

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
FLÁVIO JOSÉ BENTO BATISTA

**CONTROLE PREDITIVO APLICADO À FASE DE APROXIMAÇÃO NA
FORMAÇÃO DE COMBOIOS VEICULARES**

São Bernardo do Campo

2022

FLÁVIO JOSÉ BENTO BATISTA

**CONTROLE PREDITIVO APLICADO À FASE DE APROXIMAÇÃO NA
FORMAÇÃO DE COMBOIOS VEICULARES**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Centro
Universitário FEI para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica. Orientado
pelo Prof. Dr. Fabrizio Leonardi.

São Bernardo do Campo

2022

Batista, Flávio José Bento.

CONTROLE PREDITIVO APLICADO À FASE DE
APROXIMAÇÃO NA FORMAÇÃO DE COMBOIOS VEICULARES /

Flávio José Bento Batista. São Bernardo do Campo, 2022.

137 p. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Fabrizio Leonardi.

1. Fase de Aproximação. 2. Estratégia de chaveamento de
controladores. 3. Formação de Comboio. 4. Controle de cruzeiro
adaptativo. 5. Controle preditivo baseado em modelo. I. Leonardi,
Fabrizio, orient. II. Título.

Aluno: Flávio José Bento Batista

Matrícula: 220116-8

Título do Trabalho: Controle preditivo aplicado à fase de aproximação na formação de comboios veiculares.

Área de Concentração: Sistemas Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Fabrizio Leonardi

Data da realização da defesa: 21/06/2022

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

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

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabrizio Leonardi	Ass.: _____
Prof. Dr. André de Souza Mendes	Ass.: _____
Prof. Dr. Flávio Augusto Barrella	Ass.: _____

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

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA
EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Dedico este trabalho, aos meus queridos e amados pais, que sempre me apoiaram de forma incondicional nos estudos, em especial ao meu querido pai, que descanse em paz.

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos meus Orixás, que sempre me trouxeram a luz, nos momentos de escuridão, força e resiliência, nos momentos difíceis.

A paciência e resiliência de minha querida esposa, Gabriela, em estar comigo nesta árdua e gratificante jornada.

As minhas amadas filhas, Malu e Luna, que mesmo sem compreender minhas ausências e meu temperamento ansioso, sempre conseguiram me dar apoio e carinho.

A toda minha família, com as cobranças de minha ausência e apoio para me manter nos trilhos. Especialmente à minha mãe, Dn. Daise Valente Bento Batista, e irmãos, Fábio e Fabíola, que apesar da perda do meu pai, Sr. José Batista Filho, conseguimos nos manter unidos e lúcidos, o que certamente me ajudou a continuar em minha pesquisa.

Ao meu orientador, Fabrizio Leonardi, pelos diversos direcionamentos dados, sempre disponível as minhas requisições, compreensivo e aos constantes auxílios prestados.

Ao meu grande amigo, meu pai nas salas de aula, Flávio Augusto Barrella, que sempre me incentivou e apoiou, para a realização deste Mestrado.

Ao amigo e revisor de texto oficial, Danilo Lima, que me auxiliou a aprimorar minha escrita, com muito tempo e paciência.

Ao colega e professor, André de Souza Mendes, por ceder os materiais de seu doutorado, pelas conversas, sugestões e orientações nesta empreitada.

Ao meu estimado e ciumento primo, um irmão mais novo que não tive, Diego Valente de Alencar Gomes, que muito me ajudou a “tocar” a vida e a família, nestes conturbados anos que decidi realizar meu mestrado. Sem sua ajuda, não teria chegado aonde cheguei.

A todos os Feianos, que direta ou indiretamente, me auxiliaram em algum ponto desta jornada.

A toda e qualquer pessoa, que tenha tido trocas de energias, experiências, ideias, informações, que tenha conhecido pessoalmente, virtualmente e, talvez, apenas o nome citado em minhas referências.

Muitíssimo Obrigado!

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre
os ombros de gigantes”

Isaac Newton

RESUMO

A automação veicular, possui diversos desenvolvimentos que compõe o chamado sistema avançado de assistência ao condutor, (ADAS - Advanced Driver Assistance System), e caminham para a direção autônoma. Um elemento crucial à evolução do ADAS, é o controle da dinâmica longitudinal veicular, realizada pelo sistema de controle de cruzeiro adaptativo (ACC - Adaptive Cruise Control), amplamente utilizado em veículos de passeio e comerciais, com intuito de aumentar a segurança, conforto e economia de combustível à viagem. Sua função é, manter determinada velocidade de cruzeiro e, na presença de veículo lento a frente, adaptar sua velocidade, controlando a distância entre os veículos e formar um comboio com segurança, evitando acidentes e erros de condução. Existem três momentos básicos com o ACC, velocidade de cruzeiro (controle de velocidade), comboio formado (controle de distância) e a fase de aproximação de formação de comboio, no qual ocorrem trocas entre estes controladores. A revisão da literatura indica, que esse gerenciamento de controladores pode ser feito de diversas formas, visando requisitos diversos. O presente trabalho, desenvolve um controlador preditivo baseado em modelo (MPC - Model Predictive Control) para um ACC, com requisitos de consumo de combustível, segurança e conforto em viagem, incluídos explicitamente na fase de projeto e não apenas constatados a posteriori, utilizando-se das propriedades do método de Controle Ótimo, intrínsecas ao MPC. Aplicando em sua formulação, as equações levantadas, referentes a consumo, segurança e conforto. Com atenção a fase de aproximação, o MPC proposto, foi simulado e analisado perante outros dois métodos com este foco, obtendo um bom desempenho em consumo, segurança e conforto, respeitando as restrições impostas em projeto e sem negligenciar um requisito em prol de outro. O controlador concebido, também foi posto à prova em outros cenários, com situações comuns de acontecer em uma rodovia. O algoritmo do MPC, foi refinado durante todas estas simulações, obtendo comportamento que satisfaz as restrições de projeto na maioria das situações impostas. No entanto, ocorreram eventos de instabilidades para a segurança do sistema veicular, por parte do algoritmo idealizado, expondo frentes de pesquisa para a continuidade deste trabalho. Por fim, os resultados apresentados pelo MPC projetado, foram alcançados, inserindo na fase de projeto os requisitos de consumo, segurança e conforto, obtendo boa performance, quando comparado as técnicas estudadas.

Palavras-chave: Fase de Aproximação. Estratégia de chaveamento de controladores.

Formação de Comboio. Controle de cruzeiro adaptativo. Controle ótimo. Controle preditivo baseado em modelo.

ABSTRACT

Vehicle automation has several developments that make up the so-called advanced driver assistance system (ADAS) and move towards autonomous driving. A crucial element in the evolution of ADAS is the control of vehicular longitudinal dynamics, performed by the adaptive cruise control system (ACC), widely used in passenger and commercial vehicles, in order to increase safety, comfort and fuel economy while traveling. Its function is to maintain a set cruising speed and, in the presence of a slow vehicle ahead, adapt its speed, controlling the distance between vehicles and safely forming a platoon, avoiding accidents, and driving errors. There are three basic moments with the ACC, cruise speed (speed control), formed platoon (distance control) and the platoon formation approaching phase, in which several switching occur between the controls. The literature review indicates that this controller management can be done in different ways, aiming at better consumption, speed in forming a convoy, safety, and comfort. The present work develops a model-based predictive controller (MPC) for an ACC, with fuel consumption, safety, and travel comfort requirements, explicitly included in the design phase and not only verified a posteriori, utilizing the properties of the Optimal Control method, intrinsic to the MPC. Applying in its formulation, the equations raised, referring to consumption, safety, and comfort. With attention to the approaching phase, the proposed MPC was simulated and analyzed before two other methods with this focus, obtaining a good performance in consumption, safety, and comfort, respecting the constraints imposed in the project and without neglecting one requirement in favor of another. The designed controller was also put on tests in other scenarios, with common situations that happen on the highway. The MPC algorithm was refined during all these simulations, obtaining behavior that satisfied the design constraints in most imposed situations. However, there were instability events for the safety of the vehicle system, on the part of the idealized algorithm, exposing research fronts for the continuity of this work. Finally, the results presented by the designed MPC were achieved, including in the design phase the requirements of consumption, safety, and comfort, obtaining good performance, when compared to the studied techniques.

Keywords: Approaching phase. Switching controller strategy. Platooning formation. Adaptive cruise control. Optimal control. Model predictive control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema ADAS.....	16
Figura 2 - Norma SAE J3016 – Níveis de automatização de direção veicular	17
Figura 3- Comboio formado por veículos pesados.....	18
Figura 4 – Cenários básicos de atuação de um ACC	19
Figura 5 - Fase de aproximação com veículos pesados	20
Figura 6 – Estrutura do controle em cascata	24
Figura 7 – Diagrama em blocos macro da arquitetura típica de sistema ACC	24
Figura 8 – Bloco de atuação da arquitetura típica de ACC.....	25
Figura 9 – Bloco de Processamento da arquitetura típica de ACC.....	26
Figura 10 - Veículos em comboio por tráfego intenso.....	27
Figura 11 – Cenários e variáveis, com a fase de formação de comboio veicular.....	41
Figura 12 – Forças atuantes em um veículo	42
Figura 13 – Fator de redução do arrasto aerodinâmico pela distância interveicular	44
Figura 14 - Diagrama em Blocos da dinâmica veicular no plano	44
Figura 15 – Dados experimentais de Potência por Consumo de veículo pesado	47
Figura 16 – Diagrama em blocos do ACC	48
Figura 17 – Plano $R - R$ (a) análise dos quadrantes, (b) diagrama genérico.....	50
Figura 18 – Diagramas $R-R'$ de (a) aproximação linear. (b) aproximação com desaceleração constante.....	53
Figura 19 – Conceito básico do MPC, no instante inicial k	61
Figura 20 – Conceito básico do MPC, no instante $k+1$	61
Figura 21 – Definição do período de amostragem para o MPC	62
Figura 22 – Definição do horizonte de predição para o MPC.....	62
Figura 23 – Influência da ação de controle na saída do sistema.....	63
Figura 24 – Definição do horizonte de controle para o MPC	63
Figura 25 - Modelo de predição.....	65
Figura 26 - Fluxograma base do ACC com MPC.....	66
Figura 27 - Passo a passo, K e $K+1$, do MPC na ocorrência de cálculos que não convergem ao ótimo	67
Figura 28 - Continuação do passo a passo, $K+2$ e $K+3$, do MPC na ocorrência de cálculos que não convergem ao ótimo	68
Figura 29 - Fluxograma do algoritmo do MPC realizado	70

Figura 30- Evento intermediário do Cenário 1	77
Figura 31 - Evento intermediário do Cenário 2	78
Figura 32 - Evento intermediário do Cenário 3	78
Figura 33- Evento intermediário do Cenário 4	79
Figura 34 - Evento intermediário do Cenário 5	79
Figura 35 – Gráficos Cenário 1 com técnica Linear - distância interveicular, velocidade aceleração e tranco ao longo do tempo e diagrama $R - R$	82
Figura 36 – Gráficos Cenário 1 com técnica Quadrática - distância interveicular, velocidade aceleração e tranco ao longo do tempo e diagrama $R - R$	83
Figura 37 – Gráficos Cenário 1 com o MPC com restrição adaptável (MPCa) para R_{des} - distância interveicular, velocidade, aceleração e tranco ao longo do tempo e diagrama $R - R$	84
Figura 38 – Gráficos Cenário 1 com o MPC sem a restrição adaptável (MPCh) para R_{des} - distância interveicular, velocidade, aceleração e tranco ao longo do tempo e diagrama $R - R$	85
Figura 39 – Simulação do Cenário 1	88
Figura 40 - Diagrama $R - R$ do Cenário 1	89
Figura 41 - Simulação do Cenário 2	90
Figura 42 - Diagrama $R - R$ do Cenário 2	91
Figura 43 - Simulação do Cenário 3	92
Figura 44 - Diagrama $R - R$ do Cenário 3	92
Figura 45 -Simulação do Cenário 4 sem restrição adaptável	94
Figura 46 - Simulação do Cenário 4 com restrição adaptável inicial.	95
Figura 47 - Simulação do Cenário 4 com restrição adaptável final.....	96
Figura 48 - Diagrama $R - R$ do Cenário 4 com restrição adaptável final	96
Figura 49 - Simulação do Cenário 5	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Detalhes dos controladores, técnicas e testes dos trabalhos estudados	37
Tabela 2 – Detalhes em relação ao foco e resultado dos trabalhos estudados	38
Tabela 3 – (continuação Tabela 2) Detalhes em relação ao foco e resultado dos trabalhos estudados	39
Tabela 4 – Coeficientes experimentais do modelo de consumo VT-CPFM	46
Tabela 5 - Parâmetros do Cenário de Aproximação	75
Tabela 6 - Condições iniciais para os Cenários 1, 2, 3, 4 e 5	76
Tabela 7 - Condições dos eventos dos Cenários 1, 2, 3, 4 e 5	77
Tabela 8 – Dados dos caminhões	80
Tabela 9 – Dados gerados em simulação do Cenário 1 para os diversos métodos estudados ..	86
Tabela 10 – Diferença percentual das abordagens Linear (Lin) e Quadrática (Quad) em relação ao MPC com restrição adaptável (MPCa) e sem restrição adaptável (MPCh)	87
Tabela 11 - Dados dos cenários simulados	98
Tabela 12 - Informações de execução do MPC nos cenários realizados	102
Tabela 13 - Avisos do SNOPT, significado e possível solução	103

LISTA DE ABREVIATURAS

ACC	Controle de cruzeiro adaptativo (Adptive Cruise Control)
ADAS	Sistema avançado de assistência ao condutor (Advanced Driver Assitance System)
ANFPC	Controle preditivo com Neuro-Fuzzy adaptativo (Adaptive NeuroFuzzy Predictive Control)
ANN	Redes neurais artificiais (Artificial Neural Network)
BGS	Basic Gain Scheduling
BTA	Basic Tangente Approximation
CA	Cenário de Aproximação
CACC	ACC cooperativo (Cooperative ACC)
CC	Controle de cruzeiro (Cruise Control)
CD	Distância constante (Constant Distance)
CMEM	Comprehensive Modal Emission Model
CTH	Tempo constante a frente (Constant Time Headway)
CW-MPC	Constant Weight MPC
FNN	Rede Neuro-Fuzzy (Fuzzy Neural Network)
GLA	Gears and Linear Approximation
GPS	Sistema de posicionamento global (Global Positioning System)
GS	Gain Scheduling
GSLQ	Gain Scheduling com LQ
GSPI	Gain Scheduling com PI
GTA	Gears and Tangente Approximation
LIDAR	Radar óptico (Light Detection And Ranging)
LLC	Controlador de nível baixo (Low Level Controller)
LP	Programação linear (Linear Programming)
LQ	Linear Quadrático
MLD	Mixed Logical Dynamical
MOVES	Motor Vehicle Emission Simulator
MPC	Controle preditivo baseado em modelo (Model Predictive Control)
NLP	Programação não linear (Nonlinear Programming)
NMPC	MPC não linear (Non-linear MPC)
PD	controlador Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral e Derivativo
PnG	Pulse and Glide
PWA	PieceWise Afine
QP	Programação Quadrática (Quadratic Programming)
RL	Aprendizado por reforço (Reinforcement Learning)
RW-MPC	Real-time Weighted MPC
SAC	Ator-crítico supervisionado (Supervised Actor-Critic)
SAE	Society of Automotive Engineers
SISO	Uma entrada e uma saída (Simple Input Simple Output)

SL	Aprendizado supervisionado (Supervised Learning)
SQP	Programação Quadrática Sequencial (Sequential Quadratic Programming)
SRL	Aprendizado por reforço supervisionado (Supervised Reinforcement Learning)
T-S	Takagi-Sugeno
ULC	Controlador de nível alto (Upper Level Controller)
V2I	Veículo para infraestrutura (Vehicle to Infrastructure)
V2V	Veículo para veículo (Vehicle to Vehicle)
VT-CPFM	Virginia Tech Comprehensive Power-based Fuel consumption Model

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1	CONTROLE DE CRUZEIRO - CC.....	22
2.2	ARQUITETURA DO ACC	23
2.3	DISTÂNCIA INTERVEICULAR	26
2.4	CONTROLADORES PARA O ACC	28
2.5	APROXIMAÇÃO E FORMAÇÃO DE COMBOIOS.....	33
2.6	TABELAS COMPARATIVAS	35
2.7	OBJETIVOS	40
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	DINÂMICA LONGITUDINAL	42
3.2	MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	45
3.3	ACC EM ESTUDO.....	47
3.4	DIAGRAMA DE DISTÂNCIA RELATIVA POR VELOCIDADE RELATIVA.....	49
3.5	ESTRATÉGIAS DE CHAVEAMENTO NO ULC	51
3.6	APROXIMAÇÃO LINEAR E QUADRÁTICA	53
3.7	SEGURANÇA E CONFORTO EM VIAGEM	55
3.8	MODEL PREDECTIVE CONTROL	57
3.9	IMPLEMENTAÇÃO DO MPC.....	64
3.9.1	Modelo de predição	64
3.9.2	Algoritmo	65
3.9.3	Formulação do Controle Ótimo	72
3.10	CENÁRIOS	74
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	80
4.1	CENÁRIO DE APROXIMAÇÃO	80
4.2	CENÁRIO 1.....	87
4.3	CENÁRIO 2.....	89
4.4	CENÁRIO 3.....	91
4.5	CENÁRIO 4.....	93
4.6	CENÁRIO 5.....	97
4.7	ANÁLISE GERAL DO SISTEMA.....	98
4.8	PONTOS SOBRE O ALGORITMO DO MPC	99

5	CONCLUSÕES	104
	REFERÊNCIAS.....	108
	APÊNDICE A – Códigos matlab desenvolvidos para o MPC e suas simulações nos cenários desenvolvidos.	115

1 INTRODUÇÃO

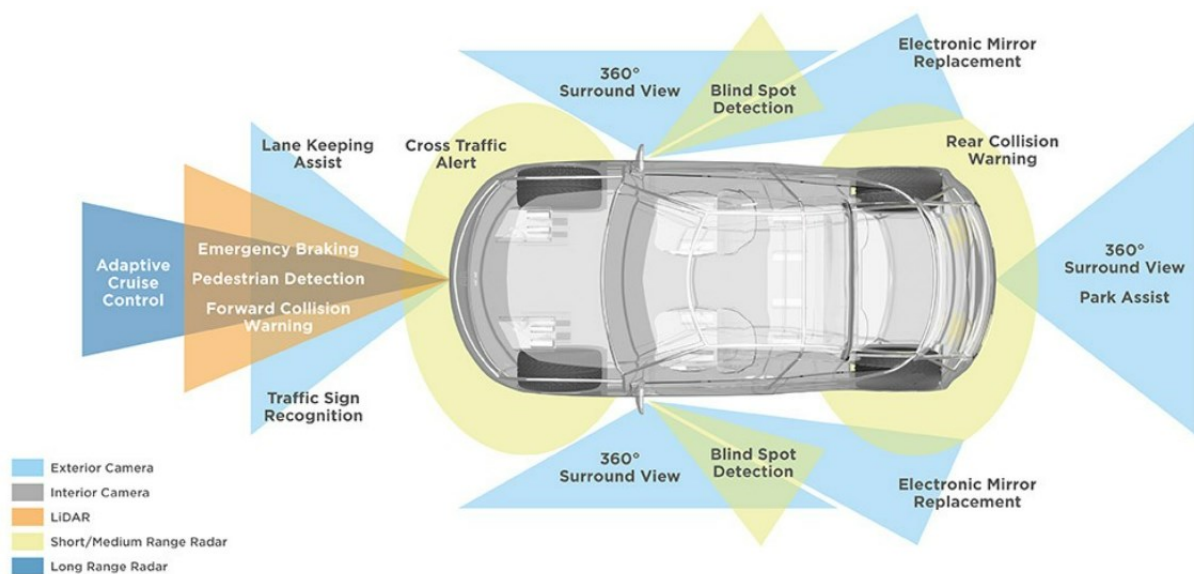
O crescente número de veículos nas vias trafegáveis, a disponibilidade da inteligência embarcada e os avanços das técnicas de controle, forneceram caminho à criação do sistema avançado de assistência ao condutor (ADAS - Advanced Driver Assistance System), contemplando uma série de ações e sistemas que auxiliam o motorista em seu trabalho, tornando-o mais seguro, confortável e simples (CHEN; YU; YAN, 2020), reduzindo erros do condutor, elevando a densidade de veículos nas vias e reduzindo consumo de combustível (XIAO; GAO, 2010). Os estudos recentes sobre ADAS (CHEN; YU; YAN, 2020; XIAO; GAO, 2010; LUU; LUPU, 2019), contemplam diversas frentes de estudo. Em relação ao ambiente em que o veículo está inserido, temos macrossistemas como a percepção do entorno do carro (BRUMMELEN et al., 2018), planejamento do caminho a percorrer (CHU; LEE; SUNWOO, 2012), uso de inteligência artificial para tomada de decisão autônoma (LU et al., 2020), comunicação entre os diversos elementos da via (veículos e infraestrutura), (GUERRERO-IBANEZ; ZEDADALLY; CONTRERAS-CASTILLO, 2015; ALADWAN et al., 2020), entre outros, como ilustra a Figura 1.

Estas frentes citadas, para serem concretizadas, necessitam do funcionamento de sistemas mais básicos com os sensores, atuadores e controles locais. Por isso, têm surgido novas formas de sensoriamento e atuação, como sistemas de visão e percepção com câmeras, radares, LIDAR (radar ótico), GPS (Global Positioning System), dentre outros (BRUMMELEN et al., 2018). Atuação e controle sobre o esterçamento de volante/rodas, para manejo de trajetória lateral e ação sobre a dinâmica longitudinal do automóvel, (acelerador e freio) (KATZOURAKIS et al., 2015). Tudo isto, objetivando a realização de veículos cada vez mais autônomos, seguros e confortáveis aos usuários (BRUMMELEN et al., 2018; KATO et al., 2015).

Uma aplicação muito estudada no sistema ADAS, é o controle de cruzeiro adaptativo (ACC - Adaptive Cruise Control), (XIAO; GAO, 2010), ele é responsável pelo controle longitudinal do veículo e é considerado uma função primordial para a realização ADAS (CHEN; YU; YAN, 2020). São definidos seis níveis de automatização veicular pelo documento SAE J3016 (2014) (Figura 2), no qual o nível “0” possui o veículo sem automação alguma (100% ação do condutor), e o nível “5” refere-se ao veículo totalmente autônomo, (nenhuma interação ou atenção humana). Há a separação entre dois grupos destes níveis. O primeiro grupo, do nível “0” a “2”, é o que necessita de atenção e interação humana para seu funcionamento. O segundo grupo, nível “3” a “5”, carece de intervenção humana apenas em

determinadas condições pontuais, sendo que no nível mais alto, não há necessidade interferência do condutor para tarefa de dirigir o carro (HIRZ; WALZEL, 2018). O ACC, ou parte dele, com o CC (Cruise Control), já se faz presente no nível “1” desta hierarquia, em que se inicia o controle longitudinal do veículo, como base para os demais níveis. Sendo este, o primeiro passo lógico para progressão do sistema (XIAO; GAO, 2010). Pode-se dizer que, sem o ACC, não é possível continuar evoluindo o ADAS aos demais patamares da SAE J3016.

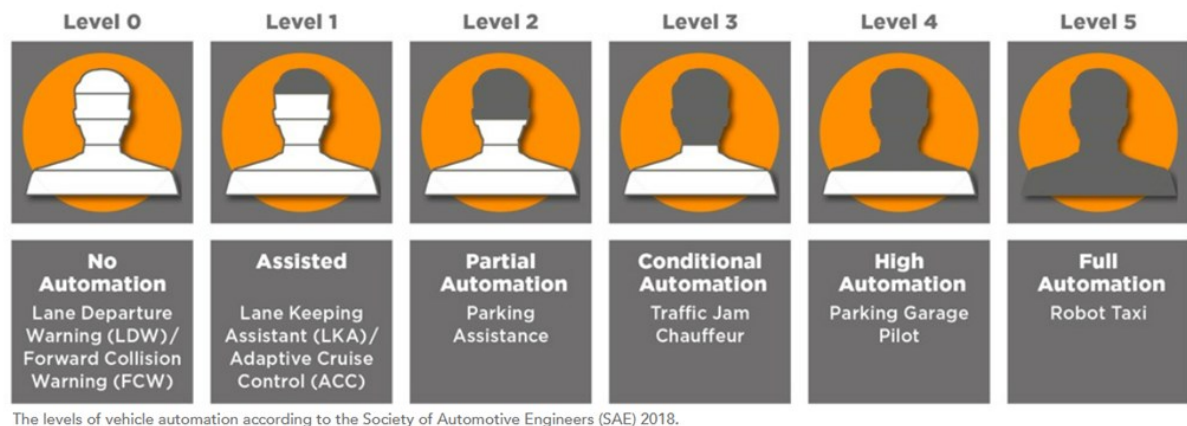
Figura 1 - Sistema ADAS



Fonte: Retirado de TE Conectivity (2021)

O ACC é a evolução do desenvolvimento do tradicional CC, no qual a função do controle de cruzeiro, é manter a velocidade constante do veículo a partir de um valor determinado pelo condutor, não importando o que ocorra na via trafegada. Como ilustrado na Figura 4, o controle de cruzeiro adaptativo, além de ter a função do CC, deve sensoriar veículos em sua frente e adaptar sua velocidade para segui-los (LUU; LUPU, 2019), formando um comboio e evitando qualquer tipo de acidente e estabelecendo segurança e conforto à viagem (MENDES et al., 2017). Portanto, o ACC é uma tecnologia assistiva, que auxilia o condutor no controle longitudinal do veículo, mantendo a velocidade desejada pelo condutor e evitando acidentes com possíveis veículos lentos à sua frente, tornando a viagem mais segura.

Figura 2 - Norma SAE J3016 – Níveis de automatização de direção veicular



Fonte: Retirado de TE Conectivity (2021).

Pode-se ter diferentes benefícios ao uso do ACC, para veículos de passeio e veículos comerciais. Em ambos os casos, como já citado, possui papel de controlar a velocidade veicular e a distância do elemento a frente, tornando a manobra segura e confiável. Para veículos de passeio, atua mantendo a velocidade desejada pelo condutor e manipula o sistema em condições de trânsito, trazendo segurança ao percurso (LUU; LUPU, 2019). Para veículos comerciais, seu benefício é a capacidade de formar e manter comboios veiculares com segurança, este sendo útil para frotas de caminhões. A formação de comboios (Figura 3) acarreta diminuição de arrasto aerodinâmico, consumindo menos combustível e insumos, gerando economia financeira e menor emissão de poluentes (NANNI, 2020). Outro benefício é a viabilização de coordenação de comboios, que é o gerenciamento de diversos veículos, coordenando-os, com pontos específicos de formação e dissociação do comboio (MENDES, 2020), trazendo redução do consumo de combustível, das emissões de poluentes e, com a coordenação, melhoria e densidade de tráfego (TSUGAWA; JESCHKE; SHLADOVER, 2016). Como visto na Figura 3, realizar um comboio destes, com os caminhões tão próximos uns dos outros, seria imprudência sem um ACC atuante, tornado a manobra segura e confiável.

