptive Bidirectional Platoon Control Using a Coupled Sliding Mode Control Method. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 15, n. 5, p. 2040–2048, out. 2014.

LAMMERT, Michael P.; DURAN, Adam; DIEZ, Jeremy; BURTON, Kevin; NICHOLSON, Alex. Effect of Platooning on Fuel Consumption of Class 8 Vehicles Over a Range of Speeds, Following Distances, and Mass. **SAE International Journal of Commercial Vehicles**, v. 7, p. 626–639, set. 2014.

LARSON, J.; LIANG, K. Y.; JOHANSSON, K. H. A Distributed Framework for Coordinated Heavy-Duty Vehicle Platooning. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n. 1, p. 419–429, fev. 2015.

LI, S. E.; ZHENG, Y.; LI, K.; WANG, L. Y.; ZHANG, H. Platoon Control of Connected Vehicles from a Networked Control Perspective: Literature Review, Component Modeling, and Controller Synthesis. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, n. 99, p. 1–1, 2017.

LIANG, K. Y.; DENG, Q.; MARTENSSON, J.; MA, X.; JOHANSSON, K. H. The influence of traffic on heavy-duty vehicle platoon formation. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 4. Seoul, South Korea: IEEE, jun. 2015. p. 150–155.

LIANG, K. Y.; MÅRTENSSON, J.; JOHANSSON, K. H. Fuel-saving potentials of platooning evaluated through sparse heavy-duty vehicle position data. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 4. Dearborn, MI, USA: IEEE, jun. 2014. p. 1061–1068.

_____. Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation for Fuel Efficiency. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 4, p. 1051–1061, abr. 2016.

LIANG, Kuo-Yun. **Fuel-Efficient Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation**. 2016. Tese (Doutorado) – KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY.

LIANG, Kuo-Yun; HOEF, Sebastian van de; TERELIUS, Håkan; TURRI, Valerio; BESSELINK, Bart; MÅRTENSSON, Jonas; JOHANSSON, Karl H. Networked control challenges in collaborative road freight transport. **European Journal of Control**, v. 30, Supl. C, p. 2–14, 2016.

LIANG, Kuo-Yun; MÅRTENSSON, Jonas; JOHANSSON, Karl Henrik. When is it Fuel Efficient for a Heavy Duty Vehicle to Catch Up With a Platoon? In: IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, 7. Tokyo, Japan: Elsevier, 2013. v. 46, p. 738–743.

LIN, F.; FARDAD, M.; JOVANOVIĆ, M. R. Optimal Control of Vehicular Formations With Nearest Neighbor Interactions. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 57, n. 9, p. 2203–2218, set. 2012.

LU, Xiao-Yun; SHLADOVER, Steven E. Automated Truck Platoon Control and Field Test. In: ROAD VEHICLE AUTOMATION. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 247–261.

MARZBANRAD, Javad; MOGHADDAM, Iman Tahbaz-zadeh. Self-tuning control algorithm design for vehicle adaptive cruise control system through real-time estimation of vehicle parameters and road grade. **Vehicle System Dynamics**, v. 54, n. 9, p. 1291–1316, 2016.

MAYR, R. Intelligent cruise control for vehicles based on feedback linearization. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE. Baltimore, MD, USA: IEEE, jun. 1994. v. 1, 16–20 vol.1.

MEISEN, Philipp; SEIDL, Thomas; HENNING, Klaus. A Data-Mining Technique for the Planning and Organization of Truck Platoons. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEAVY VEHICLES. Paris, France: [s.n.], 2008. v. 10, p. 389–402.

MENDES, André de Souza; ACKERMANN, Marko; LEONARDI, Fabrizio; FLEURY, Agenor de Toledo. Heavy-duty truck platooning: A review. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM), 24. Curitiba, PR, Brazil: ABCM, 2017.

MENDES, André de Souza; LEONARDI, Fabrizio; FLEURY, Agenor de Toledo. Optimal formation and dissolution of two-truck platoons on a highway and stretch. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DYNAMIC PROBLEMS OF MECHANICS (DINAME), 18. Buzios, RJ, Brazil: ABCM, 2019.

MIHELIC, Rick; SMITH, Jeff; ELLIS, Matthew. Aerodynamic Comparison of Tractor-Trailer Platooning and A-Train Configuration. **SAE International Journal of Commercial Vehicles**, v. 8, p. 740–746, set. 2015.