O controle da dinâmica longitudinal do automóvel é, normalmente, separado em dois sistemas: um de nível alto, (ULC – Upper Level Controller), e um de nível baixo, (LLC – Low Level Controller) (XIAO; GAO, 2010; LUU; LUPU, 2019; RAJAMANI, 2012; MCAULIFFE et al., 2018). O LLC se refere ao controle dos pedais de aceleração e frenagem, que comumente recebe um valor de aceleração proveniente do ULC, e realiza seu controle, garantindo que o torque gerado nas rodas, desempenhe o objetivo de referência de aceleração do veículo. Boa parte da complexidade da dinâmica veicular está no LLC, incluindo as dinâmicas do motor, marchas e transmissões, até os pneus (MCAULIFFE et al., 2018; HASPALAMUTGIL;

ADALI, 2017). O ULC trabalha normalmente com uma dinâmica mais simples, apenas aceleração e atrasos, mas é o local que são computados os sensoramentos de velocidade do veículo, velocidade relativa ao carro a frente e os controles e cálculos que contemplam o ACC. Existem dois principais controladores no ULC, um que mantém a velocidade do veículo constante e outro que controla a distância do carro à sua frente. Com estes, é feito o gerenciamento da escolha do controlador apropriado para desempenhar a manobra, se adaptando às condições do caminho, enviando a aceleração desejada ao LLC (ZHAI et al., 2011; SHAKOURI et al., 2011).

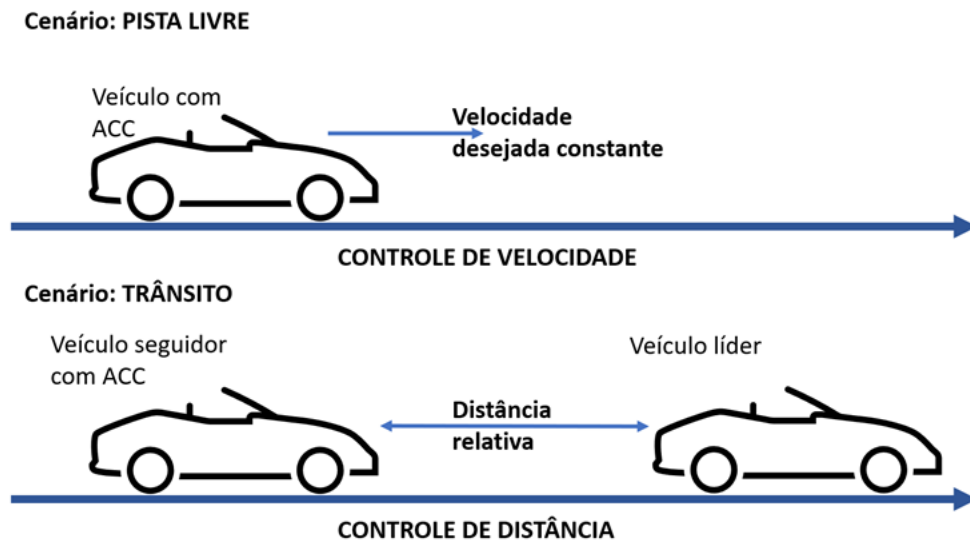
Figura 3- Comboio formado por veículos pesados



Fonte: Retirado de Larson, Liang e Johansson (2015).

Portanto, o sistema ACC é comumente dividido em dois níveis: alto e baixo. O nível alto, (ULC), possui dois controladores principais, o de velocidade constante e o de controle de distância. Cada parte do sistema, possui grande diversidade de abordagens e técnicas aplicadas nesses controles, que serão apresentadas no decorrer do trabalho. Além disso, há o gerenciamento entre o controlador de velocidade e o controlador de distância, o qual ocorre no momento de encontro dos carros, ou seja, o instante durante a aproximação do veículo com ACC, ao encontrar outro veículo em sua frente. Esta gestão, de decidir qual o instante conveniente em utilizar o melhor controlador apresentam certas possibilidades de controles e objetivos neste cenário.

Figura 4 – Cenários básicos de atuação de um ACC



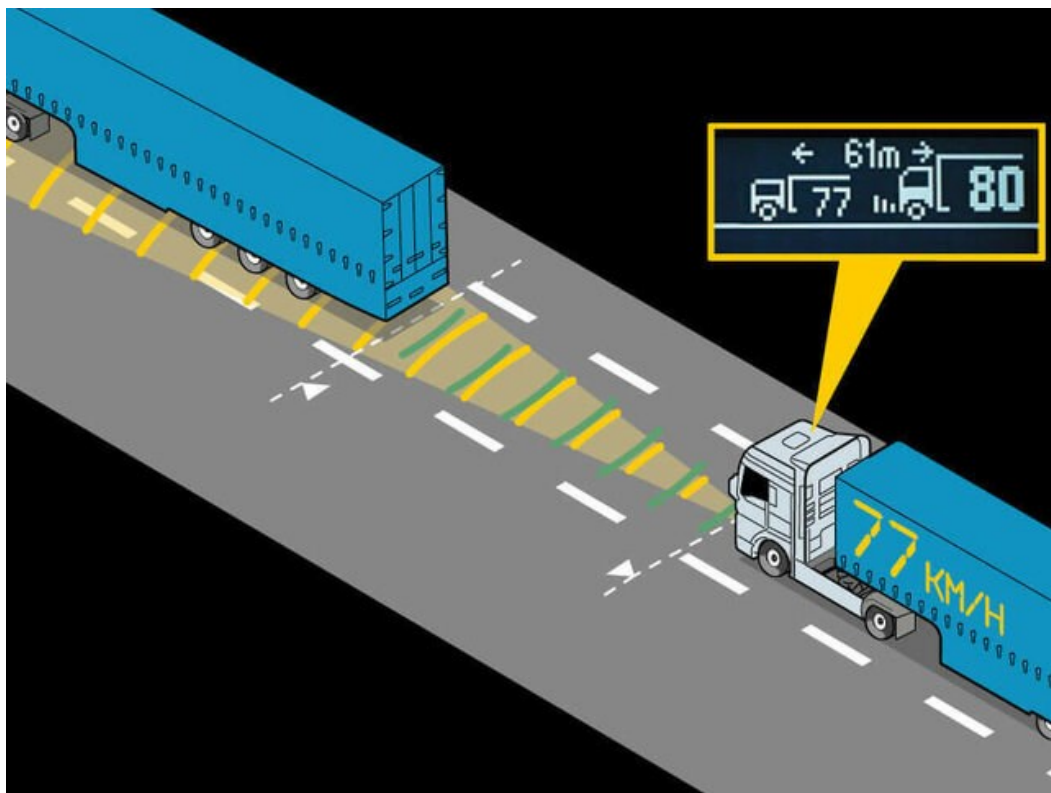
Fonte: Autor.

Além dos dois principais cenários da Figura 4, existe o momento intermediário que merece atenção em um ACC, que é justamente a transição entre não ter e ter um veículo mais lento à frente. Esta é a chamada fase de aproximação, o momento em que está se formando um comboio, como o cenário ilustrado pela Figura 5. O comboio pode ser formado por necessidade de tráfego (veículos quaisquer), ou por intuito de economia de combustível pela diminuição do arrasto aerodinâmico do conjunto (NANNI et al., 2019), com aplicações explícitas para veículos pesados (MENDES et al., 2017). Existem alguns trabalhos que versam sobre esta fase de aproximação, como o trabalho de Fancher e Bareket (1994), que desenvolveram um determinado diagrama, para analisar esta fase com maior critério e clareza. Mas deixaram pontos a melhorar, como a ocorrência de chaveamento excessivo entre os controladores. O trabalho de Haspalamutgil e Adali (2017), se preocupou em mitigar o chaveamento elevado entre o controle de velocidade e o de distância, utilizando a mesma relação linear da distância desejada e velocidade na aproximação, como o trabalho citado anteriormente, mas adicionou um gatilho de distância para acionar o controlador de distância desejada. A proposição de Zhai et al. (2011) foi a de realizar a aproximação da forma mais rápida possível, com uma relação exponencial da referência à distância desejada final de comboio.

Como recentemente exposto por Liu et al. (2020), o modo de chavear os controladores do ACC (aceleração e/ou velocidade e/ou distância), são bem significativos em relação ao desempenho geral do sistema em relação a segurança, conforto e economia de combustível.

Dentre os trabalhos pesquisados, foram vistas diversas técnicas de controle aplicadas ao sistema ACC. Cada qual com seus focos em requisitos de economia de combustível, conforto e segurança do sistema. Em muitos casos, os controladores são tratados separadamente, com técnicas efetivas, mas que necessitam de gerenciamento a parte para decisões de qual controlador utilizar, cuidando mais de um requisito do que de outros. Sistemas mais sofisticados, que conseguem manejar múltiplos requisitos, não levaram em conta o momento de formação de comboio.

Figura 5 - Fase de aproximação com veículos pesados



Fonte: Retirado de MAN Trucks & Buses (2021).

Este trabalho analisa e compara as duas principais técnicas de aproximação apontadas pela revisão bibliográfica, uma desenvolvida por Haspalamutgil e Adali (2017) e outra por Zhai et al. (2011), e propõe um método alternativo a estas técnicas usadas pelos autores. As análises envolvem o tempo para formação de comboio, economia de combustível, segurança e conforto na viagem. Nenhum dos trabalhos analisados lida com várias destas questões na fase de projeto e os resultados são apenas verificados a posteriori. A metodologia proposta neste trabalho envolve um controlador preditivo baseado em modelo (MPC - Model Predictive Control) como forma de incluir vários requisitos de desempenho e robustez explicitamente na fase de projeto.

Esta dissertação contém a estrutura que se segue. A seção 2 apresenta a revisão da literatura, nos pontos de interesse relativos ao ACC, cobrindo sua arquitetura, modos de distância interveicular, controladores desenvolvidos, técnicas de aproximação de comboio e uma visão geral do que foi pesquisado, ao seu final são apresentados os objetivos. Na seção 3, há a metodologia que versa sobre, a dinâmica do sistema, consumo de combustível, a arquitetura do ACC, diagrama de análise para aproximação, chaveamento de controladores, aprofundamento em duas técnicas para formação de comboio, requisitos de segurança e conforto, apresentação da sistemática do MPC, estratégia e arquitetura do MPC concebido para o ACC, fechando o capítulo, cenários de simulação para a realização de testes com o controlador idealizado. A quarta seção (4), contém os resultados e análises, dos testes e simulações realizados com os diversos cenários pré-estabelecidos e do comportamento do ACC proposto. Na seção 5, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e recomendações de continuidade as ramificações deste trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta uma revisão da literatura sobre arquitetura do ACC, método de referência de distância interveicular, controladores utilizados internamente ao ACC e métodos de aproximação de comboio. O intuito, é entender o que está sendo realizado e como é realizado, no meio científico a este respeito, para suportar os objetivos desta dissertação. Esta revisão está organizada da seguinte forma. Na seção 2.1, há uma breve explanação sobre o CC, que foi o controlador pioneiro em controle longitudinal veicular, gerando bases ao ACC. A seção 2.2, apresenta a arquitetura mais difundida em uso para um sistema ACC, com suas subdivisões em níveis e peculiaridades de modelagem. Neste tipo de sistema, a escolha de como definir a referência de distância entre dois veículos que irão formar um comboio, pode modificar o comportamento do sistema sensivelmente, a seção 2.3 apresenta duas formas em se realizar esta escolha. Na seção 2.4, são apresentados controladores utilizados internamente ao ACC, os quais apresentam as mais diversas e distintas técnicas de controle para um mesmo tema.

Como um dos pontos de estudo deste trabalho é a fase de aproximação à formação de comboio, a seção 2.5 expõe as possibilidades encontradas na literatura, para esta finalidade. Por fim, por obter uma diversidade e quantidade razoável de elementos, apresentam-se na seção 2.6 tabelas com esta massa de informações, com o objetivo de facilitar a visualização e comparação desta nuvem de dados. A revisão da literatura aqui exposta, se baseia no trabalho publicado por Batista, Leonardi e Mendes (2021a).

2.1 CONTROLE DE CRUZEIRO - CC

O controle de cruzeiro (CC) convencional, foi o início do controle longitudinal veicular, projetado para manter a velocidade do veículo constante, com referência à velocidade desejada imposta pelo condutor, não se importando se há ou não outros veículos à sua frente. Sendo papel do motorista monitorar a via.

Como citado por Xiao e Gao (2010) e Mendes (2020), um dos primeiros estudos de CC ocorreram em 1950, muito antes do termo ADAS surgir, sendo o CC a base inicial para o ACC. Isto mostra, que o controle de velocidade constante de um veículo, já é bem conhecido e muito difundido por uma série de autores, que normalmente citam, ou deixam implícito nas equações a utilização de um controlador PID, (Proporcional Integral Derivativo), e mais comumente um PI, (Proporcional Integral), para realização deste controlador (XIAO; GAO, 2010; LUU; LUPU, 2019; HAPALAMUTGIL; ADALI, 2017; ZHAI et al., 2011; SHAKOURI et al., 2011;

MENDES, 2020, DASGUPTA et al., 2017). Dado o problema em questão, que é manter velocidade do veículo, o controlador PI consegue desempenho justo ao que se compromete.

Notado que o CC convencional, é um controle de velocidade constante já difundido desde seu remoto início em 1950, que hoje está englobado ao controle de velocidade no sistema ACC. Os avanços nos estudos para o ACC, absorveram a funcionalidade do CC a sua porção de controle de velocidade constante, os quais podem se utilizar dos controladores PI convencionais, porém com técnicas mais avançadas que manipulam todas as porções do ACC, como será apresentado à frente.

2.2 ARQUITETURA DO ACC

O sistema ACC é amplamente estudado academicamente e aplicado comercialmente, sendo indispensável compreender suas principais características e arquitetura típica (MENDES, 2020). Em princípio, o sistema do ACC é dividido em dois grupos de controladores, o de alto nível (ULC) e o de baixo nível (LLC), estudados por diversos autores (XIAO; GAO, 2010; LUU; LUPU, 2019; RAJAMANI, 2012; MCAULIFFE et al., 2018; HASPALAMUTGIL; ADALI, 2017; SHAKOURI et al., 2011). Estes, se dispõem em cascata a partir de referências de velocidade do veículo e velocidade relativa ao veículo da frente, (caso exista), o ULC gera a referência de aceleração desejada para o LLC. Com esta aceleração requisitada, o LLC executa o controle, atuando sob acelerador e freio para gerar o torque necessário nas rodas como ilustrado na Figura 6, do controle em cascata de Haspalamutgil e Adali (2017).

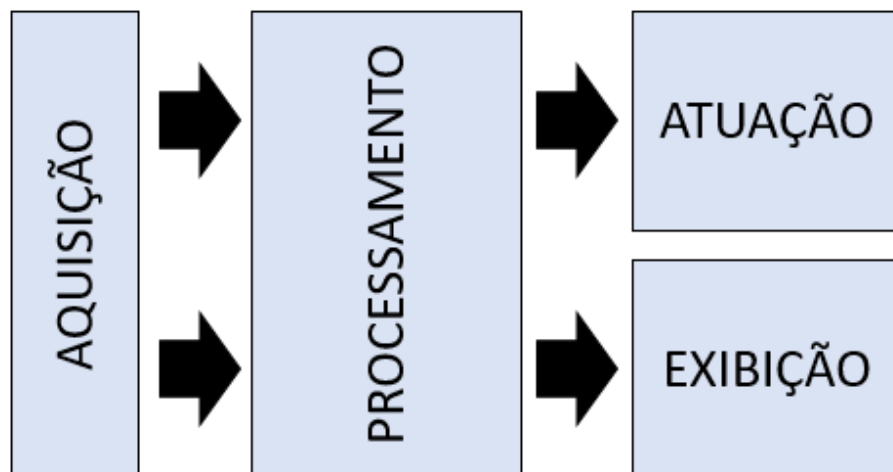
A estrutura da Figura 6, rege as partes de estratégia de controle propriamente ditas, porém é necessário enxergar todo o sistema ACC embarcado no veículo. Sua arquitetura típica, descrita e proposta por Xiao e Gao (2010), citada e descrita por Mendes (2020), pode ser vista de forma macro, no diagrama em blocos da Figura 7. Sua constituição é dada por quatro grandes blocos: aquisição, exibição, processamento e atuação. A parte de aquisição é responsável pela captação de todas as entradas do sistema, sejam elas do carro, do motorista ou do ambiente que o veículo se encontra, coletando dados de botão de liga e desliga ACC, velocidade desejada pelo motorista, velocidade atual, velocidade e distância relativa ao automóvel à frente, sensor de curva, temporizações e posição dos pedais de aceleração e frenagem. O bloco de exibição revela ao piloto informações referentes a operação do veículo com indicação de ACC, sinais sonoros e luminosos de alerta, e aos demais carros na pista com a luz de freio. Apenas para situar, considera-se o bloco de processamento como sendo o ULC e o bloco de atuação como sendo o LLC, que serão abordados nesta seção.

Figura 6 – Estrutura do controle em cascata



Fonte: Adaptado de Haspalamutgil e Adali (2017).

Figura 7 – Diagrama em blocos macro da arquitetura típica de sistema ACC

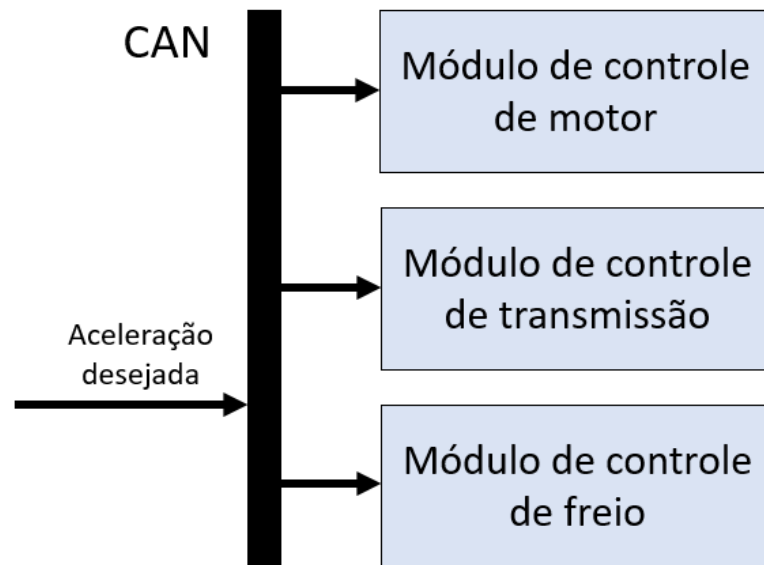


Fonte: Adaptado de Xiao e Gao (2010).

O bloco de atuação é o nível baixo do controle (LLC) e comporta três módulos, o de controle do motor, controle de transmissão e controle dos freios, como apresenta a Figura 8, de forma análoga ao descrito em Xiao e Gao (2010). Nele, está embutida a maior parte da dinâmica do veículo como trem de potência, inércias rotativas, trem de marchas, reduções e marchas de

transmissão, atrito dos pneus, resistência à rolagem e demais dinâmicas (LUU; LUPU, 2019), atuando diretamente sobre os pedais de freio e acelerador. Este bloco da arquitetura, recebe a informação de aceleração desejada vinda do ULC, via linha de comunicação CAN BUS ou LIN BUS (XIAO; GAO, 2010; MCAULIFFE et.al., 2018), e a transforma em torque nas rodas, suprimindo o requisitado pela referência.

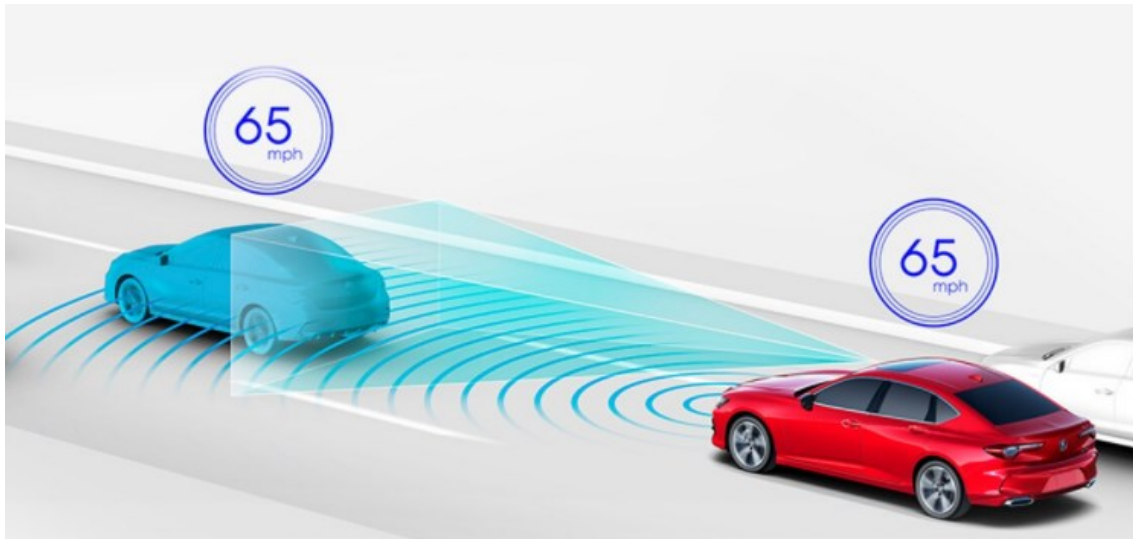
Figura 8 – Bloco de atuação da arquitetura típica de ACC



Fonte: Adaptado de Xiao; Gao (2010).

A parte responsável pelo ULC é o bloco de processamento da arquitetura do ACC. Nela está contida a inteligência dos controles de velocidade, de distância e o gerenciamento dos controladores nos mais diversos cenários possíveis. Ele é composto pelos subsistemas da Figura 9, conforme sugerido por Xiao e Gao (2010). Composto pelo módulo de controle de velocidade, que é o controle CC convencional, e pelo módulo de controle de distância. Ambos são gerenciados e selecionados pelo módulo de chaveamento de controlador. Ainda, existe o módulo de cálculo de distância, que calcula a distância desejada baseado em uma distância mínima relativa e ao tempo de impacto ou time gap, influenciados pela velocidade do veículo. Por fim, o módulo de seleção de veículo precedente (select preceding vehicle module), (XIAO; GAO, 2010), que é alimentado pelo sensor de distância, sensor de curva e de velocidade do veículo, gerando seus dados baseados no veículo precedente, tais como velocidade relativa e distância relativa. Baseado nestas informações, o sistema decide se estará ativo e qual controle estará atuante, fazendo o chaveamento dos controladores.

Figura 10 - Veículos em comboio por tráfego intenso



Fonte: Retirado de Acura (2021).

Para solucionar essa instabilidade de fila (string stability), a distância entre os elementos não é mais um valor fixo, mas um valor baseado em tempo de impacto ou “time gap” ou time headway, que se traduz em uma distância por este tempo multiplicado pela velocidade do veículo. Com esta estratégia recomendada em diversos trabalhos, (XIAO; GAO, 2010; MENDES, 2020), a estabilidade de linha pode ser garantida de maneira robusta, coisa que não é garantida com a utilização de uma distância fixa (MCAULIFFE et al., 2018; XIAO; GAO, 2011). Esta política é chamada de CTH (Constant Time Headway) (MENDES, 2020; XIAO; GAO, 2011) em que este tempo de impacto é constante, multiplicando a velocidade do veículo, alterando a distância desejada entre os elementos do comboio e não propagando o erro pela fila (MCAULIFFE et al., 2018). Esta solução visa garantir a estabilidade de um comboio, visto que não é previsível a quantidade de elementos que irão compor o comboio.

Embora a política CTH seja muito difundida e utilizada em muitos dos trabalhos científicos, existem atrasos na propagação de informações e o tempo de resposta do sistema. Com a propagação de erros na distância desejada entre os veículos na fila e os atrasos de informação que ocorrem entre os elementos do comboio, criou-se a tecnologias de comunicação entre veículos V2V (Vehicle to Vehicle) (MENDES et al., 2017), a qual gera uma variante do ACC, o ACC cooperativo (CACC – Cooperative ACC) (MCAULIFFE et al., 2018). Há também, o V2I (Vehicle to Infrastructure), que é a comunicação do veículo com infraestrutura de inteligência de tráfego (BRUMMELEN et al., 2018), para mitigar propagação de erros, melhorar e gerenciar o tráfego nas vias.

Apesar da vantagem implícita na estabilidade do comboio, existem trabalhos que não se utilizam do CTH como base para o cálculo da distância interveicular, aplicando o conceito de distância constante, denominado de CD (Constant Distance). A justificativa é baseada no conservadorismo implícito no CTH, resultando em distâncias muito pequenas em baixas velocidades, gerando perigo de colisão, e que, em altas velocidades gera uma longa distância, possibilitando que outros veículos entrem no meio do comboio (DASGUPTA et al., 2017). Na busca por artigos, foi encontrada a referência (MCAULIFFE et al., 2018), que utiliza o CD para um caso especial de comboio de caminhões já formado, trafegando à uma velocidade constante e mantendo a distância desejada fixa, mesmo com distúrbios modificando às velocidades do comboio. Argumenta-se, contanto, que com diferenças sensíveis na velocidade do sistema, a distância desejada deverá ser recalculada para este novo ponto de operação.

2.4 CONTROLADORES PARA O ACC

Os estudos de controladores para o ACC, concentram-se no ULC com diversas técnicas avançadas, lineares e não lineares, que podem ou não utilizar controladores convencionais como base, por exemplo um PID. Mas isto não é unanimidade, existindo propostas que particionam os controles de modo diferente à arquitetura de LLC e ULC, as variações são diversas, como será exposto nesta parte do trabalho.

Em Xiao e Gao (2011) propõe-se o uso de um ACC de forma a garantir a estabilidade do comboio, o modelo usado para projeto do sistema de controle leva em consideração os atrasos gerados pelo motor, atuadores e sensores. Utiliza-se a política de CTH, para obter a distância desejada a controlar. O autor desenvolve e compara o equacionamento comportando ou não estes atrasos, demonstrando um aumento na ordem do sistema de dinâmica longitudinal, apresentando uma análise da propagação do erro de espaçamento e velocidade, que impacta o controle e a estabilidade do comboio. Propõe-se então, controlar tanto a velocidade como a distância no ULC, por meio da técnica não linear de Sliding Model Control (Controle por modos deslizantes), atuando analogamente a uma lei de controle PD (Proporcional Derivativo), somada à informação de aceleração do veículo. Os resultados são analisados para diversos casos, com comboio homogêneo e heterogêneo, com diferentes temporizações para o tempo de impacto e atrasos do sistema, concluindo que o acúmulo dos atrasos do sistema restringe a estabilidade individual garantida pelo CTH. Conclui-se, que a técnica de Sliding Mode conferiu bons resultados, mas, dependendo das constantes de tempo impostas, à estabilidade do comboio fica limítrofe, abrindo espaço para novas pesquisas (XIAO; GAO, 2011).

Existem trabalhos que não possuem o foco em desenvolver o ACC, mas necessitam defini-lo, para dar continuidade aos seus estudos, que utilizam técnicas próximas as descritas por Xiao e Gao (2010), utilizando controlador PI para manter a velocidade do veículo constante e a estratégia de CTH, com velocidade e distância relativas, e com uma estrutura de controlador também PI, para manejar a distância entre os carros. Isto foi aplicado por Haspalamutgil e Adali (2017), pois seus esforços estavam voltados para análise da fase de aproximação dos veículos. Em Mendes (2020), o intuito da utilização do ACC foi para garantir a coordenação de comboios de caminhão. O texto de Zhai et al. (2011), utiliza das mesmas técnicas, mas com um controlador PD para o controle de distância por CTH, sendo seu intuito o estudo da fase de aproximação, utilizando técnica de desaceleração constante para a fase de formação do comboio.

No trabalho de Luu e Lupu (2019), são tratados os dois controladores do ULC e LLC, eles expõem que muitos trabalhos negligenciam o LLC, o que julgam não ser o melhor caminho. O controlador ULC é desenvolvido com o intuito de manter a velocidade constante e a distância dos veículos, baseado em tempo de impacto, a lei de controle desenvolvida é baseada em distância relativa e velocidade relativa entre os veículos, (líder e seguidor), e é proposta uma estrutura do tipo PI. Para o LLC, propõe-se o uso de um controlador PID, para o pedal do acelerador com um modelo elaborado de dinâmica longitudinal que inclui, as dinâmicas de atuadores e do sistema do trem de potências.

Os resultados obtidos por simulações demonstram que o sistema conseguiu manter velocidade e a distância desejada do veículo líder, com o ULC realizando os cálculos para gerar a aceleração de referência para o próximo controlador, o LLC com esta referência atua nos pedais do veículo e se utiliza também da dinâmica do freio motor.

Nos estudos de Shakouri et al. (2011) [18], a técnica de Gain Scheduling (GS) é aplicada no LLC, com atuação no pedal do acelerador, comparam-se os resultados com duas estruturas distintas de controle, a PI e a LQ (Linear Quadrático). No ULC utiliza-se um PI para fazer o controle, enviando ao LLC a velocidade como referência, diferente dos demais que utilizam a aceleração. No LLC, os autores utilizam um GSPI (Gain Scheduling PI) e um GSLQ (Gain Scheduling LQ), com atuação no pedal de aceleração. Para o freio foi utilizado um controlador PI e, uma lógica simples, chaveia para um ou outro controlador nos pedais de acelerador ou freio. Os controladores foram postos à prova em diversos cenários de tráfego, e os resultados apontam bom desempenho para ambos os controladores, apenas ressaltando que o GSLQ exibiu uma resposta, com um tempo de subida um pouco mais lento do que a resposta com o controlador GSPI.

Com o intuito de estudo da formação e divisão de comboios de caminhões, Dasgupta et al. (2017), considera uma distância fixa entre os caminhões, arranjo de CD (Constant Distance), pois com o CTH conclui que em comboios de baixíssima velocidade, a distância será muito pequena e, por causa da propagação dos erros, é passível ocorrer colisões. Outro ponto levantado é que em altas velocidades o espaço entre os caminhões do comboio é muito grande, diminuindo o ganho de arrasto aerodinâmico e deixando a possibilidade de que outros veículos de passeio entrassem facilmente atrapalhando o comboio. Estes autores utilizam um PID, para controlar a aproximação e dissolução do comboio de caminhões, demonstrando graficamente bons resultados do controlador. Pelos resultados demonstrados nas simulações, os autores concluem que o sistema possui estabilidade de comboio sem o CTH, mas não há demonstrações explícitas disto, tal como em Rajamani (2012), que demonstra que a estabilidade de forma conservadora se dá por CTH e suas variações.

Com intenção igual ao trabalho anterior, sob a distância fixa de separação veicular, mas com uma abordagem e explanação distinta, os esforços de McAuliffe et al. (2018) apresentaram a mesma sistemática não usual de CD. Porém, é explicado que em comboios de caminhão trafegando em velocidade constante, é possível utilizar a distância constante dentro de pequenos distúrbios na velocidade, mas para outras situações e manobras em diferentes velocidades, esta distância terá que ser recalculada e/ou variada. Neste artigo, o foco é demonstrar a utilização da comunicação V2V para realizar o CACC no comboio, no qual não é citado o controlador o ULC, mas por serem veículos comerciais, é dito apenas que se faz o controle de distância e velocidade, e que no LLC é utilizada a técnica de Feedback Linearization. Com testes reais realizados com base na norma SAE J1321 sobre economia de combustíveis, são apresentadas diversos dados e análises do que foi testado, sugerindo que foram gerados bons resultados.

Com o intuito de analisar economia de combustível, Li et al. (2012) utilizou um controlador do tipo PnG (Pulse-and Glide), para cenário de um carro seguindo o outro com o intuito de formar um comboio e então fazer a comparação de seu controlador com um controlador LQ. Vale dizer, que o controlador PnG atua como um uma chave, liga (Pulse) e desliga (Glide) gerando um torque no sistema com forma aproximada de uma onda quadrada, que se reflete como uma onda triangular ou dente de serra na velocidade. Como consequência, a forma de onda da distância relativa entre os carros se comporta como uma onda senoidal. Com isto, o sistema controla a distância média desejada, que se mantém constante ao longo do tempo. Por meio de simulações, foi obtida uma economia de 20% superior com o uso do controle PnG em relação ao LQ.

Um interessante benchmark entre métodos de controle ótimo foi realizado por Corona e Schutter (2008). Os autores utilizaram diversos controladores no ACC para atuarem diretamente nos pedais do veículo. O intuito, foi realizar o controle ótimo, com a técnica de MPC (Model Predictive Control), utilizando predição do tipo PWA (Piecewise Afine), que grosso modo, é uma maneira de repartir um sistema não linear em diversos lineares para a predição do MPC. Utilizou-se também, a abordagem de modelo MLD (Mixed Logical Dynamical) que, baseado em controle ótimo, a lei de controle pode ser dada na forma explícita ou implícita, o que impacta em ter ou não que esperar o sistema convergir para se obter uma resposta ótima ou sub-ótima, ao menos. São desenvolvidos oito controladores baseados em MPC e PI, com diversos pontos distintos em sua concepção de parâmetros e simulados em modelo mais realista possível do carro. Portanto, foram desenvolvidos e aplicados ACCs com os seguintes controladores: NMPC (MPC não linear), on-line MPC-PWA com MLD ligado, off-line MPC-PWA com MLD desligado, GLA (gears and linear approximation), GTA (gears and tangente approximation), BTA (basic tangente approximation), BGS (basic gain scheduling) e controlador PI otimizado. Todas as propostas utilizaram alguma técnica de controle ótimo, e ao final é apresentada uma tabela comparativa de benchmark com diversos quesitos medidos das diversas técnicas apresentadas, expondo complexidades, tempo de processamento, tipo de programação de controle ótimo, quantidade de variáveis, método on-line ou não, se houve violações, dentre muitos outros pontos. O resumo é um comparativo do esforço computacional das diversas técnicas, indicando que todas, em simulação, tiveram funcionamento satisfatório e que estão apresentadas muitas informações para abrir novas frentes de estudo.

O MPC, é um método avançado do uso da técnica de controle ótimo, como um meio de quase fechar a malha de controle, calculando recursivamente o resultado de controle a cada instante de amostragem do sistema. Citando um outro trabalho com esta estratégia, temos o artigo de Kural e Güvenç (2010), que realiza um MPC com modelo de predição linear e com programação quadrática, (QP - Quadratic Programming), para resolução do problema de controle ótimo em tempo real. Um dos enfoques deste artigo, além de realizar e demonstrar todos os pontos no desenvolvimento de um MPC, é testar a performance do controlador em cenário realista. O modelo utilizado para simulações e testes, foi o mais realista possível com modelos da dinâmica, modelo de pneus, modelos de percurso e modelos do motor e seus subsistemas. Portanto, no ULC, é aplicado o MPC para controlar velocidade e distância desejada do veículo líder com consideração de tempo de impacto (CTH), e demais restrições de limites do sistema. Para o LLC, é considerado que há um controlador dedicado que realiza

a tarefa de transformar a aceleração em torque nas rodas. Foram criados alguns cenários de percursos para testes, os quais em sua conclusão constam que o MPC se comportou de maneira satisfatória em relação aos comandos de aceleração e desaceleração desejados, distância interveicular e velocidade relativa nula.

Ainda discorrendo sobre MPC, o qual é uma estratégia de controle que consegue trabalhar com múltiplos objetivos e com diversas restrições. Foi proposto por Munir e Junzhi (2018), seguindo a linha e com melhorias aos esforços de Zhao et al. (2017), um método de ponderar as diversas variáveis do sistema para alcançar diferentes objetivos na função custo do MPC desenvolvido para o ULC do ACC. Mais do que isso, propôs método de chavear estes pesos de acordo com as condições do veículo na via, ajustes em tempo real (RW-MPC (real-time weighted MPC)), e comparar com MPC onde estes valores são fixos o tempo todo (CW-MPC - (constant weight MPC)) (ZHAO et al., 2017). Os objetivos de otimização, almejam a economia de gastos de combustível e conforto dos passageiros e motorista, que se traduzem nos comportamentos de velocidade, distância do veículo à frente, aceleração e taxa de variação da aceleração. O trabalho chega ao ponto que é possível melhorar a economia de combustível e manter as performances desejadas de conforto.

Uma outra abordagem em realizar o ACC, pode ser realizada com princípios de inteligência artificial, como por exemplo, redes neurais com aprendizagem por reforço (RL – Reinforcement Learning), aprendizado supervisionado (SL - Supervised Learning) e, a poderosa junção destes, que é o aprendizado por reforço supervisionado (SRL – Supervised Reinforcement Learning). Este último, é a base do material desenvolvido por Wang et al (2015). Baseado em seus esforços anteriores (ZHAO et al., 2014; ZHAO et al., 2013; HU; ZHAO, 2011), é proposto um ACC completo com um novo método chamado de Ator-Crítico Supervisionado (SAC – Supervised Actor-Critic), onde redes neurais artificiais (ANN – Artificial Neural Network) são utilizadas para a inteligência do sistema. A ideia, é que este “Ator” seja supervisionado e reforçado pelo “Crítico” para que a atuação do ACC, para velocidade e distância, ocorra da melhor maneira possível. O “Ator”, é quem atua no veículo em si, o “Crítico” do SAC pode ser um determinado controlador ou um motorista humano experiente e treinado, que irá guiar o processo de aprendizagem do “Ator”. Esta inteligência tem o intuito de conceber um controlador que se adapte às mudanças do ambiente que o veículo se encontra às mudanças na estrada e as condições inesperadas na via. Portanto, durante o processo de aprendizagem os coeficientes e pesos da ANN vão sendo melhorados por esta proposta de SAC. O simulador e ambiente utilizados com o algoritmo SAC, foram modificados para abordagem em tempo real, testados em diversos cenários com diferentes condições de

estrada e de veículo líder, como: variações repetitivas de velocidade, frenagem de emergência e manobras de troca de pistas. Estas simulações, mostraram que o ACC proposto com esta inteligência, obteve performance satisfatória quando posta à prova em situações de mudanças.

Técnicas de inteligência artificial são úteis em diversas áreas, uma aplicação interessante é retratada por Lin et al. (2017), que aplica métodos de ANN e lógica fuzzy para aprimorar a computação de controle e predição do controle ótimo do sistema. O controle ótimo, é comumente aplicado para determinar o controle e a trajetória dos estados (predição), de sistemas dinâmicos, no qual uma função custo é minimizada, porém, este processo é computacionalmente árduo e complexo, envolvendo a solução da equação de Hamilton-Jacob-Bellman e a equação diferencial de Riccati. Portanto, é utilizada uma rede neural-fuzzy (FNN – Fuzzy Neural Network) para aproximar a complexa solução desta função custo e suas restrições, obtendo controle e predições com menor poder computacional e maior rapidez de convergência, visto que esta técnica possui a capacidade de se adaptar e atualizar (treinar) ao longo do tempo. Esta FNN, ainda possui uma função de penalidades que analisa e prevê desacelerações do veículo precedente, evitando colisões quando há diminuição repentina de velocidade. Esta previsão do veículo líder, é feita através de um segundo sistema fuzzy, baseado no modelo fuzzy de Takagi-Sugeno (T-S), que possui a característica de expressar a dinâmica de sistemas lineares ou não lineares, por um modelo linear do sistema do veículo líder. Isto posto, Lin et al. (2017) possui um ACC por controle ótimo com o controle e predição, realizados por FNN do veículo seguidor com auxílio da predição da dinâmica do carro precedente, feita com modelo fuzzy de T-S, o qual o intitula de (tradução livre) controle preditivo neuro fuzzy adaptativo o ANFPC (adaptive neurofuzzy predictive control). Portanto, foi concluído que se alcançou desempenho satisfatório e uma excelente eficiência de combustível, realizando simulações com cenários de aceleração, desaceleração e frenagem de emergência do veículo líder. Tudo isso, com o intuito de performar segurança, ganho de energia e conforto aos integrantes do carro.

2.5 APROXIMAÇÃO E FORMAÇÃO DE COMBOIOS

Os eventos que ocorrem no percurso, com ação do ACC, são o controle de velocidade constante com pista livre, e o controle da distância interveicular formando um comboio, quando elementos mais lentos são encontrados. Porém, entre estes eventos, existe o momento da aproximação para a formação deste comboio. Neste momento de transição, para formar ou desfazer o comboio, é necessário fazer o gerenciamento dos controladores de velocidade e

distância de forma efetiva, segura, confortável e inteligente. Isto é necessário, para qualquer condição que envolva comboios veiculares. De maneira geral, para veículos de passeio teremos comboios oportunistas, onde se formarão oportunamente as condições de tráfego. No caso de veículos pesados, o qual visa economia de combustível, emissões de poluentes entre outros, a coordenação de itinerários de caminhões (MENDES, 2020), gera uma formação programada do comboio em pontos específicos da via.

Um dos primeiros trabalhos que realizaram uma análise sobre o momento de aproximação na formação de comboio foi realizado por Fancher e Bareket (1994) em 1994, propondo uma forma mais interessante de realizar esta aproximação com um esforço de controle apropriado ao conforto dos passageiros. Isto porque, a partir do momento que o veículo vem em velocidade constante e encontra outro elemento com velocidade menor, ele imediatamente deverá entrar no modo de controle de distância, mas dependendo das constantes do sistema, a manobra poderá ser abrupta que, além de um esforço de controle custoso, não será confortável e nem seguro ao condutor e passageiros.

Para a análise desta fase, foi utilizado e difundido o diagrama chamado em inglês de “range versus range-rate” (FANCHER; BAREKET, 1994) e intitulado de $R - \dot{R}$, no sistema ACC, esta é a relação entre a posição relativa e a velocidade relativa entre os veículos que estão para formar o comboio. Nele, é possível enxergar em seus quadrantes, os momentos em que pode haver colisão, se os carros estão se aproximando ou se afastando e as mudanças entre essas variáveis.

A ideia principal para a fase de aproximação, no trabalho de Fancher e Bareket (1994), foi a de gerar uma referência móvel para o valor da distância desejada que decaia linearmente no diagrama $R - \dot{R}$, assim realizando a transição de forma mais suave até chegar na distância desejada referente a velocidade que o comboio se estabelecer. Sendo que, como em outros trabalhos supracitados, foi utilizada lei de controle para velocidade e distância com estrutura de um controlador PI. Para a fase de aproximação é utilizado um controlador proporcional para seguir esta referência de transição da distância entre os veículos, que realiza a ação de aproximação de forma mais cautelosa e controlada. Com esta referência transitória, o sistema estando além ou aquém da referência, influencia diretamente qual controlador (velocidade ou distância), será utilizado.

Nos trabalhos de Haspalamutgil e Adali (2017) foi visto que a solução proposta no trabalho de Fancher e Bareket (1994) produz um elevado número de chaveamentos entre os controles de velocidade e distância com CTH. Dentre alguns pontos, foi proposta que a partir de um determinado valor de distância relativa, o controle de distância entra em ação, mas com

lei de controle proporcional durante a transição e, apenas após os veículos chegarem à distância desejada final, o sistema volta ao controlador PI de distância, já em regime permanente. O resultado foi alcançado, evitando o chaveamento excessivo entre os controladores, evitando também, esforço de controle elevado por ocorrência das transições de controlador, sendo uma evolução de seu antecessor. Esta implementação foi aplicada também em Mendes (2020), em coordenação de comboio de caminhões com pequenas modificações de constantes, surtindo os mesmos efeitos analisados via diagrama $R - \dot{R}$.

Nesta mesma linha de pensamento evolutivo, os esforços de Zhai et al. (2011) se concentram em conseguir uma formação de comboio mais rápida e efetiva entre os membros do futuro comboio, quando comparada aos métodos anteriores de relação linear de aproximação no diagrama $R - \dot{R}$. Para isto, os autores propõem uma relação de desaceleração constante na aproximação que se reflete como uma parábola no diagrama $R - \dot{R}$. Ademais, são definidas regiões no entorno desta parábola, que os controladores devem ser chaveados dependendo da situação encontrada no momento da aproximação. Está técnica de aproximação por desaceleração constante do carro seguidor, resultou em uma formação mais rápida do comboio, quando comparado com o método linear.

2.6 TABELAS COMPARATIVAS

A revisão bibliográfica visitou numerosos e diferentes trabalhos, estes contemplam diversificadas técnicas e modos de uso do ACC em busca de determinadas performances. De maneira a concatenar e visualizar suas variedades, foram montadas as tabelas a seguir. A Tabela 1 contém as técnicas de controle utilizadas no LLC e/ou ULC e se foram tratadas no trabalho ou não, a técnica de distância desejada (CTH ou CD) implementada, se contempla o momento de aproximação interveicular, o tipo de referência utilizada entre o ULC e LLC e se seus testes foram práticos ou simulados. A Tabela 2 e a Por fim, boa parte das técnicas apresentadas separam o controlador de velocidade e controlador de distância do ACC em dois sistemas distintos dentro do ULC, que são chaveados por uma terceira lógica interna. Alguns outros artigos, utilizaram técnicas como MPC ou algum tipo de inteligência artificial, para o tratamento sem distinção destas situações de controle, porém nenhuma delas se preocupou com o momento de aproximação para formação de comboio. Nesta linha de pensamento, todos os trabalhos que tiveram atenção a fase de aproximação, trabalharam com o tratamento distinto de cada controlador, com uma outra inteligência para chavear os controladores no ULC. Um

próximo horizonte possível, é o cuidado com a fase de aproximação, com vistas a economia de combustível, segurança e conforto, em um método que englobe todo o sistema e controles necessários ao ULC, em uma formatação única, como por exemplo um MPC.

Tabela 3 apresentam, de forma resumida, qual era o foco do artigo e quais foram os resultados alcançados com vínculo ao ACC.

Observa-se na Tabela 1 diversas técnicas de controle (tradicionais, elaborados e inovadores), implementados nos dois níveis da arquitetura do ACC, cada um buscando atingir determinadas metas de desempenho, eficiência e/ou eficácia com seus controladores, mas é notório que não existe um consenso em qual é a melhor técnica a utilizar. Apesar de muitos autores focarem em apenas um dos dois níveis de controle (ULC ou LLC) ou utilizarem controladores de outros trabalhos no nível que não há foco, o sistema posto à prova, tem seu funcionamento pleno e sem perda de aplicabilidade. Constatou-se que a estratégia de distância interveicular desejada com CTH é mais recorrente, mas dois trabalhos utilizaram CD de forma efetiva. Como continuidade desta questão de pesquisa, um próximo passo seria compará-las e entender os pontos positivos e negativos de cada método em diversas condições. A referência entre os níveis do ULC e LLC, em sua grande maioria, apresentam a aceleração como variável, pois desta forma a dinâmica a ser manejada pelo ULC se apresenta de forma mais simples, deixando a maior complexidade ao LLC.

Em questão aos tipos de testes, apenas uma das obras realizou testes experimentais, isto sugere uma limitação em conseguir recursos para realizar testes reais de ACC. Obviamente, tais recursos para testes reais, não são simples em se disponibilizar, sendo uma problemática mais de recursos e infraestrutura do que ausência de ideias e vontade dos pesquisadores. A fase de aproximação, para formação de comboio, apresentou poucas fontes de estudo, porém com diversidade e continuidade no desenvolvimento. As metas, perseguidas nos trabalhos, foram realizadas com o objetivo de formar mais rapidamente um comboio e/ou gerar menor esforço de controle. Seja por busca da referência ou chaveamento de controladores. Foi notado um espaço à preencher, com comparações na fase de aproximação, a respeito de consumo de combustível, conforto e segurança em uma mesma empreitada, até mesmo, uso de técnicas de controle mais modernas para esta etapa.

Tabela 1 – Detalhes dos controladores, técnicas e testes dos trabalhos estudados

Referência	LLC	ULC	Distância desejada	Aproximação	Ref. entre ULC e LLC	Testes
Luu e Lupu (2019)	PID	PI	CTH	Não	Aceleração	Simulado
McAuliffe et al. (2018)	Feedback Linearization	Não Cita	CD	Não	Aceleração	Prático
Haspalamutgil e Adali (2017)	Não tratado	PI	CTH	Sim	Aceleração	Simulação
Zhai et al. (2011)	Não tratado	PD (apenas distância)	CTH	Sim	Não cita	Simulação
Shakouri et al. (2011)	GSPI e GSLQ para acelerador e PI para freio	PI	CTH	Não	Velocidade	Simulado
Mendes (2020)	Não tratado	PI / aproximação P	CTH	Sim	Aceleração	Simulação
Dasgupta et al. (2017)	Não tratado	PID	CD	Não	Não cita	Simulado
Xiao e Gao (2011)	Não tratado	Sliding Mode Control	CTH	Não	Não cita	Simulado
Li et al. (2012)	Não tratado	Pulse'n'Glide (PnG) e LQ	CTH	Não	Velocidade média	Simulado
Corona e Schutter (2008)	NMPC; on-line PWA MPC: MLD-on; off-line PWA MPC: MLD-off; GLA; GTA; BTA; BGS; PI Otimizado	Não cita	CTH	Não	Não cita	Simulado
Kural e Güvenç (2010)	PI	MPC - solução por QP	CTH	Não	Aceleração	Simulado
Munir e Junzhi (2018)	Dinâmica inversa do veículo	MPC, solução por QP - pesos fixos ou ajustes em tempo real	CTH	Não	Aceleração	Simulado
Zhao et al. (2017)	Switching logic	RW-MPC e CW-MPC	CTH	Não	Aceleração	Simulado
Wang et al (2015)	Lookuptable com a dinâmica inversa do sistema	SAC (supervised Actor-Critic) com ANN.	CTH	Não	Aceleração	Simulado
Lin et al. (2017)	Não cita	Controle Ótimo com ANFPC - resolução por FNN e predição Fuzzy T-S	CTH	Não	Não cita	Simulado
Fancher e Bareket (1994)	Não tratado	PI / aproximação P	CTH	Sim	Aceleração	Simulado

Fonte: Autor

É percebido pela Tabela 1 que os artigos possuem o objetivo de aplicar métodos distintos de controle linear e não linear, técnicas de controle clássico, controle ótimo, redes neurais entre outros. Porém, pela leitura da Tabela 2 e Tabela 3, na maioria dos trabalhos, os resultados dos testes por simulação não foram amplamente discutidos, analisando alguns requisitos de controladores, mas sem grandes comparações entre outras técnicas e exigências, que foram os mais dissertados, como economia de combustível e conforto da viagem. Uma outra oportunidade de avanços, se refere a comparação de metodologias distintas de controle, por

testes simulados, determinando as forças e fraquezas de cada critério, para uma possível aplicação em testes reais de forma segura e viável.

Tabela 2 – Detalhes em relação ao foco e resultado dos trabalhos estudados

Referência	Intuito/foco	Resultados em relação ao ACC
Luu e Lupu (2019)	Projeto de PID para o ACC, com toda complexidade de dinâmica no LLC.	O controlador, levando em conta todas as dinâmicas de trem de potência, pneus, arrasto etc., se comportou bem, conseguindo manter a distância desejada entre os veículos.
McAuliffe et al. (2018)	Economia de energia em diversos cenários, em comboios com dois e três caminhões, com CACC.	Com testes reais realizados com base na norma SAE J1321, sobre economia de combustíveis, são apresentadas diversos dados e análises, expressando que foram gerados bons resultados.
Haspalamutgil e Adali (2017)	Diminuir o chaveamento entre controles na fase de aproximação.	O resultado foi alcançado, evitando o chaveamento excessivo entre os controladores internos ao ACC no momento da formação do comboio, sendo uma evolução de seu antecessor.
Zhai et al. (2011)	Formação mais rápida e efetiva de comboio, com atenção a estabilidade da linha de comboio (string stability).	Realiza a formação de comboio de forma mais rápida e efetiva, com técnica de desaceleração constante, em comparação com aproximação linear. Objeto foi alcançado.
Shakouri et al. (2011)	Projeto de ACC com GSPI e GSLQ no LLC, comparar suas performances.	Simulações obtiveram bons resultados, GSLQ exibiu uma resposta com um tempo de subida um pouco mais lento do que a resposta com o controlador GSPI.

Fonte: Autor

Por fim, boa parte das técnicas apresentadas separam o controlador de velocidade e controlador de distância do ACC em dois sistemas distintos dentro do ULC, que são chaveados por uma terceira lógica interna. Alguns outros artigos, utilizaram técnicas como MPC ou algum tipo de inteligência artificial, para o tratamento sem distinção destas situações de controle, porém nenhuma delas se preocupou com o momento de aproximação para formação de comboio. Nesta linha de pensamento, todos os trabalhos que tiveram atenção a fase de aproximação, trabalharam com o tratamento distinto de cada controlador, com uma outra inteligência para chavear os controladores no ULC. Um próximo horizonte possível, é o cuidado com a fase de aproximação, com vistas a economia de combustível, segurança e conforto, em um método que englobe todo o sistema e controles necessários ao ULC, em uma formatação única, como por exemplo um MPC.

Tabela 3 – (continuação Tabela 2) Detalhes em relação ao foco e resultado dos trabalhos estudados

Referência	Intuito/foco	Resultados em relação ao ACC
Mendes (2020)	Desenvolvimento de perfis de velocidade para coordenação de comboios de caminhões, com intuito de redução no consumo de combustível.	Complexo conjunto de controle e dados demonstrando a efetividade da coordenação de comboios de caminhões na economia de combustível. Sendo um dos pontos necessários, a efetiva e segura formação e manutenção do comboio de caminhões com ACC.
Dasgupta et al. (2017)	Projeto de PID para formação e divisão de blocos de comboios de caminhões.	Os autores concluem que o sistema possui estabilidade de comboio sem o CTH, por meio dos testes reais realizados com seu controlador PID.
Xiao e Gao (2011)	ACC para estabilidade de comboio (homogêneo e heterogêneo), com atenção aos tempos de atraso de atadores e sensores, utilizando Sliding Mode Control.	Sliding Mode conferiu bons resultados ao sistema. As constantes de tempo de atrasos, dos sensores e atuadores, podem fazer a estabilidade do comboio fica limítrofe.
Li et al. (2012)	Projeto de ACC com técnica de PnG, visando economia de combustível, comparado com um controlador LQ.	Por meio de simulações, com os controladores PnG e LQ, foi obtida uma economia de 20% superior com o uso do PnG.
Corona e Schutter (2008)	Comparativo (benchmarking), entre diversos MPCs para veículo SMART, dos esforços computacionais das técnicas de controle aplicadas.	O resumo é um comparativo do esforço computacional das diversas técnicas, indicando que todas, em simulação, tiveram funcionamento satisfatório e que estão apresentadas muitas informações para abrir novas frentes de estudo. Cada abordagem possui pontos positivos e negativos em relação a desempenho e poder computacional.
Kural e Güvenç (2010)	Aplicar MPC para ACC com modelo realista não linear	Foram criados alguns cenários de percursos para testes, os quais em sua conclusão constam que o MPC se comportou de maneira satisfatória em relação aos comandos de aceleração e desaceleração desejados, distância interveicular e velocidade relativa nula.
Munir e Junzhi (2018)	Realizar MPC com múltiplos objetivos com diferentes pesos de parâmetros para ACC.	O trabalho chega à conclusão que é possível melhorar a economia de combustível e manter as performances desejadas de conforto da viagem no sistema.
Zhao et al. (2017)	Economia de combustível e conforto na viagem com MPC com ajustes de pesos em tempo real.	Conclui-se que o MPC com ajustes dos pesos dos parâmetros de controle em tempo real (RW-MPC) oferece melhor performance do que com os parâmetros fixos (CW-MPC), em relação à economia de combustível e conforto na viagem.
Wang et al (2015)	Desenvolvimento de um SAC (Supervised Actor-Critic) para ACC com ANN, visando desempenho na resposta à mudança de ambiente.	Dentro de diversos cenários, como variações repetitivas de velocidade, frenagem de emergência e manobras de troca de pistas, a abordagem obteve performance satisfatória e superior ao comparado com controlador PID.
Lin et al. (2017)	Proposta de ANFPC para ACC com predição do veículo a frente por FNN para economia de combustível e conforto na viagem.	Os testes alcançaram desempenho satisfatório e uma excelente eficiência de combustível, realizando simulações com cenários de aceleração, desaceleração e frenagem de emergência do veículo líder. Tudo isso, com o intuito de realizar segurança, ganhos de energia e conforto aos integrantes do carro.
Fancher e Bareket (1994)	Apresentação de diagrama de Range vs Range Rate como meio de análise de controle de distância de ACC.	Demonstrou ser útil e enriquecedor a utilização de tal diagrama para analisar e entender todas as fases e possibilidades em um sistema de comboio (formação, manutenção e dispersão). Para tal análise, um ACC foi aplicado e analisado.