MILANÉS, V.; GODOY, J.; VILLAGRA, J.; PEREZ, J. Automated On-Ramp Merging System for Congested Traffic Situations. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 2, p. 500–508, jun. 2011.

MILANÉS, V.; SHLADOVER, S. E.; SPRING, J.; NOWAKOWSKI, C.; KAWAZOE, H.; NAKAMURA, M. Cooperative Adaptive Cruise Control in Real Traffic Situations. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 15, n. 1, p. 296–305, fev. 2014.

MOON, Seungwuk; YI, Kyongsu. Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm. **Vehicle System Dynamics**, v. 46, n. 8, p. 661–690, 2008.

MOSER, D.; SCHMIED, R.; WASCHL, H.; RE, L. del. Flexible Spacing Adaptive Cruise Control Using Stochastic Model Predictive Control. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, n. 99, p. 1–14, 2017.

NAUS, G.J.L.; PLOEG, J.; MOLENGRAFT, M.J.G. Van de; HEEMELS, W.P.M.H.; STEINBUCH, M. Design and implementation of parameterized adaptive cruise control: An explicit model predictive control approach. **Control Engineering Practice**, v. 18, n. 8, p. 882–892, 2010.

NORRBY, David. **A CFD Study Of The Aerodynamic Effects Of**. 2014. Tese (Doutorado) – Royal Institute of Technology KTH.

NUSZKOWSKI, John; SMITH, Harlan; MCKINNEY, Michael; MCMAHAN, Nicholas; WILDER, Benjamin; BOEHRINGER, Eric; CLARKSON, Blair; LITTLETON, Cutler; PARKER, Kyle. Increasing the on-road fuel economy by trailing at a safe distance. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 231, n. 9, p. 1303–1311, 2017.

PETERS, Andrés A.; MIDDLETON, Richard H.; MASON, Oliver. Leader tracking in homogeneous vehicle platoons with broadcast delays. **Automatica**, v. 50, n. 1, p. 64–74, 2014.

PIPES, Louis A. An Operational Analysis of Traffic Dynamics. **Journal of Applied Physics**, v. 24, n. 3, p. 274–281, mar. 1953.

PLOEG, J.; SHUKLA, D. P.; WOUW, N. van de; NIJMEIJER, H. Controller Synthesis for String Stability of Vehicle Platoons. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 15, n. 2, p. 854–865, abr. 2014.

RAJAMANI, Rajesh. Adaptive Cruise Control. In: **ENCYCLOPEDIA OF SYSTEMS AND CONTROL**. London, UK: Springer London, 2015. p. 13–19.

_____. **Vehicle Dynamics and Control**. [S.l.]: Springer, 2012.

RAKHA, Hesham; LUCIC, Ivana; DEMARCHI, Sergio Henrique; SETTI, José Reynaldo; VAN AERDE, Michel. Vehicle Dynamics Model for Predicting Maximum Truck Acceleration Levels. **Journal of Transportation Engineering**, v. 127, n. 5, p. 418–425, 2001.

RIOS-TORRES, J.; MALIKOPOULOS, A. A. A Survey on the Coordination of Connected and Automated Vehicles at Intersections and Merging at Highway On-Ramps. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 18, n. 5, p. 1066–1077, mai. 2017.

_____. Automated and Cooperative Vehicle Merging at Highway On-Ramps. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 18, n. 4, p. 780–789, abr. 2017.

SAEEDNIA, M.; MENENDEZ, M. A Consensus-Based Algorithm for Truck Platooning. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 18, n. 2, p. 404–415, fev. 2017.

_____. A Decision Support System for real-time platooning of trucks. In: **IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, 19. Rio de Janeiro, RJ, Brazil: IEEE, nov. 2016. p. 1792–1797.

SALVI, Alessandro; SANTINI, Stefania; VALENTE, Antonio Saverio. Design, analysis and performance evaluation of a third order distributed protocol for platooning in the presence of time-varying delays and switching topologies. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 80, p. 360–383, 2017.

SARVI, Majid; KUWAHARA, Masao; CEDER, Avishai. Freeway Ramp Merging Phenomena in Congested Traffic Using Simulation Combined with a Driving Simulator. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 19, n. 5, p. 351–363, 2004.