Fonte: Autor

2.7 OBJETIVOS

O presente trabalho, tem por objetivo geral, projetar e analisar um controlador preditivo baseado em modelo (MPC - Model Predictive Control), como forma de incluir explicitamente na fase de projeto de um ACC, diversos requisitos de robustez e desempenho, como segurança, consumo de combustível e conforto em viagem. Dedicando também, atenção a fase de aproximação à formação de comboio veicular. Além disto, são analisadas outras técnicas e cenários, para adicionar criticidade as análises e resultados.

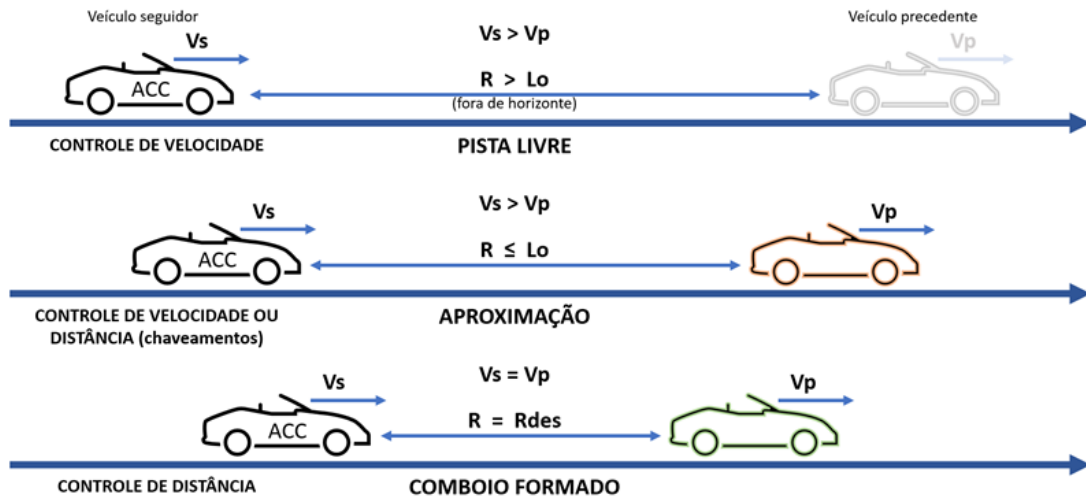
Portanto, define-se alguns objetivos específicos para alcançar este objetivo geral, que segue:

- I. Determinar modelo da dinâmica longitudinal de um veículo em comboio.
- II. Determinar modelo de consumo de combustível.
- III. Comparar as duas principais técnicas de aproximação apontadas pela revisão bibliográfica, uma desenvolvida por Haspalamutgil e Adali (2017) e outra por Zhai et al. (2011) em relação ao tempo para formação de comboio, economia de combustível, segurança e conforto na viagem.
- IV. Identificar quais requisitos são importantes para serem incorporados no projeto de um ACC, em relação a consumo, segurança e conforto.
- V. Determinar parâmetros, equações e restrições coerentes ao problema de controle ótimo, que contém o MPC, no que diz respeito a consumo, segurança e conforto.
- VI. Formular o problema de controle para MPC.
- VII. Projetar um controlador tipo MPC para os requisitos mínimos.
- VIII. Avaliar o desempenho do MPC por meio de simulação.
- IX. Analisar o desempenho do MPC perante as técnicas anteriormente simuladas.

3 METODOLOGIA

O sistema completo do estudo contém o veículo líder e o veículo seguidor, na mesma faixa de rodagem, em cenário que o elemento que lidera está mais lento do que o componente em seu encalço, como visto na Figura 11. Considera-se que, pelo menos o carro seguidor possui controle ACC, com distância interveicular R suficiente para que apenas o CC (Cruise Control) esteja atuante de início, condição que R é maior que a distância de sensoriamento L_0 , possuindo o veículo seguidor velocidade v_s constante e superior a velocidade v_p do carro precedente. Com esta diferença de velocidade, ocorrerá a aproximação dos veículos, chegando em uma zona que o controle de velocidade será trocado pelo controle de distância no ACC. Neste momento, em que ambos os veículos ainda possuem velocidades distintas e, a distância entre eles diminui, mas ainda não é a distância desejada pelo sistema (R_{des}), é quando ocorre a fase de aproximação ou de formação do comboio.

Figura 11 – Cenários e variáveis, com a fase de formação de comboio veicular



Fonte: Autor.

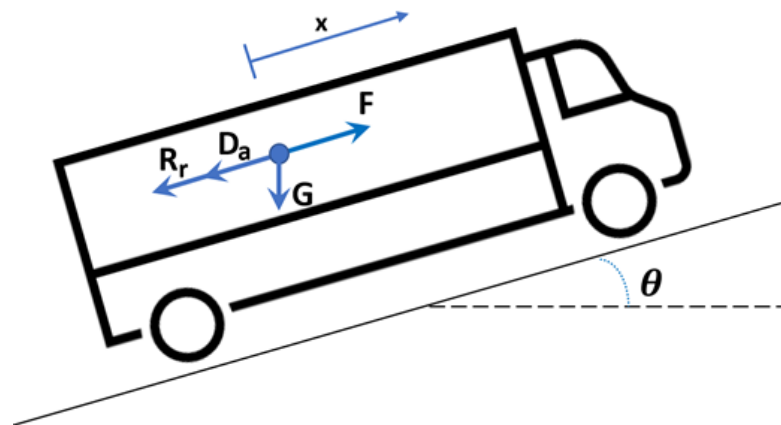
Portanto, com o sistema apresentado de maneira geral, para termos alicerces as próximas seções, estão apresentados na metodologia, os pontos necessários à realização dos objetivos desta empreitada. As seções a seguir se dispõem da seguinte forma. Seção 3.1, apresenta a dinâmica longitudinal a ser trabalhada. Seção 3.2, expõe o modelo de consumo de combustível a ser utilizado, sendo um dos focos, o consumo realizado pelo sistema. O ACC que será estudado e utilizado, tem sua arquitetura definida na seção 3.3. Para uma análise mais sólida da resposta do sistema com ACC, no momento de aproximação e formação de comboio entre dois

veículos, é exposta na seção 3.4, um diagrama especial que auxilia e facilita a compreensão do que está a ocorrer no sistema. Abordagens de como chavear controladores internos ao ULC do ACC, são apresentados na seção 3.5. Aprofunda-se os conhecimentos em cima de duas abordagens de aproximação (linear e quadrática), que são exibidas na seção 3.6. Com intuito, de certa forma, de concretizar e mensurar a segurança e conforto em um sistema com ACC, pontos relevantes são tratados na seção 3.7. Apresenta-se a técnica de controle ótimo de Model Predictive Control (MPC) na seção 3.8, com a meta, em realizar tal tipo de abordagem em um ACC, que contemple diversos requisitos expostos neste trabalho. A implementação da estratégia do MPC para o ACC, é exposta na seção 3.9. Por fim, a seção 3.10 apresenta diferentes cenários de teste, elaborados para averiguar o desempenho do controlador, nos diversos requisitos expostos nas seções anteriores. Observa-se que, o artigo publicado por Batista, Leonardi e Mendes (2021b), é a base inicial da metodologia exposta nas próximas seções.

3.1 DINÂMICA LONGITUDINAL

A dinâmica longitudinal de um veículo é muito bem definida na literatura e largamente utilizada em diversas aplicações, por exemplo em Mendes (2020), Haspalamutgil e Adali (2017) e tantos mais que a utilizam de forma implícita. O veículo aqui é interpretado como um ponto material, utilizando o modelo de um caminhão da Figura 12 com as diversas forças que atuam sobre ele em deslocamento longitudinal, o equacionamento desta dinâmica é apresentado na equação 1.

Figura 12 – Forças atuantes em um veículo



Fonte: Adaptado de Mendes (2020).

$$m\ddot{x}(t) = F - D_a - R_r - G\sin(\theta) \quad (1)$$

Descrevendo a equação 1, temos as forças em Newtons: F é a força longitudinal gerada, sobretudo pela tração nas rodas, D_a é a força de arrasto aerodinâmico, R_r é a força de resistência ao rolamento, G é a força peso e, em radianos, o ângulo θ de inclinação da via. Estas forças, são descritas pelas equações 2, 3, 4 e 5 a seguir, já contemplando a possibilidade de existir um outro veículo a frente.

$$F = \eta T(t) \quad (2)$$

$$D_a = cv^2(t)\Phi(d) \quad (3)$$

$$R_r = mgf \quad (4)$$

$$G = mg \quad (5)$$

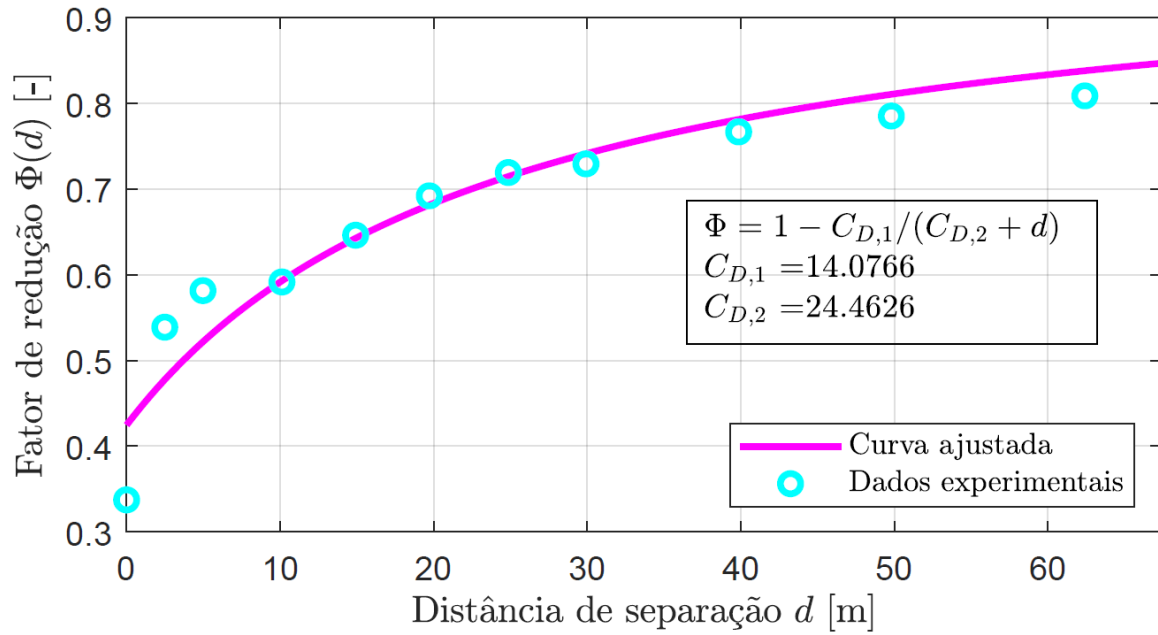
Nas equações acima, η é a eficiência da transmissão, $T(t)$ é a força de tração em Newtons gerada pelo motor, c é o coeficiente aerodinâmico combinado em kg/m, $v(t)$ é a velocidade do veículo em m/s, d é a distância do carro a frente em metros, $\Phi(d)$ é o fator da intensidade de arrasto que depende da distância interveicular d , m é a massa do carro em kg, g a aceleração da gravidade em m/s² e f o coeficiente de resistência ao rolamento. O coeficiente aerodinâmico combinado é determinado pela área frontal do caminhão A , ρ que é a densidade do ar e C_d que é o coeficiente experimental aerodinâmico livre (equação 6).

A força de arrasto aerodinâmico, possui um cálculo diferenciado, de quando se tem apenas um veículo sozinho. Como o sistema irá formar comboio, ocorre uma diferença no arrasto aerodinâmico, pela proximidade dos veículos, o que infere menor resistência do ar, ocorrendo economia de forças, combustíveis e menores emissões (NANNI, 2020). Este efeito é representado pelo termo $\Phi(d)$, descrito pela equação 7, que é o modelo proposto por Turri (2015). Os valores dos coeficientes $C_{D,1}$ e $C_{D,2}$, foram determinados em Turri, Besselink e Johansson (2017), por método dos mínimos quadrados não linear, através de dados experimentais de Hucho (1989), imagem retirada de Mendes (2020) (Figura 13). Este modelo será considerado nesta dissertação.

$$c = \frac{1}{2} C_d \rho A \quad (6)$$

$$\Phi(d) = 1 - \frac{C_{D,1}}{C_{D,2} + d} \quad (7)$$

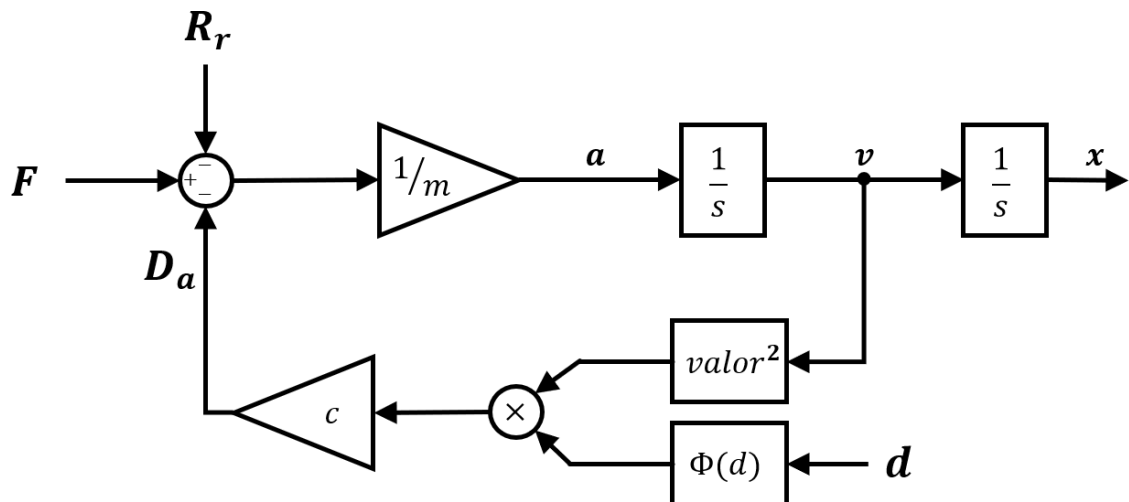
Figura 13 – Fator de redução do arrasto aerodinâmico pela distância interveicular



Fonte: Adaptado de Hucho (1989), Turri, Besselink e Johansson (2017), extraído de Mendes (2020).

Portanto, com todas as variáveis e peculiaridades de um veículo em comboio apresentadas, o diagrama em blocos da dinâmica do caminhão no plano, fica ilustrada pela Figura 14.

Figura 14 - Diagrama em Blocos da dinâmica veicular no plano



Fonte: Autor.

3.2 MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Um dos pontos de análise desta dissertação versa sobre o consumo de combustível envolvido no sistema em estudo. Para isto, é necessário um modelo de consumo de combustível que estime de forma coerente e realista o gasto deste insumo. Dentre alguns modelos de consumo encontrados, para motores diesel, como o CMEM (AN et al., 1997), MOVES (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2010) e o VT-CPFM (WANG; RAKHA, 2017), segundo analisado por Mendes (2020), o modelo que possui melhor estimativa, em comparação com dados experimentais, é o modelo VT-CPFM, que será utilizado neste trabalho.

Rakha et al. (2011) desenvolveram o VT-CPFM (Virginia Tech Comprehensive Power-based Fuel consumption Model), que é um modelo de consumo de combustível de veículos pesados. Com base na Figura 15, referente a dados experimentais obtidos do consumo, observa-se que o gasto de combustível possui comportamento praticamente constante para potências negativas (desaceleração) e uma função parabólica para potências positivas (aceleração), gerando a equação 9. Assim, temos seu cálculo realizado a partir da potência instantânea $P(t)$, consumida pelo veículo (equação 8), baseada na velocidade $v(t)$ e na força de tração $F(t)$, e então calcula-se a taxa de consumo $Fuel_c(t)$

$$P(t) = F(t)v(t) \quad (8)$$

$$Fuel_c(t) = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 P(t) + \alpha_2 P(t)^2 & , \forall P(t) \geq 0 \\ \alpha_0 & , \forall P(t) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Os coeficientes α_0 , α_1 e α_2 foram extraídos de testes experimentais feitos na Universidade da Califórnia, em oito caminhões, por Wang e Rakha, (2017), que geraram os dados listados na Tabela 4, referentes a consumo de caminhões com motor a diesel.

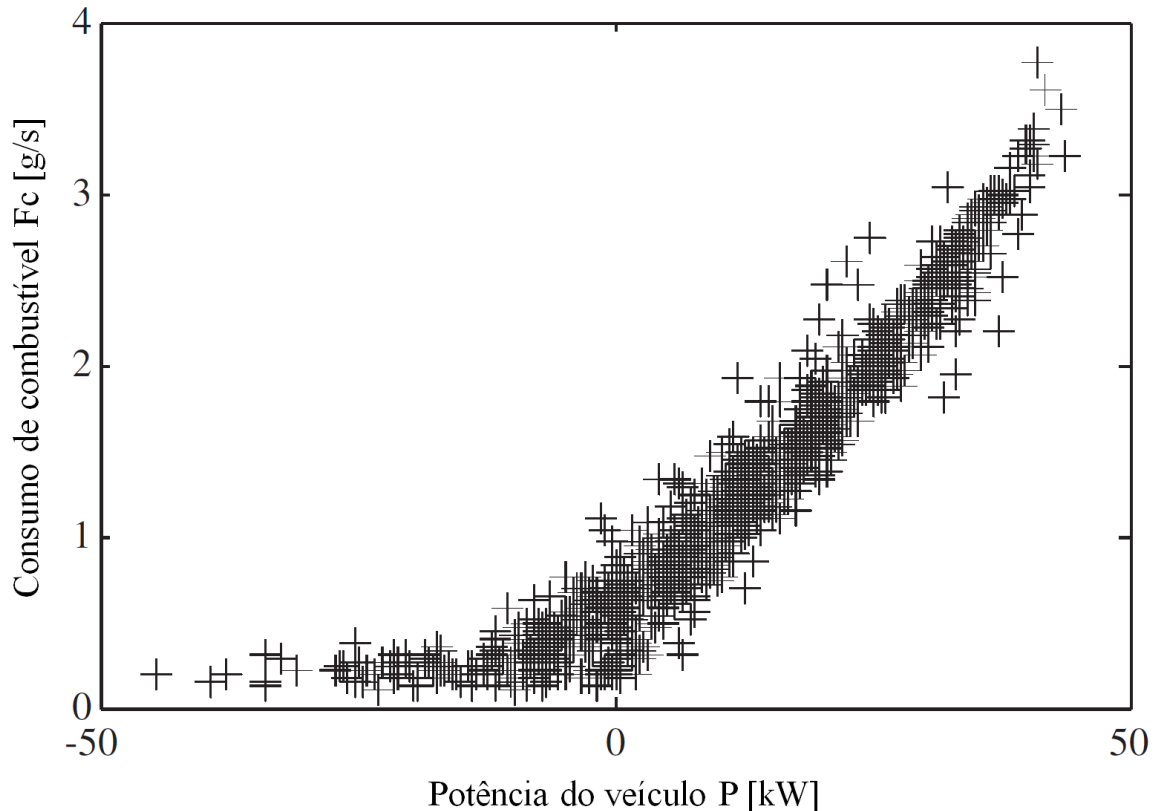
O modelo descrito pela equação 9 responde em duas condições. Quando o caminhão está acelerando, ($P(t) \geq 0$), é computada a equação de segundo grau, que penaliza o consumo com o aumento de potência requerida. O segundo caso é quando não há aceleração ou ocorre frenagem, nestes instantes é consumida apenas a marcha lenta do motor, quantidade de diesel para manter o motor em funcionamento. Para os coeficientes α_0 , α_1 e α_2 , deste modelo de consumo de combustível, serão utilizados os dados do caminhão número 8 (Tabela 4), assim como escolhido por Mendes (2020), e por ser o veículo de maior potência e capacidade de carga, dentre os listados.

Tabela 4 – Coeficientes experimentais do modelo de consumo VT-CPFM

#	Caminhão	Pot. [hp]	α_0	α_1	α_2
1	Modelo: International/9800 SBA Ano: 1997 Motor: Cummings/M11-330	330	1,56E-03	8,10E-05	1,00E-08
2	Modelo: Freightliner/D120 Ano: 1997 Motor: DDC/C-60	360	2,48E-03	7,14E-05	1,00E-08
3	Modelo: Freightliner/D120 Ano: 1997 Motor: Cummins/N14	370	2,26E-03	7,82E-05	1,00E-08
4	Modelo: Freightliner/C120 Ano: 1997 Motor: Cummins/N14	370	1,80E-03	7,96E-05	1,00E-08
5	Modelo: Freightliner/C120 Ano: 1998 Motor: DDC/C-60	370	2,02E-03	7,59E-05	1,00E-08
6	Modelo: Freightliner/FDL120 Ano: 1999 Motor: DDC/C-60	470	1,45E-03	8,48E-05	1,00E-08
7	Modelo: Freightliner/FDL120 Ano: 1999 Motor: DDC/C-60	360	1,31E-03	8,63E-05	1,00E-08
8	Modelo: Freightliner/FDL120 Ano: 2001 Motor: CAT/C-15	475	2,16E-03	7,98E-05	1,00E-08

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

Figura 15 – Dados experimentais de Potência por Consumo de veículo pesado



Fonte: Adaptado de Rakha et al. (2011)

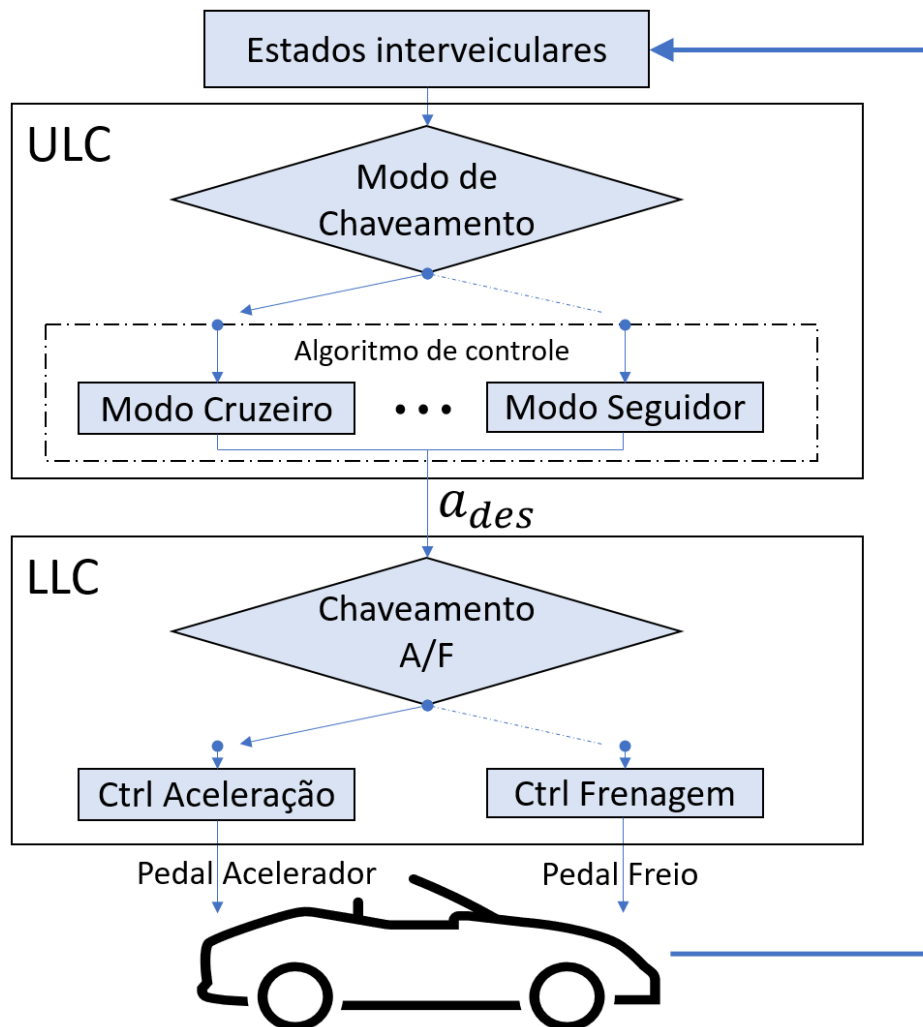
3.3 ACC EM ESTUDO

Conforme Mendes (2020), um ACC típico é subdividido em dois controladores, o ULC e o LLC. Nesta divisão temos, o LLC atuando sobre os pedais de acelerador e freio, decidindo como e qual acionar, calculando a parte mais complexa da dinâmica longitudinal do veículo (LIU et al., 2020). Tudo isso é para garantir que a referência entregue pelo ULC, normalmente a aceleração, seja realizada através do torque nas rodas. No ULC, são computados os sensoriamentos do ambiente que o carro se encontra, são tomadas as decisões de ações a realizar perante os cenários apresentados. Neste nível superior estão, o controle de velocidade constante, conhecido como Controle de Cruzeiro (CC – Cruise Control), e o controle de distância do veículo a frente. É papel do ULC chavear entre estes controles, decidindo o melhor momento em utilizar cada controlador. Liu et al. (2020) ilustra a hierarquia do sistema ACC, como visto na Figura 16.

Existem diversas abordagens ao estudo e desenvolvimento de um ACC, podendo ter o tratamento do ULC ou do LLC. Quando algum deles não é considerado, é por entender que sua função já está resolvida. Por exemplo, em Haspalamutgil e Adali (2017), apenas o ULC é

tratado, em McAuliffe et al. (2018) somente o controlador LLC é trabalhado e nos esforços de Shakouri et al. (2011), ele realizou o controle em ambas as camadas de controle. Este trabalho se concentra no estudo do chaveamento entre os controladores de velocidade e distância, pertencentes ao ULC.

Figura 16 – Diagrama em blocos do ACC



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2020).

Um outro ponto que modifica o comportamento e atuação em um ACC, é como a distância relativa desejada entre os veículos é determinada. Para esta distância interveicular, que ocorre quando outro veículo mais devagar está à frente, existem duas principais políticas para determinação desta distância. A primeira política é denominada de distância constante ou CD (Constant Distance), onde uma distância fixa é determinada para qualquer condição que se tenha um outro veículo mais lento em sua frente ou à necessidade de formação de comboio, como no caso de caminhões, que é utilizada por McAuliffe et al. (20218) e no trabalho de

Dasgupta et al. (2017). Porém, como citado por Rajamani (2012) e replicado amplamente, a escolha desta política (CD), não reflete em estabilidade robusta de comboio, por causa da propagação dos erros pelos veículos na fila, sendo assim o CD não garante robustez de fila. Uma política que garante robustez à estabilidade de linha do comboio (String Stability) é o CTH (Constant Time Headway), também indicada como time-gap ou por tempo de impacto, que escolhe a distância interveicular com base na velocidade que os móveis se encontram, multiplicado por uma constante temporal, o tempo de impacto. Desta forma, além da estabilidade de linha, tem-se segurança em maiores velocidades (XIAO e GAO, 2010), com distâncias interveiculares mais seguras. O CTH, por suas garantias, é utilizado em diversos desenvolvimentos, como exemplos os trabalhos de Fancher e Bareket (1994), Haspalamutgil e Adali (2017), Zhai et al. (2011), entre outros.