SCANIA PRESS RELEASE. **Scania takes lead with full-scale autonomous truck platoon.** [S.l.: s.n.], jan. 2016. Disponível em: <<https://www.scania.com/group/en/scania-takes-lead-with-full-scale-autonomous-truck-platoon/>>.

SCHOETTLE, Brandon; SIVAK, Michael. **A survey of public opinion about autonomous and self-driving vehicles in the US, the UK, and Australia.** Michigan, USA, 2014.

SEILER, P.; PANT, A.; HEDRICK, K. Disturbance propagation in vehicle strings. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 49, n. 10, p. 1835–1842, out. 2004.

SHIN, Kwang-Keun. **Method for integrating multiple feature adaptive cruise control.** Jan. 2010. US 2010/0198450 A1.

SHLADOVER, S. E. PATH at 20 - History and Major Milestones. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 8, n. 4, p. 584–592, dez. 2007.

STANKOVIC, S. S.; STANOJEVIC, M. J.; SILJAK, D. D. Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 8, n. 5, p. 816–832, set. 2000.

SWAROOP, D.; HEDRICK, J.K.; CHIEN, C. C.; IOANNOU, P. A Comparision of Spacing and Headway Control Laws for Automatically Controlled Vehicles1. **Vehicle System Dynamics**, v. 23, n. 1, p. 597–625, 1994.

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

TSUGAWA, S. Results and issues of an automated truck platoon within the energy ITS project. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. Dearborn, MI, USA: [s.n.], jun. 2014. p. 642–647.

TSUGAWA, S.; JESCHKE, S.; SHLADOVER, S. E. A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, v. 1, n. 1, p. 68–77, mar. 2016.

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, jan. 2017.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Inventory of U.S. Greenhouse and Gas Emissions and Sinks: 1990–2014.** [S.l.], 2016.

_____. **Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) 2010.** [S.l.], 2010.

VAN AREM, B.; DRIEL, C. J. G. Van; VISSER, R. The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 7, n. 4, p. 429–436, dez. 2006.

VEGENDLA, Prasad; SOFU, Tanju; SAHA, Rohit; KUMAR, Mahesh Madurai; HWANG, Long-Kung. Investigation of Aerodynamic Influence on Truck Platooning. In: SAE Technical Paper. [S.l.]: SAE International, set. 2015.

VERGINIS, C. K.; BECHLIOULIS, C. P.; DIMAROGONAS, D. V.; KYRIAKOPOULOS, K. J. Robust Distributed Control Protocols for Large Vehicular Platoons With Prescribed Transient and Steady-State Performance. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, PP, n. 99, p. 1–6, 2017.

WANG, Jinghui; RAKHA, Hesham A. Fuel consumption model for heavy duty diesel trucks: Model development and testing. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 55, p. 127–141, ago. 2017.

WRIGHT, Stephen J. **Primal-dual interior-point methods**. [S.l.]: Siam, 1997.

XIA, Q.; GAO, F.; DUAN, J.; HE, Y. Decoupled H_∞ control of automated vehicular platoons with complex interaction topologies. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 11, n. 2, p. 92–101, 2017.

XIAO, Lingyun; GAO, Feng. A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems. **Vehicle System Dynamics**, v. 48, n. 10, p. 1167–1192, out. 2010.

_____. Practical String Stability of Platoon of Adaptive Cruise Control Vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 4, p. 1184–1194, dez. 2011.

YI, K; LEE, S; KWON, Y D. An investigation of intelligent cruise control laws for passenger vehicles. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 215, n. 2, p. 159–169, 2001.

YUE, Wei; GUO, Ge; WANG, Liyuan; WANG, Wei; YUE, Wei. Nonlinear platoon control of Arduino cars with range-limited sensors. **International Journal of Control**, v. 88, n. 5, p. 1037–1050, 2015.

ZHANG, L.; SUN, J.; OROSZ, G. Hierarchical Design of Connected Cruise Control in the Presence of Information Delays and Uncertain Vehicle Dynamics. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, n. 99, p. 1–12, 2017.

ZHANG, Wei; JENELIUS, Erik; MA, Xiaoliang. Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 98, Supl. C, p. 1–23, 2017.