3.4 DIAGRAMA DE DISTÂNCIA RELATIVA POR VELOCIDADE RELATIVA

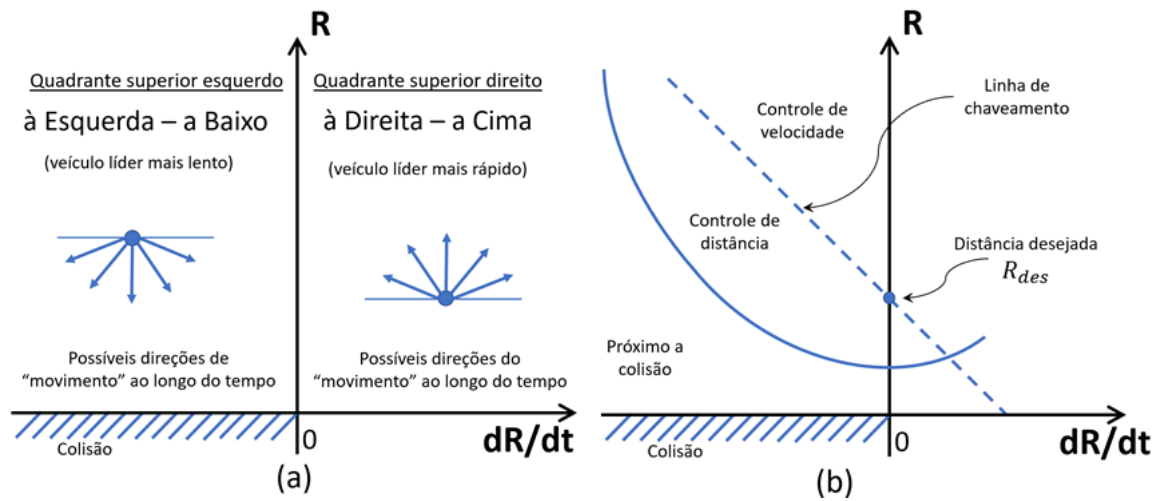
A fase de formação de comboio, entre dois elementos, teve uma contribuição muito interessante, proposta por Fancher e Bareket (1994), que hoje é base para análise de diversos trabalhos sobre chaveamento de controladores no ACC. Por este motivo, seu entendimento é necessário para a visualização e bom desenvolvimento de estratégias de aproximação. O desenvolvimento desta seção está todo embasado no trabalho de Fancher e Bareket (1994).

Foi proposto, um diagrama diferenciado para realizar as análises dos momentos convenientes para realizar a troca entre os controles do ULC, mais que isto, há visualização do comportamento do movimento entre os dois elementos deste comboio, o que é deveras útil. Este diagrama, de distância relativa por velocidade relativa ($R - \dot{R}$) é ilustrado na Figura 17, onde o R representa a distância relativa entre os veículos e o \dot{R} , (derivada no tempo da posição relativa), é a velocidade relativa interveicular. Estas variáveis, são representadas pelas equações 10 e 11, onde v_p e x_p são a velocidade e posição do veículo precedente e, do veículo seguidor, são v_s e x_s .

$$R = d = x_p - x_s \quad (10)$$

$$\frac{dR}{dt} = \dot{R} = v_p - v_s \quad (11)$$

Figura 17 – Plano $R - \dot{R}$ (a) análise dos quadrantes, (b) diagrama genérico



Fonte: Adaptado de Fancher e Bareket (1994).

O diagrama $R - \dot{R}$ possui informações importantes, referentes ao estado e a integridade dos elementos do comboio. É possível ver nas imagens da Figura 17, analisando cada quadrante do gráfico, que são regiões de como o movimento dos elementos do comboio deveria ser realizado ao longo do tempo, caso contrário o que poderia estar ocorrendo de errado. No primeiro quadrante (Figura 17a), a direção do movimento das variáveis é no sentido “para cima”, indicando que o veículo líder está mais veloz que o seguidor, realizando o aumento da distância relativa entre eles, caso contrário ou ocorreu impensada colisão ou os elementos trocaram de posição no sistema. O segundo quadrante (Figura 17a), tem seu movimento “para baixo”, assinalando que o veículo seguidor possui maior velocidade do que o precedente, diminuindo a distância relativa entre eles, de maneira inversa ao primeiro quadrante, um movimento contrário no segundo quadrante, “para cima”, indicaria troca de papéis no comboio ou colisão de maneira improvável. O terceiro quadrante (Figura 17), indica colisão entre os pares, não podendo entrar jamais nesta região, que temos a distância relativa R menor que zero, e a velocidade do veículo seguidor maior que o precedente. O quarto quadrante, é uma zona impossível, onde o veículo precedente possui a maior velocidade e o seguidor está a sua frente com menor velocidade ou colidiu com o líder. Um outro ponto de cuidado, apresentado na Figura 17b, é a região “próximo a colisão” no segundo quadrante, descrita pela parábola de linha contínua, sendo esta curva determinada pelas condições limites de reação de frenagem, inércias e condições do ambiente do comboio, como uma região de resguardo, para as manobras ocorrerem de forma segura.

No mais, pontos que serão discutidos à posteriori, presentes na Figura 17b, primeiro, a reta tracejada na diagonal, que representa uma referência de chaveamento para os controladores, já referente ao desenvolvimento de Fancher e Bareket (1994) de seu ULC. O segundo ponto, a referência desejada R_{des} , determinada pela investida de controle a ser implementada, que é facilmente visualizada no plano $R - \dot{R}$, e demonstra o equilíbrio do sistema, quando é alcançada a referência de distância e ambos os veículos possuem a mesma velocidade.

3.5 ESTRATÉGIAS DE CHAVEAMENTO NO ULC

O modo de chaveamento, entre os controladores do ULC, causa efeito direto no desempenho do ACC (ZHENHAI et al., 2016). Segundo Liu et al. (2020), existem três maneiras de estratégias de chaveamento, que são baseados em: distância, distância-velocidade e distância-velocidade-aceleração. ACCs baseados em distância são os pioneiros, estes comparam apenas a distância atual com a distância desejada, ativando o controle de distância se a distância medida é menor que a distância desejada, caso seja o oposto, chaveia para o controle de velocidade (CC). Os sistemas baseados em distância-velocidade, incluem a comparação das velocidades para realizar as transições de controladores de forma mais inteligente. Assim como a estratégia de distância-velocidade-aceleração, que deu um passo evolutivo incluindo a aceleração nas comparações na decisão de qual controlador utilizar, conseguindo resultados mais suaves e seguros.

A técnica baseada apenas em distância, foi o método inicial utilizado para o chaveamento entre os controladores de distância e velocidade do ACC. De maneira simplista, com a medida da distância interveicular e uma distância desejada pré-determinada entre eles, não importando se por CD ou CTH, é feita a simples comparação e, se o valor desejado é menor que a medida realizada, o CC mantém a velocidade do veículo. No instante em que a medida de distância for menor que a distância desejada, o sistema muda para o controlador de distância. Este critério está presente no trabalho de Zhang e Ioannou (2006), que funciona de forma satisfatória conforme relato dos autores, realizando o papel do ACC em manter uma velocidade pré-programada e, para evitar colisões, seguir um veículo mais lento a sua frente, com a mesma velocidade. Porém, realiza chaveamentos constantes durante todo seu funcionamento, gerando trancos e desconforto aos passageiros do veículo (LIU et al., 2020).

O critério de distância-velocidade é o mais popular e utilizado hoje em dia (LIU et al., 2020), trabalhado por Fancher e Bareket (1994), desenvolvedores do $R - \dot{R}$ para suas análises, para alcançar a distância desejada interveicular, no cenário de aproximação, foi determinada

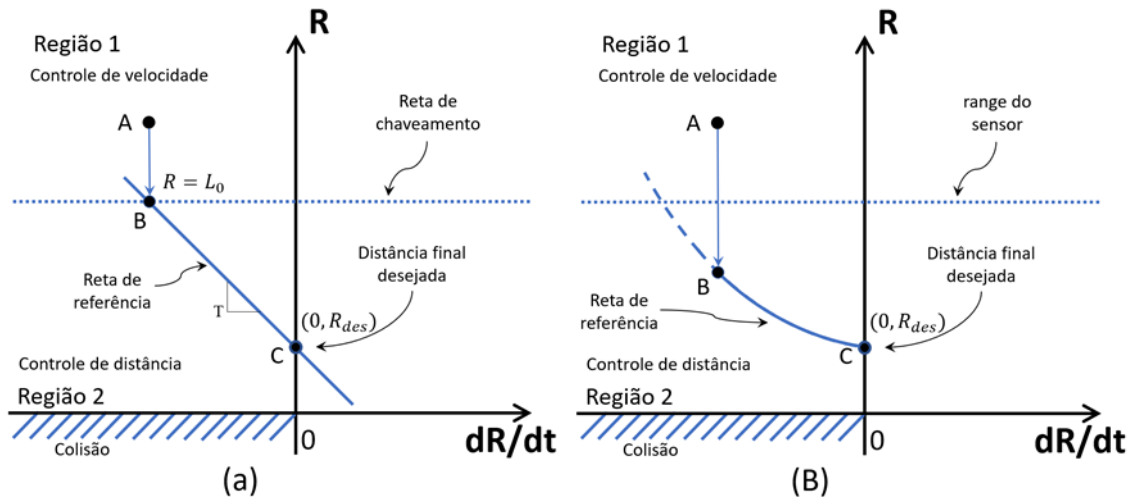
uma relação de decréscimo linear entre as medidas relativas, até alcançar a distância desejada entre eles. Porém, nesta abordagem, ainda persistem frequentes chaveamentos, que refletem em desconforto pelos trancos de aceleração nas trocas de controladores, vista a reta pontilhada decrescente de chaveamento na Figura 17b.

Motivados pelo problema de chaveamentos excessivos, Haspalamutgil e Adali (2017), empregaram uma distância relativa de base L_0 (maior que distância relativa desejada), criando um outro limiar para a decisão de troca de técnicas, dado pela reta horizontal “reta de chaveamento” na Figura 18a. Desta forma, estando abaixo deste L_0 , o modo de controle de distância entra em ação e não gera diversas trocas, quando o ACC está trabalhando próximo da distância desejada, que é menor que L_0 . Um outro modo de realizar a aproximação, é proposto por Zhai et al. (2011), que propôs uma relação parabólica entre distância e velocidade relativas, baseada em desaceleração constante no momento da aproximação, como apresentado na Figura 18b, que visa formar o comboio da forma mais célere que o trabalho anterior. Estes dois trabalhos que acabaram de ser citados, com estratégia baseada em distância-velocidade, serão discutidos com mais considerações a frente.

A terceira forma em se definir qual controlador do ULC utilizar, baseia-se em distância-velocidade-aceleração. Zhenhai et al. (2016) aplicou esta técnica com intuito de suavizar as oscilações abruptas de aceleração e desaceleração provocadas pelas trocas de controles, com limites para eles que não devem ser ultrapassados. Liu et al. (2020), argumenta que existem avanços em relação ao método de distância-velocidade, mas nada com grande disparate. Porém, com base em segurança, este método, jamais alcançou nas simulações uma distância medida abaixo da distância desejada, demonstrando maior segurança no sistema. Pois isto representa que o carro seguidor não chegou mais perto do que deveria do veículo líder.

De forma a expor o que fora encontrado neste estudo para técnicas de manejo do ULC no ACC, existe uma forma interessante apresentada no trabalho de Kin et al. (2009) que vai no sentido de não haver chaveamentos. Para evitar o chaveamento entre controle de velocidade e distância, foi aplicado a ideia de um veículo líder virtual, simplificando a arquitetura do ACC. Desta forma, o sistema fica todo o tempo com o controlador de distância relativa, tendo ou não veículo mais lento à sua frente. Portanto, na ausência de um veículo à frente, emula-se um veículo virtual na liderança da via e o ACC sempre entende que deve ficar no controle de distância, então não é necessário chaveamento algum e nem modo CC no ACC.

Figura 18 – Diagramas R-R' de (a) aproximação linear. (b) aproximação com desaceleração constante



Fontes: Adaptado de Mendes (2020); Zhai et al. (2011).

3.6 APROXIMAÇÃO LINEAR E QUADRÁTICA

Pela estratégia posição-velocidade ser popular e aplicada em casos reais, como no trabalho apresentado por Widmann et al. (2000), que utiliza este procedimento em aplicação da empresa Delphi, selecionou-se os trabalhos de Zhai et al. (2011) e de Haspalamutgil e Adali (2017) para a simulação, análise e comparação aqui presentes. O ponto de interesse é o momento de aproximação em si, motivado pelos estudos relativos à economia de combustível com direção ecológica (NANNI et al., 2019) e de perfis de velocidade (MENDES, 2020) que realizam a análise do todo, mas não incluem a fase de aproximação como oportunidade de economia de combustível.

As duas aplicações têm em comum a determinação da distância desejada R_{des} entre os veículos, que é realizada pela geometria de formação CTH, que é muito importante para robustez e estabilidade de comboio (RAJAMANI, 2012). É utilizada uma lei que mantém o tempo de separação constante, portanto esta distância está baseada na velocidade do veículo precedente (v_p) multiplicado pelo tempo de separação (t_h), representado pela equação 12. A escolha da velocidade que define R_{des} ser do elemento seguidor ou precedente é discutida por Zhai et al. (2011), chegando à conclusão de utilizar o valor do precedente, por ele ser o elemento de comparação para o seguidor se alinhar. Outra igualdade, um dos limitantes para formar um comboio, é a velocidade máxima determinada pelo CC, pois o veículo nunca irá ultrapassar esta velocidade. Portanto, estando equipado com este ACC, só será possível formar e manter o comboio, com elementos que trafeguem a sua frente em uma velocidade inferior à sua de

cruzeiro. Para fins de comparação utiliza-se o mesmo esquema de Haspalamutgil e Adali (2017), com controlador PI (Proporcional Integral) para controle de velocidade, um controlador equivalente ao proporcional no momento de aproximação e para o CTH é uma estrutura do tipo PI também.

$$R_{des} = v_p t_h \quad (12)$$

Discorrendo sobre o método utilizado por Haspalamutgil e Adali (2017), sua intenção foi no sentido de evitar o chaveamento excessivo dos controladores na aproximação. Para tal, é determinado uma distância L_0 do veículo à frente maior que a distância desejada (R_{des}) para comboio, que aciona o controle de distância até finalizar a aproximação. Com este limiar, para não ocorrer uma busca abrupta do sistema pela distância desejada, tem-se uma referência temporária (reta \overline{BC} até o R_{des} na Figura 18a que faz o sistema seguir esta referência transitória (R_{t1}), na forma de uma reta no plano $R - \dot{R}$, de maneira a realizar a transição de forma suave, definida pela equação 13, onde T é o coeficiente de reta que determina sua inclinação. Assim que alcançada a distância desejada, a referência transitória é descartada, e cria-se uma zona perto do equilíbrio onde a referência é apenas a R_{des} .

A receita utilizada por Zhai et al. (2011) é feita para realizar uma desaceleração constante no veículo seguidor, que se aproxima do veículo líder (ou precedente) para formar o comboio, de maneira a realizar a manobra mais rápido do que a aproximação linear. Esta técnica se apresenta na forma de uma parábola no diagrama $R - \dot{R}$, como na Figura 18b. Nos cenários analisados, o veículo vem em velocidade constante determinada pelo controle de cruzeiro (seguimento \overline{AB}), quando encontra a curva determinada pela equação 14, onde D é o coeficiente de desaceleração, chaveia para o controle de distância e segue está nova referência temporária. Chegando ao equilíbrio, volta a ter apenas a referência R_{des} e, como a técnica anterior, também possui uma região de equilíbrio, ou zona morta, que mantém o controle de distância apenas com R_{des} .

$$R_{t1} = -T\dot{R} + R_{des} \quad (13)$$

$$R_{t2} = \frac{\dot{R}^2}{2D} + R_{des} \quad (14)$$

Observando as equações 13 e 14, fica claro a denominação de aproximação linear e quadrática. Nestas, é possível ajustar o ímpeto da ação através de seus coeficientes, os quais serão ajustados para que as comparações sejam justas.

3.7 SEGURANÇA E CONFORTO EM VIAGEM

A utilização do ACC é realizada em veículos comerciais e de passeio, cada qual com seus requisitos, mas a segurança e o conforto na sua atuação, são sempre pensados, mesmo que a posteriori. A segurança envolvida, em um sistema que atue na dinâmica longitudinal de um veículo, sempre leva em conta os momentos de possível colisão com outros elementos na pista e com zonas que não devem ser invadidas, indicando perigo na manobra. O Conforto é uma condição mais abrangente em nossa percepção, pois envolve a facilidade de utilização do ACC e a maneira que percebemos o comportamento em suas manobras, respeitando as sensações durante uma movimentação, em possíveis mudanças abruptas na velocidade e aceleração. Portanto, estes são assuntos que viabilizam a utilização efetiva do ACC nos veículos, caso contrário a tecnologia não é aceita pelos usuários, por desconforto e/ou perigo de utilização.

Relativo à segurança, como já visto na seção 3.4 (Figura 17) pelo diagrama $R - \dot{R}$, seus quadrantes trazem informações importantes, do que se deve ter cautela, no movimento que as variáveis do comboio devem apresentar ao longo do tempo (FANCHER; BAREKET, 1994). Porém, no trabalho de Liu et al. (2020), que são apresentados diversos casos de como tratar a fase de aproximação do comboio, é entendido como bom desempenho de segurança, quando os elementos do comboio não reduzem sua distância além da distância relativa desejada ($R \geq R_{des}$), o que é, por exemplo, aceitável com Fancher e Bareket (1994).

Estudos sobre critério de conforto com ACC são escassos, mas os poucos existentes caminham no sentido de avaliação e comparações das mudanças bruscas das condições de viagem (MARTINEZ; CANUDAS-DE-WIT, 2007). Então, mudanças abruptas na velocidade e aceleração, causam mal-estar ao motorista e passageiros. Com base nisto, Liu et al. (2020), utiliza, como parâmetros para a análise de conforto, a aceleração (m/s^2) e a taxa de variação da aceleração (m/s^3), considerado como tranco (jerk) que ocorre no carro quando se acelera de forma repentina. Comumente, o valor de aceleração (positiva e negativa) está atrelada a capacidade do veículo e condições de segurança, como derrapagem na frenagem, sendo valores limitantes comuns em caminhões de $1m/s^2$ a $-2m/s^2$ (MENDES, 2020), mas existem trabalhos com maiores restrições, como o de Zhenhai et al. (2016), que se limita abaixo de $|1m/s^2|$. No entanto, o tranco da aceleração é a verdadeira variável a ser limitada, em Martinez e Canudas-de-Wit (2007) é apresentado um limite de $\pm 2 m/s^3$, como parametrização ao requisito de conforto. Isto, baseado em estudos sobre passageiros no transporte público, este valor também é utilizado por Liu et al. (2020) e será utilizado neste trabalho.

O trabalho de Htike et al. (2020), versa sobre planejamento de movimento para veículos com direção autônoma, com minimização do enjoo na viagem. Com foco em técnicas de controle ótimo, é apresentada uma forma de inserir uma função que relaciona o enjoo, na função custo a ser minimizada. Utiliza-se da função, que mensura a valor da dose de enjoo total (MSDV – Motion Sickness Dose Valeu) (equação 15), que conta com as variáveis ponderadas $a_{x,w}$ e $a_{y,w}$. Que são as acelerações longitudinal (a_x) e lateral (a_y), ponderadas por W_f (equações 16 e 17). Os valores de W_f , são retirados de Donohew e Griffin (2004), e T é o período total do percurso. Então, tem-se a predição da taxa de mal-estar, IR (predicted illness rating) (equação 18), que é a variável a ser minimizada no problema de controle ótimo. O IR é determinado pela multiplicação simples do MSDV pela constante empírica K , esta constante ($K = 1/50$) foi gerada através de estudos de enjoos em navios e rodovias (LAWTHER; GRIFFIN, 1986; LAWTHER; GRIFFIN, 1988; TURNER; GRIFFIN, 1999; TURNER, 1999), baseada em estudos de campo, com formulários preenchidos por passageiros em diversas situações, em uma viagem completa.

$$MSDV = \sqrt{\int_0^T (a_{x,w}(t))^2 dt} + \sqrt{\int_0^T (a_{y,w}(t))^2 dt} \quad (15)$$

$$a_{x,w}(t) = a_x(t) \cdot W_f \quad (16)$$

$$a_{y,w}(t) = a_y(t) \cdot W_f \quad (17)$$

$$IR = K \cdot MSDV \quad (18)$$

Existe uma escala deste termo IR (HTIKE et al., 2020), que é dividido em quatro níveis: 0 (zero) passageiro se sente bem; 1 (um) passageiro com ligeiro desconforto, enjoo inicial; 2 (dois) passageiro bem doente, nível excessivo de enjoo; 3 (três) estado absolutamente terrível. No entanto, visando o conforto, não é determinado um valor mínimo ou máximo, pois a ideia é minimizar até onde for possível o valor de IR . Os níveis supracitados, ficam como uma referência, pois o tamanho do percurso e período T de viagem podem ser modificados, e esse valor (a minimizar) irá se transformando (aumentando ou diminuindo). Por isso, segundo Htike et al. (2020), a minimização desta taxa de mal-estar, é o que conta e não um valor pré-definido. Um ponto importante para as restrições neste problema de controle ótimo, é que deve ser imposta uma velocidade mínima, 10 m/s em Htike et al. (2020), caso contrário a minimização levará o sistema ao repouso.

Existem pontos a notar em relação ao conforto. Primeiro, a limitação do tranco (variação da aceleração), consequentemente, irá refletir em limitação na aceleração do sistema. Portanto,

os limites de aceleração são determinados pelas capacidades do veículo e o limite de tranco é imposto pela necessidade de conforto. Para medida de IR , o importante é minimizar esta medida de enjoo em viagem e não ter um valor máximo e/ou mínimo de trabalho. Outro ponto, é que o conforto é algo baseado na percepção humana, nos trabalhos de ACC se utilizam o tranco (jerk) como base, (MARTINEZ; CANUDAS-DE-WIT, 2007; ZHENHAI et al., 2016; LIU et al., 2020), ao fim, trazem conclusões baseadas em comparações de alguns sistemas testados, de qual controlador gerou mais ou menos trancos, concluindo qual obteve melhores ou não tão bons resultados, relativo à sensação de conforto dos integrantes da viagem, tudo por comparação. Já no trabalho de Htike et al. 2020, as comparações de controladores também estão presentes, porém existem parametrizações baseados em experimentos de campo (LAWTHER; GRIFFIN, 1986; LAW THER; GRIFFIN, 1988; TURNER; GRIFFIN, 1999; TURNER, 1999), que conduzem a conclusões com alicerces palpáveis, com parâmetros além de comparações. Estas parametrizações visando conforto, serão explorados no presente trabalho, para uso em apenas uma dimensão (longitudinal), com ACC a ser desenvolvido.

3.8 MODEL PREDICTIVE CONTROL

A questão em foco é a de realizar um ACC, que alcance diversos requisitos simultaneamente, mais que isso, que os requisitos sejam levados em consideração no momento de projeto. Como visto anteriormente, em muitos casos os resultados de atendimento a requisitos, são verificados somente na fase de testes e não no momento do projeto. Portanto, para cobrir os requisitos no momento de projeto, e então, analisar se foram alcançados de forma satisfatória, deve ser escolhida técnica que realize isto. Metodologias baseadas em controle ótimo se encaixam nesta tarefa, por tratar de diversas restrições simultaneamente, em seus cálculos, para gerar o resultado ótimo de controle. A técnica de controle preditivo baseado em modelo (MPC – Model Predictive Control), é fundamentada em controle ótimo, ela realiza seus cálculos ótimos, prevendo os próximos passos do sistema, baseando-se em modelo da planta, em um determinado horizonte à frente. Então aplica-se o controle ótimo calculado para o instante atual, no próximo instante de tempo, realiza-se o mesmo procedimento, conseguindo consertar o processo em presença de distúrbios. Diferente do controle ótimo por si só, o MPC realimenta as informações e recalcula tudo novamente, em cada instante de tempo do controle, com uma espécie de controle ótimo recursivo.

Um problema que busca a minimização, ou maximização, de uma função matemática, com determinadas variáveis e sujeita a uma série de restrições, forma uma classe especial de

problema, que pode ser intitulada de problema de otimização (SARKER; NEWTON, 2007). Venkataraman (2009) diz que otimização é, em essência, a busca pelo melhor objetivo quando operando com uma série de restrições. Um problema de otimização, pode ser interpretado, como uma extensão do problema de programação matemática, com número infinito de variáveis (BETTS, 2010). Ela é quem sustenta esse processo em busca de otimizar (maximizar ou minimizar) uma determinada função problema, cercada por restrições. A programação linear (LP – Linear Programming) é uma das técnicas básicas e pioneiras usadas em otimização (SARKER; NEWTON, 2007), existindo também, a programação quadrática (QP - Quadratic Programming) e a programação não linear (NLP – Nonlinear Programming), cada uma com suas possibilidades de aplicações, referentes ao tipo de problema e seus pontos fortes e fracos referente à busca por soluções ótimas. A apresentação padrão, de um problema de otimização, está representada nas equações 19, 20, 21, 22 a seguir.

$$\min_{x_1, x_2, \dots, x_n} J = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (19)$$

Sujeito as restrições:

$$h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (20)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

$$x_i^{low} \leq x_i \leq x_i^{up}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

As equações expressas em linguagem natural: minimize a função objetivo f (equação 19), sujeita a l restrições de igualdade (equação 20), m restrições de desigualdades (equação 21), com as n variáveis de projeto entre os limites, inferior (x_i^{low}) e superior (x_i^{up}) (equação 22) (VENKATARAMAN, 2009). A função objetivo, ou função custo, possui o equacionamento de importância a ser otimizada em um sistema, um exemplo neste trabalho, é colocar como função custo, a representação de gasto de combustível do veículo como tal função, pois queremos realizar um certo percurso com o menor gasto de combustível possível. Como restrições de igualdade e desigualdade, podemos incluir, a dinâmica do veículo, onde ocorrem as limitações dinâmicas, como vencer a resistência do ar, resistência a rolagem, dinâmica na formação do comboio em relação ao arrasto etc. Um problema de otimização com restrições dinâmicas, é dito problema de controle ótimo. Tudo isso, acarretará equações de igualdade ou desigualdade, que vão cercando a função custo, onde ela pode ou não chegar, nas possibilidades de resolução. Junto com estas, para os limites, superior e inferior, das variáveis de projeto, teremos valores como, limite máximo e mínimo de aceleração do veículo, potência

máxima entregue pelo motor, saturação de valores de velocidade (limite da via), limitações de potência do veículo, limites de gasto instantâneo, grosso modo são os limites dos valores, físicos ou impostos, que as variáveis de projeto podem apresentar. Com tudo isto, é realizada a parte de programação matemática, via LP ou QP ou NLP ou outra técnica de busca de resultado, para encontrar o resultado ótimo que satisfaça todas as restrições do problema.

O controle ótimo tradicional, realiza seus procedimentos com numerosas etapas recursivas, para chegar em uma solução ótima da série temporal das entradas de controle da planta ao longo do tempo, para alcançar o objetivo projetado. Dentre diversos pontos, um deles para sistemas dinâmicos, é a imprevisibilidade de acontecimentos de mudanças de cenário, seja por distúrbios ou decisões distintas ao longo do percurso. O MPC é uma técnica que se utiliza de controle ótimo e da predição dos passos futuros, baseado em modelo matemático do sistema e, recursivamente, recalcula todo o controle, com base nos novos dados captados da planta, que demonstraram o caminho atual que o sistema está seguindo.

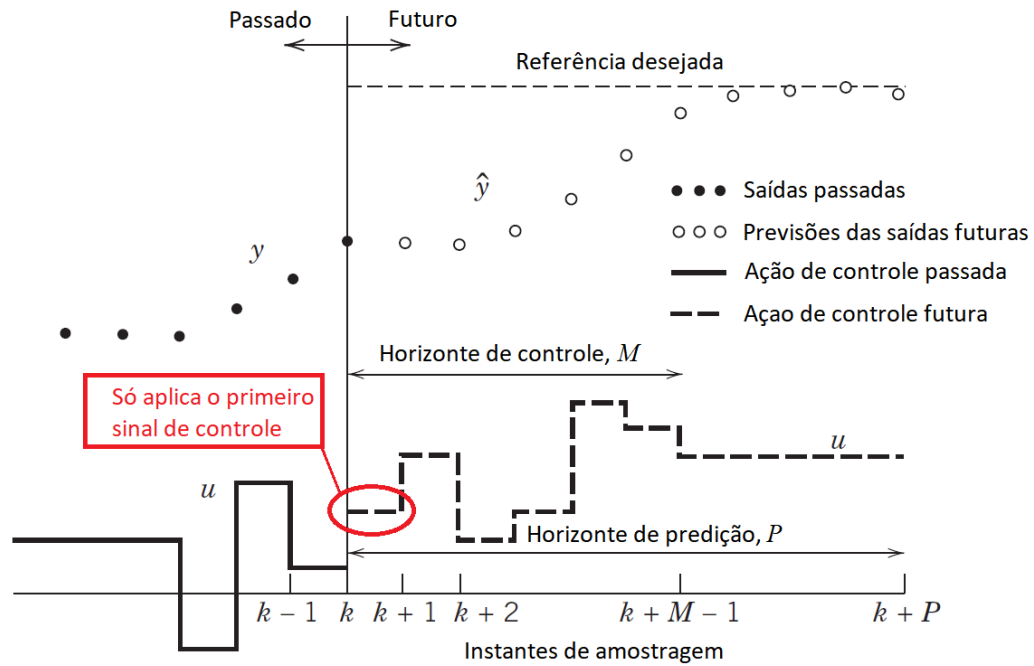
Segundo Seborg et al. (2016), o MPC oferece certas vantagens: (1) o modelo do sistema capta as interações entre as variáveis de entrada, saída e perturbações; (2) as restrições das entradas e saídas são consideradas de forma sistemática; (3) os cálculos de controle podem ser coordenados com base em cálculos de referências desejadas ótimas; (4) previsões precisas do modelo podem oferecer avisos antecipados de situações potencialmente problemáticas. Obviamente, o sucesso do MPC fica a cargo de um bom e preciso modelo do sistema, caso contrário, teremos previsões imprecisas que acarretarão um controle impreciso. Alguns objetivos de um MPC (SEBORG et al., 2016) são, evitar descumprir as restrições de entrada e saída; controlar certas variáveis de saída à sua referência desejada, mantendo outras saídas dentro das faixas especificadas pelas restrições; evitar deslocamentos excessivos das variáveis de entrada; e controlar o máximo possível de variáveis do processo, na ausência de algum atuador ou sensor do sistema.

O objetivo geral de um MPC SISO é calcular a trajetória futura de uma variável manipulada, para otimizar o comportamento futuro de uma variável de saída da planta (WANG, 2009). A otimização é realizada em uma janela de tempo limitada, com as informações do processo no tempo inicial desta janela, aplicando ao sistema a primeira variável de controle e, no próximo instante de tempo, então refaz todo o processo. Portanto, como visto na Figura 19, existe a variável de saída do sistema y com seu valor atual no instante k e os passados (pontos pretos), a variável manipulada u de controle (linha contínua preta), todos pertencentes ao passado. No futuro estão, a predição da saída do sistema \hat{y} (pontos brancos), que é calculada por todo horizonte de predição com P passos no futuro, a variável manipulada u (linha tracejada

preta) que possui um horizonte de controle com M passos (menor que P) e após ele, se mantém estática até o fim do horizonte de predição. Portanto, o MPC capta os valores das variáveis, faz as contas de otimização com a janela definida pelo horizonte de predição, utilizando-se do modelo para tal, para a variável de saída chegar à referência desejada, então de posse do vetor de controle u gerado, aplica-se o primeiro controle ao sistema (de k até $k + 1$). No próximo passo estaremos, como exemplo ao exposto na Figura 20, em uma situação que não necessariamente é aquela prevista pelas contas, então uma nova leitura do sistema é realizada e novas contas serão realizadas de maneira ótima, para alcançar a referência desejada dentro do horizonte de predição, respeitando todas as restrições, então aplica-se novamente apenas o primeiro valor de controle, agora em $k + 1$, e assim sucessivamente ao longo do tempo.

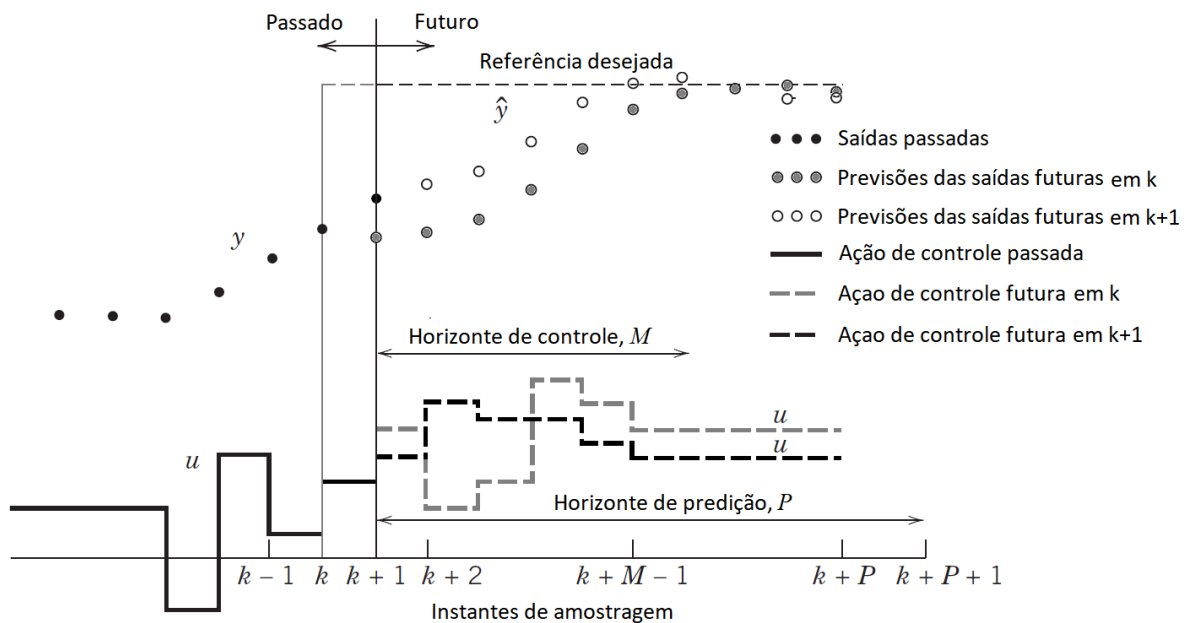
Portanto, existem pontos importantes a definir para a aplicação do MPC, aqui serão expostas maneiras baseadas no apresentado por Seborg et al. (2016) e em seção do site da Mathworks (2020). O primeiro passo é a definição do período de amostragem T_s do sistema. Deve-se ter uma quantidade de 10 a 20 amostras, dentro do tempo de subida, da resposta ao degrau em malha aberta da planta em estudo (Figura 21), para ter definição suficiente da sua dinâmica com as amostras. Também baseado na resposta em malha aberta, o horizonte de predição deve conter o tempo de acomodação da resposta do sistema (Figura 22), assim tendo toda a dinâmica em sua visão futura, o que acaba sendo de 20 a 30 períodos de amostragem ou nós do sistema. O horizonte de controle é determinado de 10% a 20% do horizonte de predição, isto porque apenas os primeiros controles possuem efeitos de mudanças relevantes no sistema (Figura 23). Após os M nós do horizonte de controle, é feito o chamado *Input Blocking* (SEBOR, 2016), deixar fixo o valor da variável manipulada até o fim do horizonte de predição (Figura 24). Por fim, vale dizer que no problema de otimização podem ser inseridas restrições de igualdade, desigualdade e limites para o problema, como qualquer caso de controle ótimo.

Figura 19 – Conceito básico do MPC, no instante inicial k



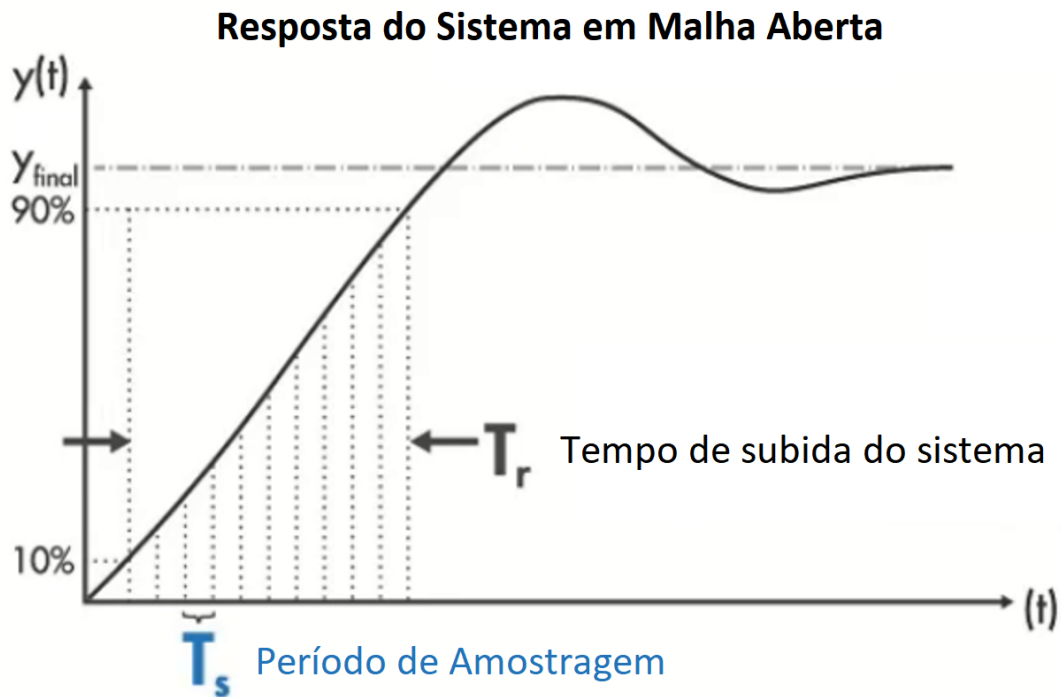
Fonte: Adaptado de Seborg et al. (2016)

Figura 20 – Conceito básico do MPC, no instante $k+1$



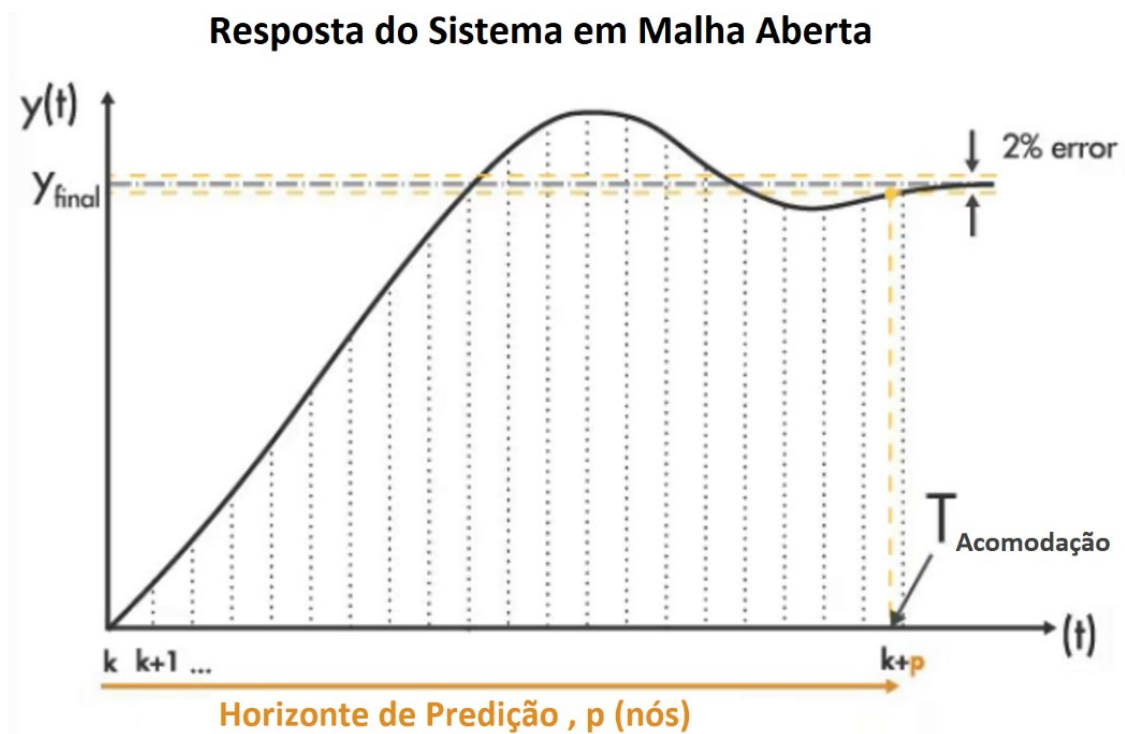
Fonte: Adaptado de Seborg et al. (2016)

Figura 21 – Definição do período de amostragem para o MPC



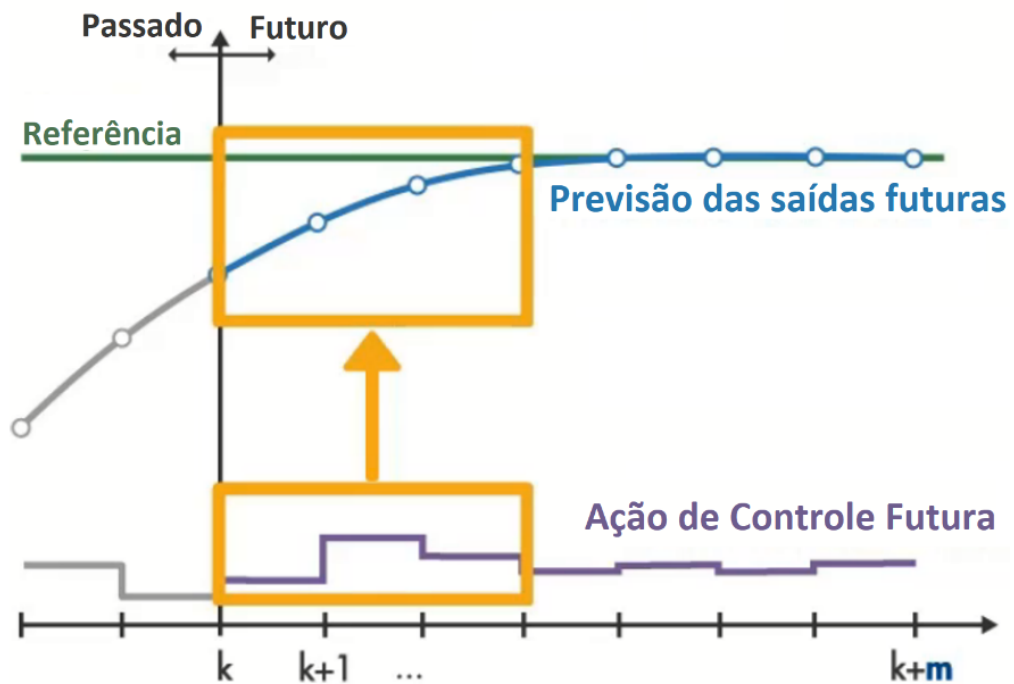
Fonte: Adaptado de Mathworks (2020)

Figura 22 – Definição do horizonte de predição para o MPC



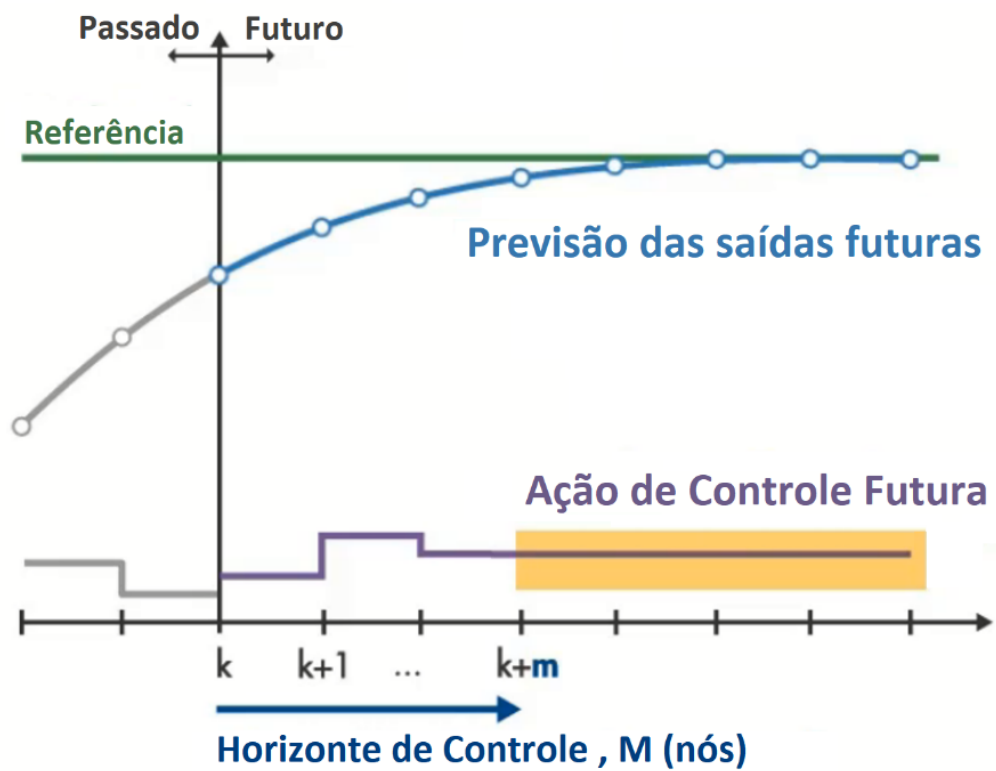
Fonte: Adaptado de Mathworks (2020)

Figura 23 – Influência da ação de controle na saída do sistema



Fonte: Adaptado de Mathworks (2020)

Figura 24 – Definição do horizonte de controle para o MPC



Fonte: Adaptado de Mathworks (2020)

3.9 IMPLEMENTAÇÃO DO MPC

Foi apresentada na seção anterior a base do MPC que se pode entender, grosso modo, como fechar a malha de um sistema que esteja trabalhando com Controle Ótimo, visto que de forma recursiva, o sistema está sempre recalculando seu trajeto ótimo, para consertar perturbações que possam ocorrer no caminho. A utilização da técnica de Controle Ótimo tem sua complexidade e desafios para realizar a convergência dos cálculos ao resultado ótimo, o que pode demandar tempo para ajustes no sistema, nos cálculos e nos diversos testes, até que se obtenha a convergência e resultados pretendidos, resultando em uma resposta ótima (BETTS, 2010). Esta tarefa de analisar o sistema e o controlador, equalizando todos os equacionamentos, variáveis, constantes entre outros detalhes, moldou o MPC aqui desenvolvido para o ACC. Com a intenção de expor os principais pontos, temos na subseção 3.9.1 o modelo para a predição, a subseção 3.9.2 explica o algoritmo idealizado e na 3.9.3 é apresentada a formulação do Controle Ótimo utilizado pelo MPC.

3.9.1 Modelo de predição

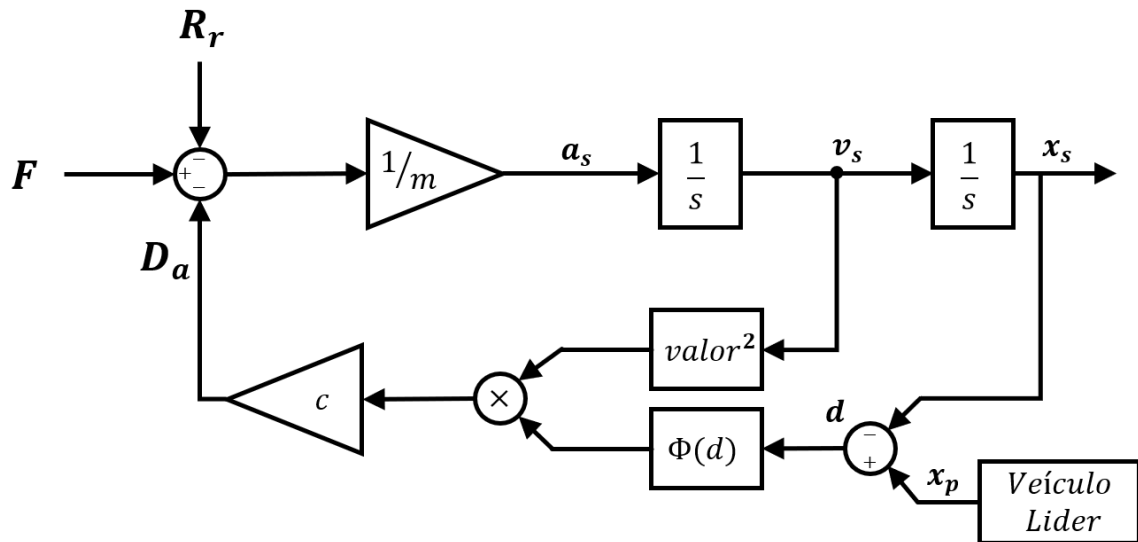
O MPC, por ser um controlador preditivo baseado em modelo, necessita de um modelo da planta para realizar sua predição e controle. No caso de seu uso no ACC, compreende a dinâmica do ULC, lembrando, o LLC cobre o controle do trem de potência, inércias rotativas, reduções, marchas de transmissão e atrito dos pneus como realizado por Luu e Lupu (2019). Portanto, o modelo utilizado para o MPC será aquele já apresentado na seção 3.1 e ilustrado na Figura 12, que é o modelo de ponto material com a força como variável manipulada para o controle longitudinal do veículo.

Este modelo será utilizado para o MPC e simulações deste estudo, com a força como variável de controle. Vale notar o que foi apresentado nas seções 2.2 e 3.3, que a arquitetura comumente esquematizada para o ACC possui a aceleração desejada como variável entre o ULC e o LLC, porém isto não é uma regra (Tabela 1). Entretanto, o controlador utilizado é baseado em programação matemática dinâmica, assim temos acesso a todas as variáveis calculadas e não será obstáculo obter o valor da aceleração do sistema controlado.

Deste modo, para o desenvolvimento deste MPC será considerado a utilização da força de tração como variável manipulada e com o LLC trabalhando de forma ideal. Assim, a dinâmica a cargo do MPC se restringe ao desenvolvido na seção 3.1, onde o sinal de controle gerado pelo controlador preditivo será a força de tração F e considerando o controlador de baixo

nível ideal. Para finalizar o modelo de predição, deve ser adicionado um modelamento do veículo líder, para poder prever o andamento da distância interveicular. Em vista disto, foi determinado um veículo precedente com velocidade constante e distância interveicular inicial medida no início do loop. Resultando no diagrama da Figura 25.

Figura 25 - Modelo de predição



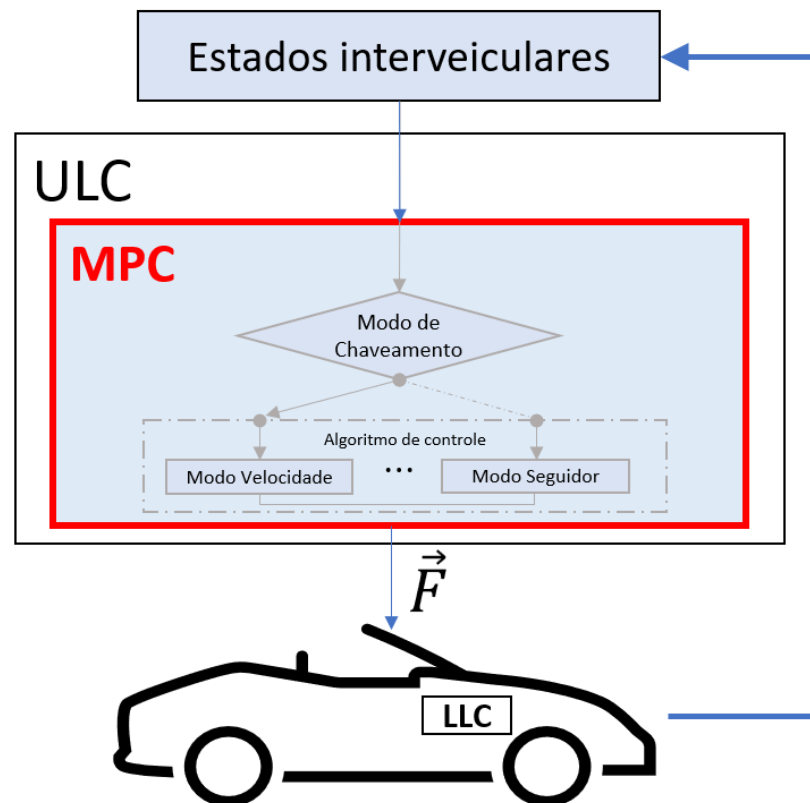
Fonte: Autor

3.9.2 Algoritmo

Para o ACC com o MPC, por ser a aplicação do Controle Ótimo de forma recursiva, necessitamos de certos cuidados extras, para quando o sistema não convergir ao ótimo. Pois, o sistema está acontecendo e evoluindo de forma dinâmica, não podendo ser congelado, para tratar uma possível não convergência do controle, tem que acontecer alguma opção razoável de ação de controle que mantenha o sistema controlado e rodando.

O fluxograma base do ACC para a execução do MPC proposto, está descrito na Figura 26. Como já exposto e considerado por diversos autores supracitados, no ULC está considerado o tratamento das dinâmicas veiculares de baixo nível e o MPC está alocado no ULC, tratando do controle de alto nível, decidindo atuar em modo de velocidade ou seguidor.