ZHENG, Y.; LI, S. E.; LI, K.; BORRELLI, F.; HEDRICK, J. K. Distributed Model Predictive Control for Heterogeneous Vehicle Platoons Under Unidirectional Topologies. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 25, n. 3, p. 899–910, mai. 2017.

ZHENG, Y.; LI, S. E.; LI, K.; REN, W. Platooning of Connected Vehicles With Undirected Topologies: Robustness Analysis and Distributed H-infinity Controller Synthesis. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 19, n. 5, p. 1353–1364, mai. 2018.

ZHENG, Y.; LI, S. E.; LI, K.; WANG, L. Y. Stability Margin Improvement of Vehicular Platoon Considering Undirected Topology and Asymmetric Control. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 24, n. 4, p. 1253–1265, jul. 2016.

ZHENG, Y.; LI, S. Eben; WANG, J.; CAO, D.; LI, K. Stability and Scalability of Homogeneous Vehicular Platoon: Study on the Influence of Information Flow Topologies. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 1, p. 14–26, jan. 2016.

ZHOU, Jing; PENG, Hui. Range policy of adaptive cruise control vehicles for improved flow stability and string stability. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 6, n. 2, p. 229–237, jun. 2005.

APÊNDICE A – ATIVIDADES DO AUTOR

Neste apêndice, as principais atividades de pesquisa do autor desta tese ao longo do doutorado são listadas.

A.1 Publicações

A lista de publicações realizadas ao longo do doutorado segue abaixo.

- a) MENDES, A. S.; ACKERMANN, M.; LEONARDI, F.; FLEURY, A. T. Yaw stability analysis of articulated vehicles using phase trajectory method In: XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, 2017, São Sebastião. Proceedings of the XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics. , 2017. (Publicado)
- b) MENDES, A. S.; FLEURY, A. T.; ACKERMANN, M.; LEONARDI, F. Heavy-duty Truck Platooning: A Review In: 24 th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017, Curitiba. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017. (Publicado)
- c) MENDES, A. S.; ACKERMANN, M.; LEONARDI, F.; FLEURY, A. T. Yaw Stability Analysis of Articulated Vehicles Using Phase Trajectory Method In: Proceedings of DINAME 2017: Selected Papers of the XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics.1 ed.: Springer International Publishing AG, 2018. (Publicado)
- d) MENDES, A. S.; FLEURY, A. T.; ACKERMANN, M.; LEONARDI, F.; BORTOLUSSI, R. Assessing the influence of the road-tire friction coefficient on the yaw and roll stability of articulated vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2018. (Publicado)
- e) MENDES, A. S.; ACKERMANN, M.; LEONARDI, F.; FLEURY, A. T. Optimal formation and dissolution of two-truck platoons on a highway stretch In: XVIII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, 2019, Búzios. Proceedings of the XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics. 2019. (Publicado)
- f) MENDES, A. S.; MANGABEIRA, B. A. C.; LEONARDI, F.; FLEURY, A. T. Development of an educational platform for vehicle-following control demonstration In: 25th International Congress of Mechanical Engineering COBEM 2019,

2019, Uberlândia. 25th International Congress of Mechanical Engineering COBEM 2019. 2019.

- g) NANNI, B.; MENDES, A. S.; PEREIRA, M.; LEONARDI, F. Análise comparativa das abordagens quase-estática e dinâmica na otimização dos perfis de velocidade de veículos pesados In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial, 2019, Campo Grande. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial. 2019.
- h) MENDES, A. S.; LEONARDI, F.; FLEURY, A. T. Optimal coordination strategy to form and dissolve truck platoons on a highway stretch, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (A ser submetido)

A.2 Orientações

A lista de orientações realizadas ao longo do doutorado segue abaixo.

- a) Bianca Antonia Costa Mangabeira. Controle de carros automatizados para movimentação em comboio utilizando protótipo em escala com Arduino. 2019. Iniciação científica (Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros (Coorientação concluída)
- b) Celso Amorim Bueno de Oliveira. Verificação do potencial de economia de energia no setor de transporte rodoviário brasileiro através da formação de comboios de caminhões. 2019. Iniciação científica (Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros (Orientação concluída)
- c) Felipe Ciarini. Carros automatizados e cidades conectadas em escala para aplicações didáticas e de pesquisa multidisciplinar: Projeto de controlador veicular e verificação de segurança. Em andamento. Iniciação científica (Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros (Orientação em andamento)