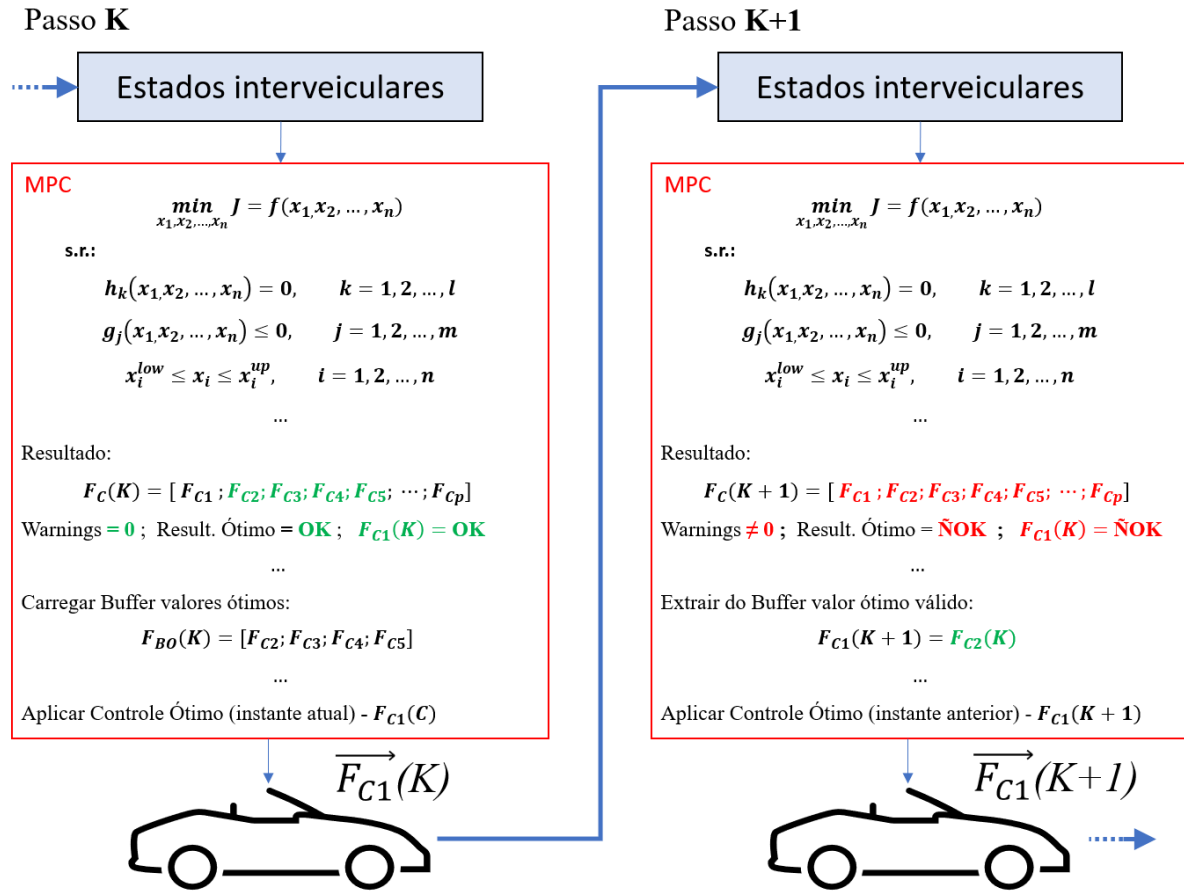
Figura 26 - Fluxograma base do ACC com MPC



Fonte: Autor

O MPC ocorre a intervalos fixos e constantes, para momentos que ocorrem erros ou avisos de que os cálculos podem não ser ótimos, deve-se tomar alguma atitude para contornar tais erros. Para estes momentos indesejados, é aplicada a utilização das ações de controle do ciclo anterior que resultou em resposta ótima. Lembrando que o MPC calcula um horizonte de controle com diversos passos à frente, porém, apenas a primeira ação de controle é aplicada, ocorrendo novos cálculos para o instante seguinte. Assim, nesta implementação, ocorrido um ciclo com êxito na resposta ótima, aplica-se o controle do primeiro passo ao sistema e armazena-se em um buffer uma certa quantidade dos controles futuros ótimos, no caso mais quatro passos do vetor de controle ótimo. Caso o próximo ciclo não seja satisfatório, será descartado o seu resultado e será utilizado o primeiro valor armazenado, que este sim obteve a resposta ótima. Caso os cálculos converjam ao resultado ótimo, repete-se o armazenamento no buffer com os novos valores. Um exemplo desta sequência é ilustrado na Figura 27 e Figura 28.

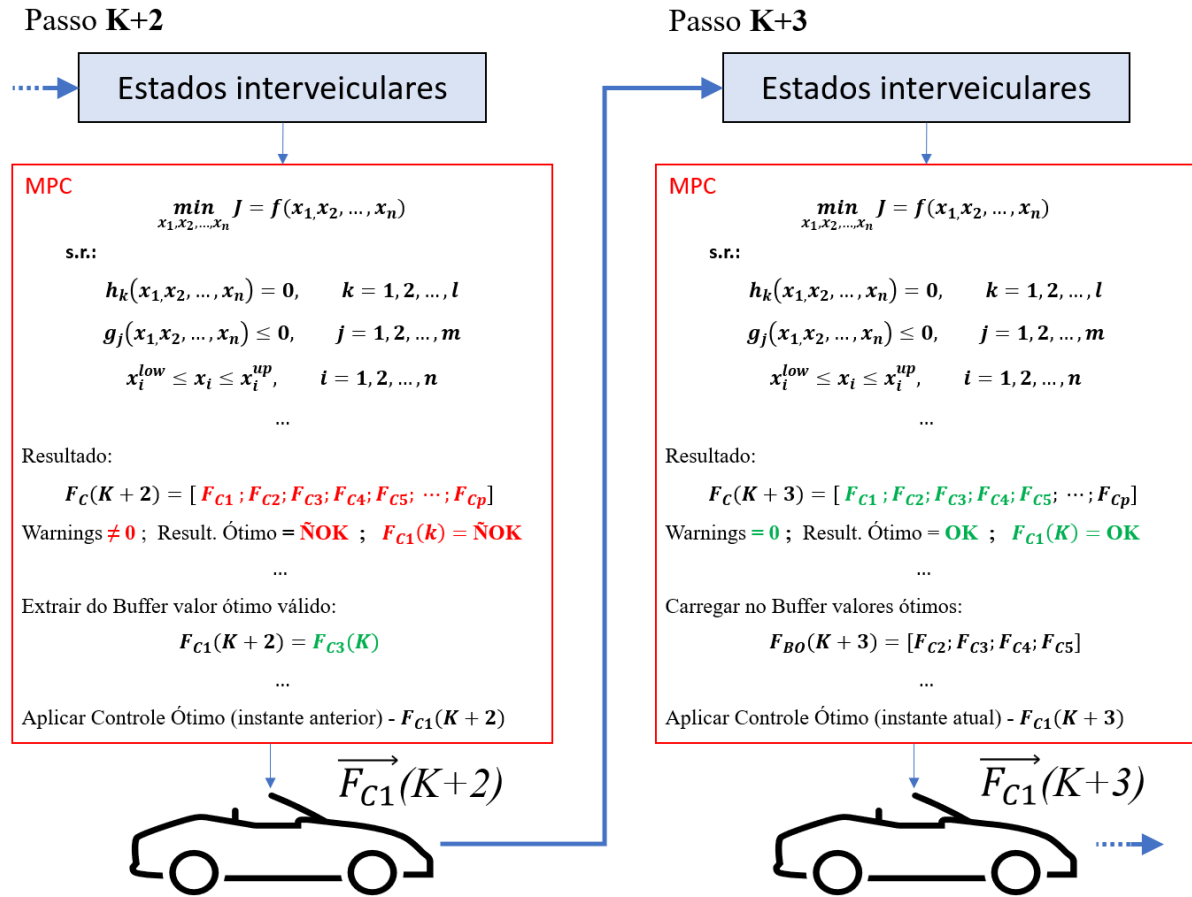
Figura 27 - Passo a passo, K e $K+1$, do MPC na ocorrência de cálculos que não convergem ao ótimo



Fonte: Autor

Neste exemplo, a Figura 27 apresenta os passos K e $K+1$, o primeiro passo realiza os cálculos e converge para um resultado ótimo, sem gerar avisos (*warnings*) de não convergência ou resultado sub-ótimo. Desta forma, se armazena em um buffer ótimo (F_{Bo}) os quatro próximos passos. No instante $K+1$, os cálculos não convergem para um resultado otimizado, gerando avisos desta falha, então a primeira posição do buffer ótimo é carregada como o próximo sinal de controle para o sistema. Os resultados deste passo ($K+1$) são descartados. A continuação vista na Figura 28, tem no passo $K+2$, uma nova ocorrência de não convergência dos cálculos, com a sinalização pelos avisos. Com isto, os resultados destes cálculos são desprezados e o segundo valor do buffer ótimo, terceiro valor calculado no passo k , é extraído para ser o sinal de controle a ser aplicado na planta. Por fim, no passo $K+3$, o sistema converge ao ótimo, carregando um novo buffer ótimo com os valores computados e aplica seu primeiro valor ao veículo.

Figura 28 - Continuação do passo a passo, $K+2$ e $K+3$, do MPC na ocorrência de cálculos que não convergem ao ótimo



Fonte: Autor

Para o desenvolvimento e realização do MPC, será utilizado no software MatLab a plataforma de otimização PROPT (RUTQUIST; EDVALL, 2010) desenvolvida pela TOMLAB (1989), que possui uma série de ferramentas que auxiliam na solução de problemas de otimização. O sistema em estudo tem natureza de um problema de otimização não linear com restrições, se encaixando ao uso do otimizador SNOPT (HOLMSTRÖM; GÖRAN; EDVALL, 2008a), contido nesta plataforma. A escolha por esses softwares, se deu pela disponibilidade desta poderosa ferramenta de otimização e por utilizar o algoritmo SQP (Programação Quadrática Sequencial) que é definido como um método direto. Por ser um método direto, seus cálculos sempre estão em direção a satisfazer as restrições do problema, mesmo nos passos intermediários. Por exemplo, caso ocorra estouro no número máximo de iterações, problemas de precisão ou até um estouro no tempo máximo de execução da otimização, teremos um resultado sub-ótimo que não infringe as restrições e, talvez, possa ser utilizado em último caso (VENKATARAMAN, 2009). O que é muito interessante para o MPC, pensando em sua

utilização em campo, caso o otimizador tenha problemas em terminar as contas em tempo para o próximo passo, um resultado intermediário, apesar de não ser o ótimo, não viola as restrições e poderia ser utilizado.

Dentre outras estratégias para contornar comportamentos indesejados do solver na otimização dentro de um MPC, pode se fazer o uso de restrições mais suaves (soft constraints) no processo de otimização. Restrições suaves, são tipos de restrições que podem ser violadas com determinada penalização ou em certas condições (SARKER; NEWTON, 2007). Essa técnica é útil para o MPC (MATHWORKS, 2020; SEBORG, 2016), pois em determinadas restrições impostas, seus limites podem ser relaxados para se chegar a uma convergência ótima, sem violação da restrição por motivo inerente ao sistema.

Exemplificando uma maneira formal de inserir uma soft constraint, imaginemos uma restrição de aceleração do veículo que deva ter seu limite inferior a -2 m/s^2 (equação 23), que é imposta por questão de conforto na viagem, mas é prevista ou percebida em testes, que em determinadas ocasiões é violada por necessidade de frenagem brusca. Assim, são inseridas variáveis auxiliares a restrição (equação 24), para permitir este escorregamento nas restrições, mas estas variáveis também são adicionadas as restrições (equações 25 e 26) e a função custo (equação 27), para que elas também sejam minimizadas a zero. Em suma, cria-se uma soft constraint, quando se necessita de artifício que afrouxe os limites dessa restrição.

$$a(t) \geq -2 \quad (23)$$

$$a(t) = -2 + (s_1 - s_2) \quad (24)$$

$$s_1 \geq 0 \quad (25)$$

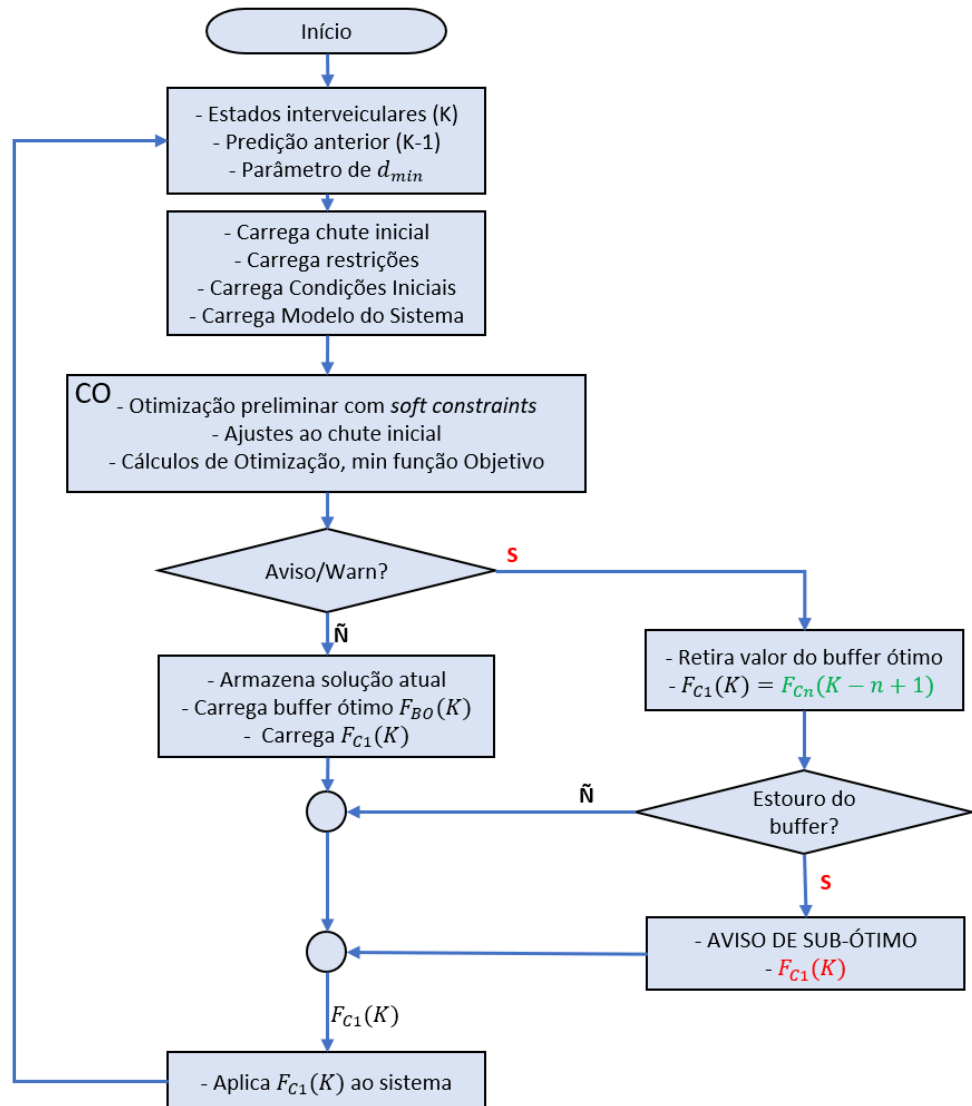
$$s_2 \geq 0 \quad (26)$$

$$\min_{x_1, x_2, \dots, x_n, s_1, s_2} J = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + s_1 + s_2 \quad (27)$$

Este é o meio formal em relaxar restrições, que é a forma de obter certo desvio dos limites imposto durante a otimização, prevenindo violações das restrições perante certas situações, em um loop de controle ótimo. Porém, pela recursividade do MPC, podem ser realizadas outras formas de relaxamento e modificação dos limites das restrições, analisando os estados do sistema no início do loop e modificar esses limites. Como o artifício implementado na distância interveicular, como uma restrição adaptável, que é modificada a partir da análise dos estados do sistema. Esta, por exemplo, que na eminência de se infringir sua restrição, abaixa o limite mínimo em 5%, para manter o algoritmo sem violações, dentro de variação aceitável

desta restrição. Portanto, o fluxograma do algoritmo, do MPC realizado, está exposto na Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma do algoritmo do MPC realizado



Fonte: Autor

Seguindo do início do fluxograma da Figura 29, quando iniciado um novo ciclo, são carregadas as informações dos estados do veículo, valor para o limite mínimo da restrição adaptável da distância interveicular (d_{min}) e a predição (ou solução) anterior do Controle Ótimo, com tamanho do horizonte de predição, que será utilizada como chute inicial na tentativa de facilitar o trabalho do otimizador. Então, são preparados e organizados os dados, de forma que a ferramenta entenda, carregando o chute inicial, as restrições, condições iniciais e o modelo do caminhão em estudo. Com tudo parametrizado, o otimizador entra em ação. O

PROPT realiza uma otimização preliminar, com todas as restrições relaxadas (*soft constraints*) e sem a função objetivo, com o intuito de verificar a viabilidade das restrições impostas e ajustar possíveis parâmetros, como o chute inicial. Este esforço, é uma tentativa de obter convergência na otimização, para a minimização da função custo. Após todas estas preparações, o SNOPT realiza a otimização, minimizando a função custo.

Ao término da otimização, é verificada a ocorrência de avisos (*warnings*) e erros do otimizador, caso não tenham ocorrido, o primeiro controle ($F_{C1}(k)$) é aplicado no caminhão, começando um novo ciclo de cálculos. Com a ocorrência de erros, é retirado do buffer ótimo o valor do sinal de controle, do último ciclo com êxito, para ser aplicado a planta. Porém, como este buffer ótimo é finito, é verificada se essa requisição de valor do buffer, está além dos dados armazenados e, em caso de estouro do buffer, é apresentada uma mensagem de aviso na tela de comandos do MatLab e é aplicado o valor com *warnings*, calculado neste ciclo. Uma proposta futura, que poderia ser implementada, seria ter um controlador tipo PID de segurança rodando em segundo plano, que entraria em ação no momento do estouro do buffer ótimo, devolvendo o comando ao MPC em um próximo ciclo com êxito do otimizador.

Pormenores importantes no solver SNOPT, utilizado pelo PROPT da TomLab, em relação aos avisos e erros. Os erros que são apresentados pelo solver, ocorrem da má formulação do problema, parametrização equivocada, entre outros pontos estruturais na formulação do problema e uso das diversas funções que a *software* possui (RUTQUIST; EDVALL, 2010), pontos a serem depurados na fase de criação do Controle Ótimo, anteriores a concepção do algoritmo do MPC. Em relação aos *warnings*, por ele utilizar o algoritmo SQP, dentro das possibilidades de respostas de *warnings* do SNOPT, o valor final concebido não será o ótimo, mas tenderá a ser um valor sub-ótimo, o que não é totalmente descartável, apesar de não desejado (HOLMSTRÖM; GÖRAN; EDVALL, 2008a).

Com relação ao uso de um valor gerado com avisos do otimizador, o que não parece razoável, se faz importante entender o tratamento que se realiza com o Controle Ótimo puro e seu uso em um MPC. Procedimento comum ao uso de Controle Ótimo, quando se configura como um controle em malha aberta, visando obter todos os valores ótimos de controle, para então aplicá-los a um processo finito. Caso ocorram avisos do otimizador, é necessária análise dos pontos a melhorar e modificar, até se alcançar a resposta ótima, obtendo convergência. Para a geração do MPC, estes passos de depuração do Controle Ótimo são realizados, com muitos testes e cenários que possam cobrir parte dos eventos possíveis de acontecer, mas não é possível garantir que as infinitas possibilidades de eventos estejam imunes aos avisos do algoritmo.

Porém, pela realidade recursiva do MPC, caso um resultado sub-ótimo imponha resposta inadequada, no próximo ciclo o MPC poderá se consertar e voltar a gerar a saída ótima.

Por conta da ferramenta de controle ótimo escolhida (PROPT) e, por não ser escopo deste trabalho, existem pontos adaptados e ajustados para esta implementação. Os parâmetros do MPC foram definidos com seus horizontes de controle e predição com valores iguais, visto que a diminuição do horizonte de controle é realizada para poupar esforços computacionais (SEBORG, 2016). O sinal gerado pelo controlador e aplicado a planta, não é um valor constante por todo período (seção 3.8), sendo um sinal variante no tempo devido ao PROPT. O período do passo (loop) de recorrência do controlador está em um segundo (1s) e o horizonte de predição é de trinta e seis segundos (36s), este valor do horizonte foi influenciado pela capacidade de controlar certas variações do sistema. Janelas menores geraram erros por não “enxergarem” toda a dinâmica de transição em seu período de predição, sendo um dos pontos importantes do horizonte de predição, conter toda dinâmica da planta dada uma mudança até sua acomodação (SEBORG, 2016). Por fim, não há a intenção de embarcar em hardware de tempo real o algoritmo aqui apresentado, este que necessita de grande poder computacional e tempo maior que o real para realizar os cálculos. Uma saída possível, é a apresentada por Oliveira, Barros e Lima (2021), em que a implementação em tempo real de um MPC não linear, é realizada através de redes neurais artificiais, que emulam a otimização necessária ao MPC, diminuindo sensivelmente o custo computacional.

3.9.3 Formulação do Controle Ótimo

A formulação do Controle Ótimo, que irá guiar a otimização em cada ciclo do MPC, com as diversas restrições e as funções custo, cobrindo os objetivos levantados e pretendidos neste trabalho. Como exposto nas seções anteriores, existem dois grandes momentos para o ACC, que acarretam uma função custo com duas equações (equação 32), que se diferem pela primeira parcela (equações 28 e 29). A parte superior da equação 32 é minimizada em relação ao controle de velocidade e a parcela inferior é otimizada para o controle de distância. A decisão de troca entre elas ocorre no limite L da distância interveicular. O segundo termo da equação 32, refere-se ao conforto em viagem, visto na seção 3.7, e como temos apenas o movimento longitudinal, fica apenas um termo da aceleração (equação 30). O terceiro termo contempla o consumo de combustível (equação 31), já exposto na seção 3.2. Portanto, estas equações, serão

minimizadas de maneira ótica visando o consumo de combustível, conforto no trajeto e, a depender da situação, controlando a velocidade ou a distância interveicular.

As restrições também possuem sustentação ao que já fora exposto nas seções anteriores. A restrição de velocidade (equação 33) tem seu limite inferior em 5m/s e o limite superior em v_{ref} , ficando limitada a velocidade de cruzeiro escolhida pelo motorista. Observando que em Htike et al. (2020) é utilizado limite inferior de 10m/s, porém os diversos testes realizados mostraram que em condição de frenagem do veículo precedente (seção 4.5), ocorrem diversos erros e o controlador se perde. A restrição de potência (equação 34) é limitada pela potência máxima que o caminhão em estudo pode proporcionar e o limite mínimo baseado em Nanni (2020). As restrições de aceleração (equação 35) e de tranco (equação 36), possuem lastro no que foi apresentado na seção 3.7. Por último, a restrição adaptável de distância interveicular (equação 37) tem limite mínimo definido pela equação 38, que é determinado por CTH porém, na eminência de ferir a restrição, esta parcela é afrouxada à 5% abaixo do que fora determinado anteriormente e, caso a distância esteja menor que 95% do valor R_{des} , este valor cai para 5 metros, por razões apresentadas na seção 4.5.

Isto para prevenir comportamento indesejado do otimizador, notando, que é na equação 32 (inferior) que ocorrem os cálculos de minimização para garantir que as velocidades em comboio se igualem.

$$Obj_{Velo} = v_s(t) - v_{ref} \quad (28)$$

$$Obj_{Dist} = d(t) - v_p(t)t_h \quad (29)$$

$$Obj_{Conf} = a(t) \quad (30)$$

$$Obj_{Cons} = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 P(t) + \alpha_2 P(t)^2 & , P(t) \geq 0 \\ \alpha_0 & , P(t) < 0 \end{cases} \quad (31)$$

$$\min_{vars} J = \begin{cases} \int Obj_{Velo}^2 dt + \sqrt{\int Obj_{Conf}^2 dt} + \int Obj_{Cons} dt & , L > 50 \\ \int Obj_{Dist}^2 dt + \sqrt{\int Obj_{Conf}^2 dt} + \int Obj_{Cons} dt & , L \leq 50 \end{cases} \quad (32)$$

Sujeito as restrições:

$$5 \leq v_s(t) \leq v_{ref} \quad (33)$$

$$-355 \cdot 10^3 \leq P(t) \leq 355 \cdot 10^3 \quad (34)$$

$$-2 \leq a_s(t) \leq 1 \quad (35)$$

$$-2 \leq jerk_s(t) \leq 2 \quad (36)$$

$$-d_{min} \leq d(t) \quad (37)$$

Onde temos por ciclo do MPC:

$$d_{min} = \begin{cases} v_p t_h & , \forall \quad d(t) \geq v_p t_h + 0.1 \\ v_p t_h (1 - 0,05) & , \forall \quad v_p t_h + 0.1 > d(t) > v_p t_h (1 - 0,05) \\ 5 & , \forall \quad v_p t_h (1 - 0,05) \geq d(t) \end{cases} \quad (38)$$

3.10 CENÁRIOS

A estratégia de controle desenvolvida para o ACC, deve ser testada em situações que contenham os casos de interesse e desdobrem sobre situações reais, passíveis de acontecer em campo. Esta parte do trabalho, descreve cenários concebidos para testar o sistema no momento de aproximação à formação de comboio, com intuito de realizar as comparações e análises das estratégias investigadas na seção 3.6, e serão apresentados cenários que contemplem situações de trânsito que podem aparecer em uma rodovia, avaliando o desempenho do ACC de maneira mais abrangente.

O cenário, para realizar as análises com as estratégias de aproximação apresentadas na seção 3.6 (HASPALAMUTGIL; ADALI, 2017; ZHAI et al., 2011), tenta seguir as parametrizações da forma mais fiel possível ao exposto por Batista, Leonardi e Mendes (2021b), promovendo um único ambiente para as simulações e garantindo um confronto de desempenhos honesto (Tabela 5). Porém, pela característica preditiva do MPC, a distância interveicular de 60m teve que ser modificada, para um valor inicial maior, de 80m. Este cenário será intitulado como “Cenário de Aproximação” (CA). Para cada técnica, teremos dois caminhões idênticos, baseados nos valores utilizados por Nanni (2020), na mesma faixa de rodagem, com iguais condições iniciais de velocidade e posição. Todos os métodos possuem a decisão de chaveamento entre os controladores de velocidade e distância, com o mesmo valor L de distância entre os veículos, ficando a diferenciação deles, nas estratégias de controle e aproximação. A Figura 11, do início deste capítulo, apresenta o esquema deste cenário.

Os próximos cenários, foram elaborados para reproduzir possíveis acontecimentos em uma rodovia, sendo que todos os cenários possuem as mesmas condições iniciais (Tabela 6), embasadas nas condições finais do Cenário de Aproximação. Consequentemente, o início ocorre com o comboio formado, mas com eventos distintos, com os valores apresentados na

Tabela 7. O Cenário 1 (C1), cobre o momento em que o veículo líder acelera e aumenta sua velocidade repentinamente, mas ainda com este valor de velocidade abaixo da velocidade de cruzeiro (v_{ref}) do veículo seguidor. Portanto, o controlador do caminhão seguidor, deverá perseguir o líder e estabilizar a velocidade do caminhão, neste novo comboio. Uma ilustração do C1 é exibida na Figura 30 . O Cenário 2 (C2) foi pensado como evento contrário, que o veículo precedente diminui a velocidade repentinamente, como uma frenagem inesperada, forçando o veículo traseiro a diminuir a velocidade, para manter a nova distância desejada neste novo comboio (Figura 31).

Tabela 5 - Parâmetros do Cenário de Aproximação

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
T_{sim}	Tempo total de simulação	30	s
L_0	Limite de distância de transição de controlador	50	m
x_{si}	Posição inicial do veículo seguidor	0	m
x_{pi}	Posição inicial do veículo precedente	80	m
v_{si}	Velocidade inicial do veículo seguidor	23	m/s
v_{pi}	Velocidade inicial do veículo precedente	15	m/s
d_i	Distância interveicular inicial	80	m
t_h	Tempo de impacto, para CTH	1	s
R_{des}	Distância interveicular desejada por CTH	15	m
v_{ref}	Velocidade de cruzeiro	23	m/s

Fonte: Autor

Durante o trânsito, trocas de faixas ocorrem com frequência, então os próximos cenários trazem esta ideia aos testes. O acontecimento intermediário do Cenário 3 (C3), ocorre quando o veículo líder do comboio muda para outra faixa, mas existe um outro veículo mais a frente e em mesma velocidade, fazendo com que o veículo seguidor aumente a velocidade para alcançar a R_{des} , neste novo comboio (Figura 32). Já no Cenários 4 (C4), tem-se um veículo que entra no meio do comboio, forçando o seguidor a frear, equalizando a situação em um novo comboio, como exemplificado na Figura 33.

A quinta e última situação, Cenário 5 (C5), contempla um teste importante referente a consistência do ACC desenvolvido, como apresentado e testado por Liu et al. (2020), em comboio formado, caso o veículo líder comece a aumentar a velocidade gradativamente, o veículo seguidor deverá acompanhá-lo, aumentando sua velocidade. Porém, caso o líder

alcance velocidades maiores do que a configurada pelo motorista do veículo traseiro, o controlador deverá se adaptar e não ultrapassar v_{ref} por questão de segurança. A Figura 34 expõe o acontecimento deste evento.

Com os seis cenários descritos, será possível testar partes importantes do controlador desenvolvido, avaliando os requisitos de conforto, segurança, consumo de combustível e tempo de formação de comboio. Para isso, no próximo capítulo, serão plotados os gráficos de posição, velocidade, aceleração, tranco, distância interveicular do sistema, o diagrama $R - \dot{R}$ para detalhamento do momento de aproximação e informações, que forem importantes, do comportamento do algoritmo do MPC.

Tabela 6 - Condições iniciais para os Cenários 1, 2, 3, 4 e 5

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
T_{sim}	Tempo total de simulação	40	s
L_0	Limite de distância de transição de controlador	50	m
x_{si}	Posição inicial do veículo seguidor	0	m
x_{pi}	Posição inicial do veículo precedente	15	m
v_{si}	Velocidade inicial do veículo seguidor	15	m/s
v_{pi}	Velocidade inicial do veículo precedente	15	m/s
d_i	Distância interveicular inicial	15	m
t_h	Tempo de impacto, para CTH	1	s
R_{des}	Distância interveicular desejada por CTH	15	m
v_{ref}	Velocidade de cruzeiro	23	m/s

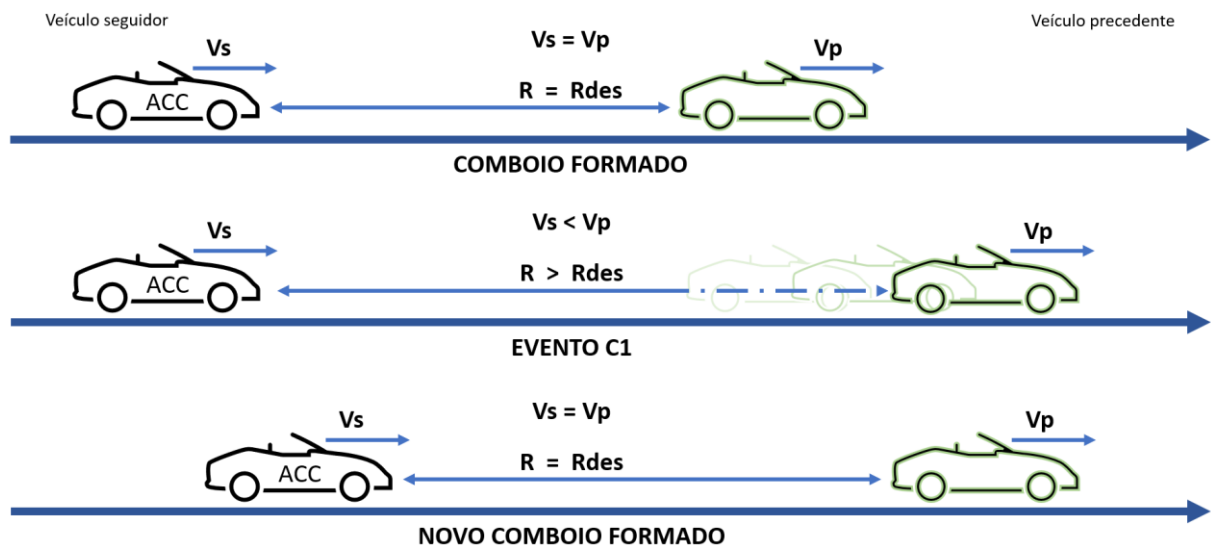
Fonte: Autor

Tabela 7 - Condições dos eventos dos Cenários 1, 2, 3, 4 e 5

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Unidade
T_{scene}	5	5	5	5	5	s
L_0	50	50	50	50	50	m
x_{sc}	0	0	0	0	0	m
x_{pc}	15	15	<u>25</u>	<u>10</u>	15	m
v_{sc}	15	15	15	15	15	m/s
v_{pc}	<u>18</u>	<u>13</u>	15	15	<u>15 p/ 25</u>	m/s
d_i	15	15	<u>25</u>	<u>10</u>	15	m
R_{desc}	<u>18</u>	<u>13</u>	14	15	<u>15 p/ 25</u>	m
v_{ref}	23	23	23	23	23	m/s

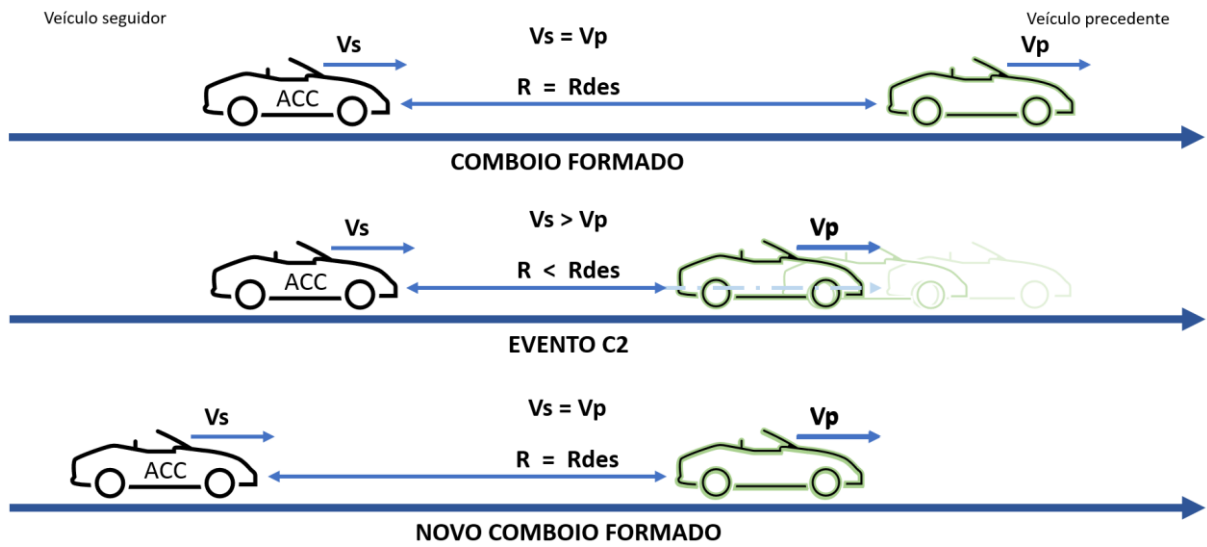
Fonte: Autor

Figura 30- Evento intermediário do Cenário 1



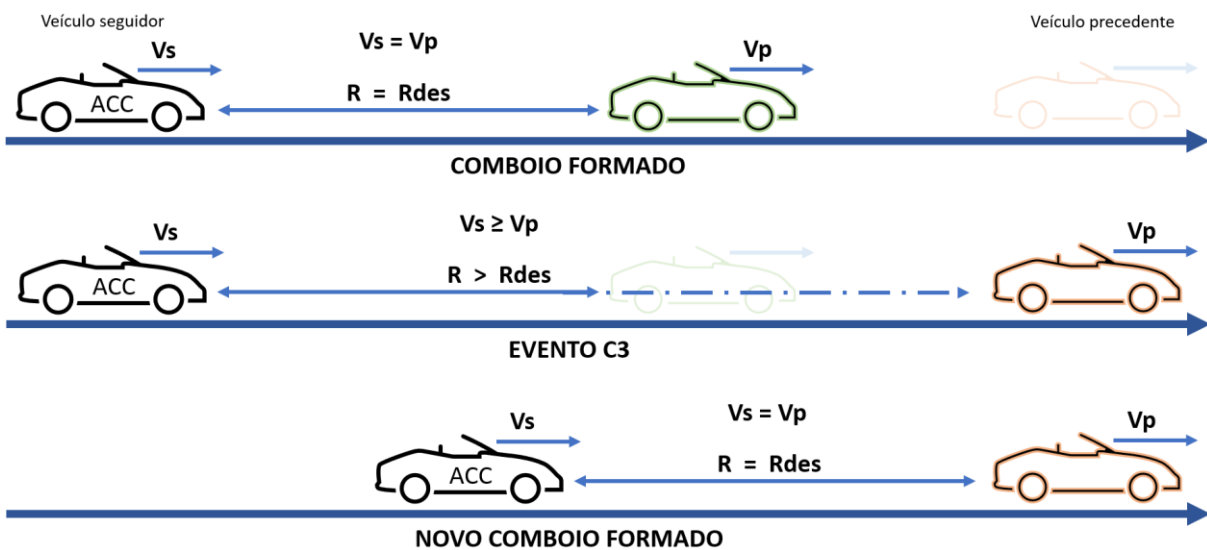
Fonte: Autor

Figura 31 - Evento intermediário do Cenário 2



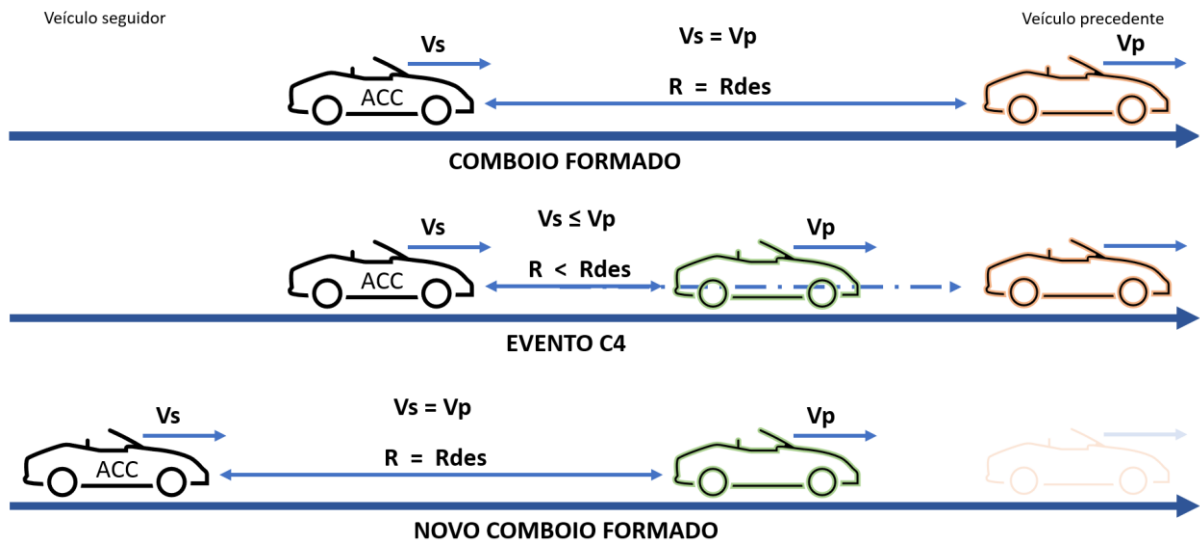
Fonte: Autor

Figura 32 - Evento intermediário do Cenário 3



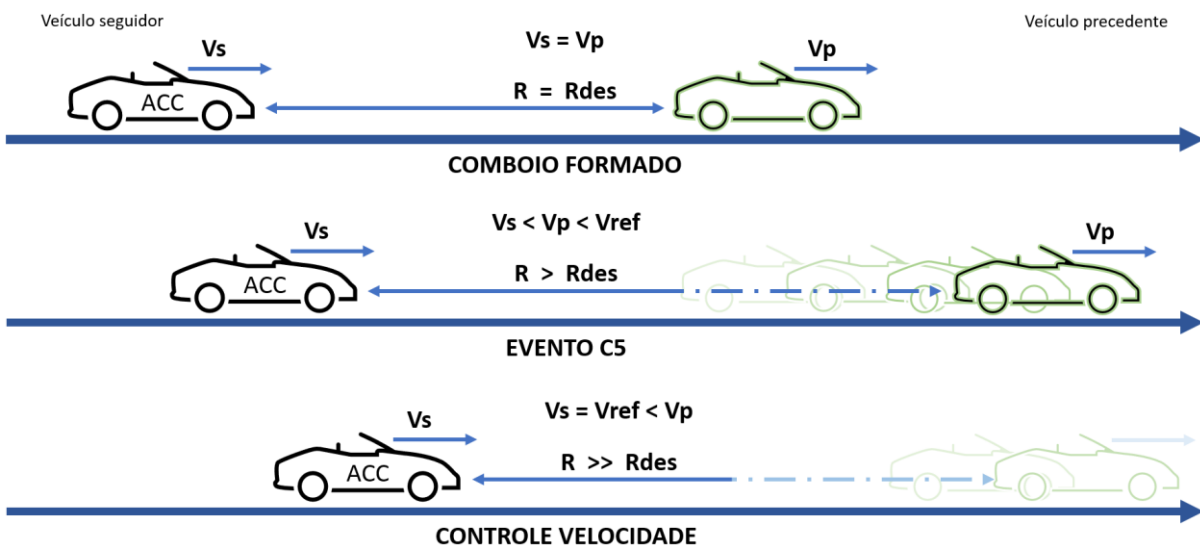
Fonte: Autor

Figura 33- Evento intermediário do Cenário 4



Fonte: Autor

Figura 34 - Evento intermediário do Cenário 5



Fonte: Autor

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como foi exposto, tem-se um total de seis contextos, para pôr a prova o ACC desenvolvido, com os Cenários 1, 2, 3, 4 e 5 definidos pela Tabela 6 e a Tabela 7 e o Cenário de Aproximação pela Tabela 5. Todos os casos têm início com dois caminhões idênticos trafegando em uma mesma faixa de rodagem, sem nenhum elemento entre eles, sendo um o caminhão precedente (ou líder) e o outro o caminhão seguidor equipado com o ACC elaborado. São considerados todos os veículos iguais, sendo extraídos os parâmetros utilizados por Mendes (2020) e Nanni (2020), apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados dos caminhões

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
m	Massa total	40.000	kg
A	Área frontal	10	m ²
C_d	Coefficiente de arrasto	0,78	-
f	Coefficiente de resistência ao rolamento	0,003	-
P_{\max}	Potência máxima do motor	475	hp
C_1	Coefficiente 1 de redução de arrasto	14,0766	m
C_2	Coefficiente 2 de redução de arrasto	24,4626	m
g	Aceleração da gravidade	9,8066	m/s ²

Fonte: Adaptado de Mendes (2020) e Nanni (2020).

Portanto, com os cenários de testes definidos e apresentados, temos neste capítulo, as simulações e análise destes. As quais, são apresentadas nas seções e seus respectivos cenários, que segue: seção 4.1 com o cenário de aproximação; seção 4.2 contém o cenário 1 de teste; na seção 4.3 expõe-se o cenário 2; seção 4.4 o cenário 3; seção 4.5 possui o cenário 4; e o cenário 5 é apresentado na seção 4.6. Uma análise geral dos cenários é realizada na seção 4.7 e realiza-se uma investigação aos dados gerados pelo algoritmo do MPC na seção 4.8

4.1 CENÁRIO DE APROXIMAÇÃO

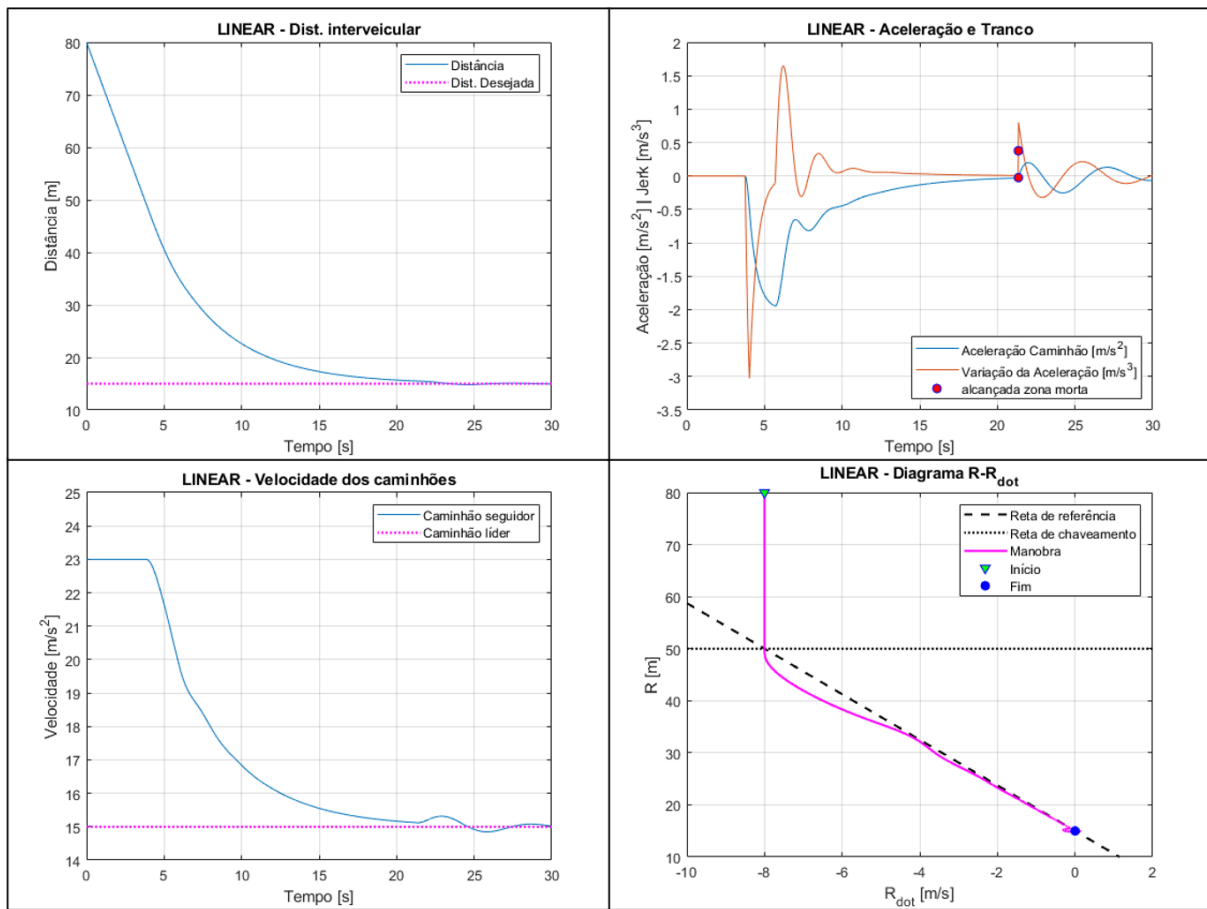
Este cenário foi criado para comparar as respostas na fase de aproximação na formação de comboios, entre as duas técnicas estudadas na seção 3.6 e o ACC concebido neste estudo. Serão analisados o tempo de formação de comboio, consumo de combustível, segurança e

conforto nesta manobra. Para o critério de comboio formado, será utilizado o mesmo método empregado por Batista, Leonardi e Mendes (2021b), onde é considerada uma zona morta de meio metro de variação à distância desejada R_{des} . Com os parâmetros citados na Tabela 5, foram realizadas as simulações com os resultados dos gráficos e tabelas apresentados a seguir.

Para a aproximação linear, obtivemos os resultados da Figura 35, ao início do teste temos uma distância de 80 m de separação entre os veículos. No momento correspondente a 50 metros de separação ocorre o chaveamento entre os controladores e a aproximação com o método linear se inicia, o ACC começa a seguir a reta de inclinação negativa de referência. O controle faz seu papel de seguir esta referência variável, de forma suave, alcançando a zona morta, sem escorregando demasiado do ponto de equilíbrio, com variação de -0,1748 m de R_{des} , alcançando uma distância mínima do caminhão líder de 14,8252 m. O tempo decorrido para realizar a aproximação é visualizado no gráfico de velocidade e distância interveicular, a manobra é realizada em 21,35 segundos, com um gasto de 0,0527 litros de combustível para realizar o trajeto. Pertinente ao conforto, o gráfico de aceleração e tranco ilustra os picos de aceleração mínimo de -1,9463 m/s² e máximo zero, até o ponto de formação de comboio, para o tranco ocorre o mínimo de -3,0273 m/s³ e máximo de 1,6478 m/s³, que representam desconforto aos passageiros (LIU et al., 2020).

A Figura 36 expõe a simulação da aproximação por desaceleração constante, indicada nos gráficos como técnica quadrática, de mesma maneira, os caminhões iniciam o percurso com os mesmos dados da simulação anterior. Pelo diagrama $R - \dot{R}$ vemos, que o momento que ele começa a seguir a curva de desaceleração acontece nos 50 metros, isto por utilizar uma desaceleração de 0,0933g para a curva de referência, diferente dos 0,1g utilizados por Zhai et al. (2011), para compatibilizar os testes. No diagrama $R - \dot{R}$ é visível o acompanhamento da curva de referência, refletindo em menor tempo de aproximação (ZHAI et al., 2011), o que é notado nos demais gráficos. O tempo de formação do comboio acontece em 10,85 segundos com um consumo de 0,0293 litros para esta manobra, quase a metade do método anterior. Em relação ao escorregamento em volta do ponto de equilíbrio, uma vez alcançada a zona morta, o caminhão teve uma variação de -0,7042 m chegando a 14,2958 m do líder, o que ocasionou saída da zona morta, chaveamento de controladores e maior insegurança. Para aceleração atingiu os valores mínimo de -1,3418 m/s² e máximo de zero, o tranco performou um mínimo de -2,7518 m/s³ e máximo de 1,1972 m/s³, o que foi ligeiramente melhor que o anterior, mas ainda gerando desconforto pelos limites já mencionados.

Figura 35 – Gráficos Cenário 1 com técnica Linear - distância interveicular, velocidade aceleração e tranco ao longo do tempo e diagrama $R - \dot{R}$

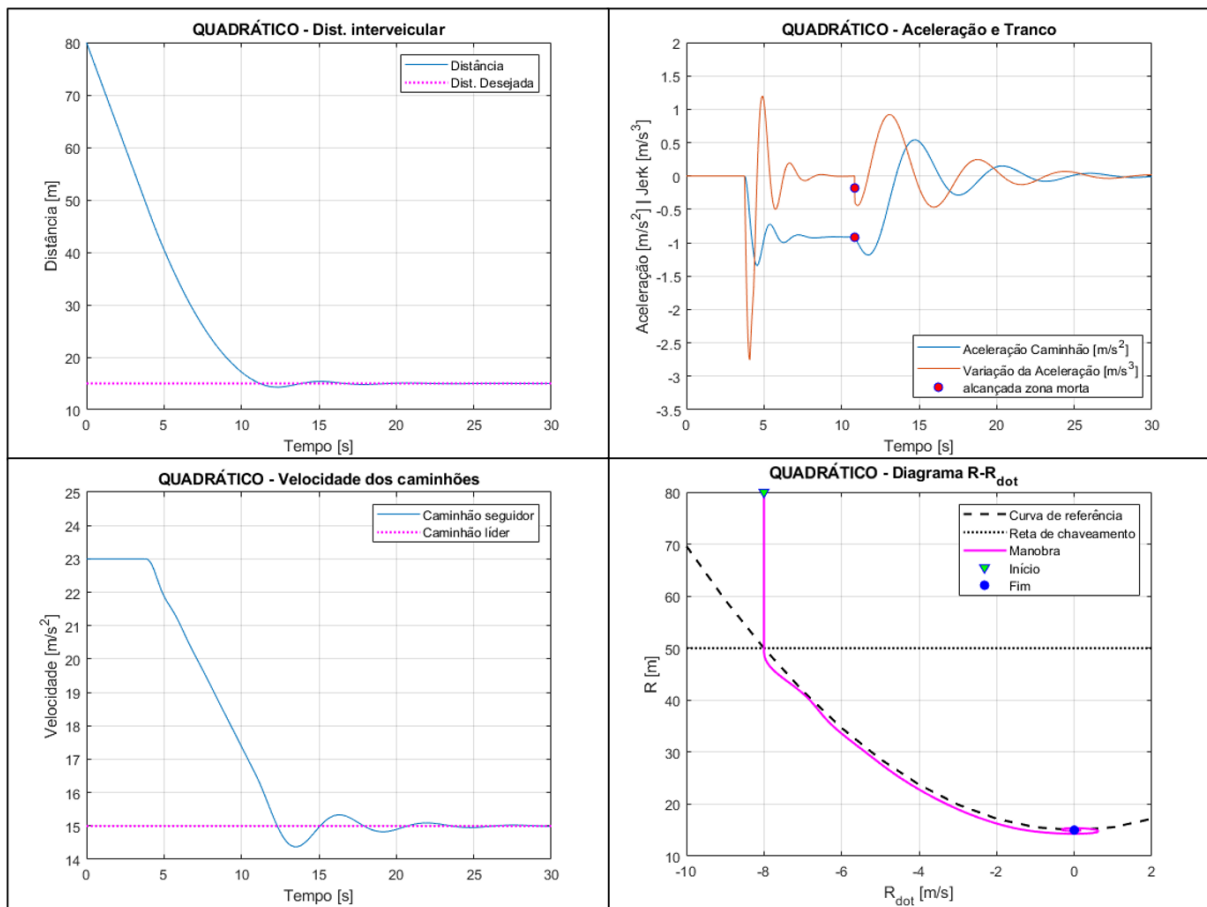


Fonte: Autor

Os próximos gráficos exibem os testes com o ACC desenvolvido, a Figura 37 traz a simulação do MPC com a restrição adaptável (equação 38) para a distância desejada (MPCa). Este controlador alcançou a formação do comboio em 13,91 segundos, consumiu 0,0301 litros de diesel, com distância mínima do líder de 14,9065 metros, passando -0,0935m de R_{des} . Até o ponto considerado para formar o comboio, desempenhou aceleração mínima de -0,6107 m/s² e máxima de -0,3412 m/s², com jerk mínimo de -0,1363 m/s³ e máximo de 0,2998 m/s³. No diagrama $R - \dot{R}$, foi traçada uma curva quadrática com o índice de 0,0556g, alusiva a técnica de desaceleração constante. Demonstrando que, mesmo o controle ótimo não possuindo esta referência em sua função objetivo e restrições, atua próximo do que é exposto por Zhai et al. (2011) para obter a formação de comboio de maneira mais célere possível, mesmo que isso não estivesse explícito na função objetivo. Interessante notar nos gráficos a ação preditiva deste ACC, que faz com que a desaceleração do veículo se inicie praticamente desde o início da manobra, mesmo com o limite L_0 que seleciona a função objetivo de distância ou velocidade,

refletindo em ação de controle ótima que considera o instante atual e o que irá ocorrer dentro do horizonte de predição. Os gráficos também apresentam melhoras em suas formas, sem oscilações nas regiões das distâncias L_0 e R_{des} , e com sensível atenuação no comportamento da aceleração e tranco.

Figura 36 – Gráficos Cenário 1 com técnica Quadrática - distância interveicular, velocidade aceleração e tranco ao longo do tempo e diagrama $R - \dot{R}$

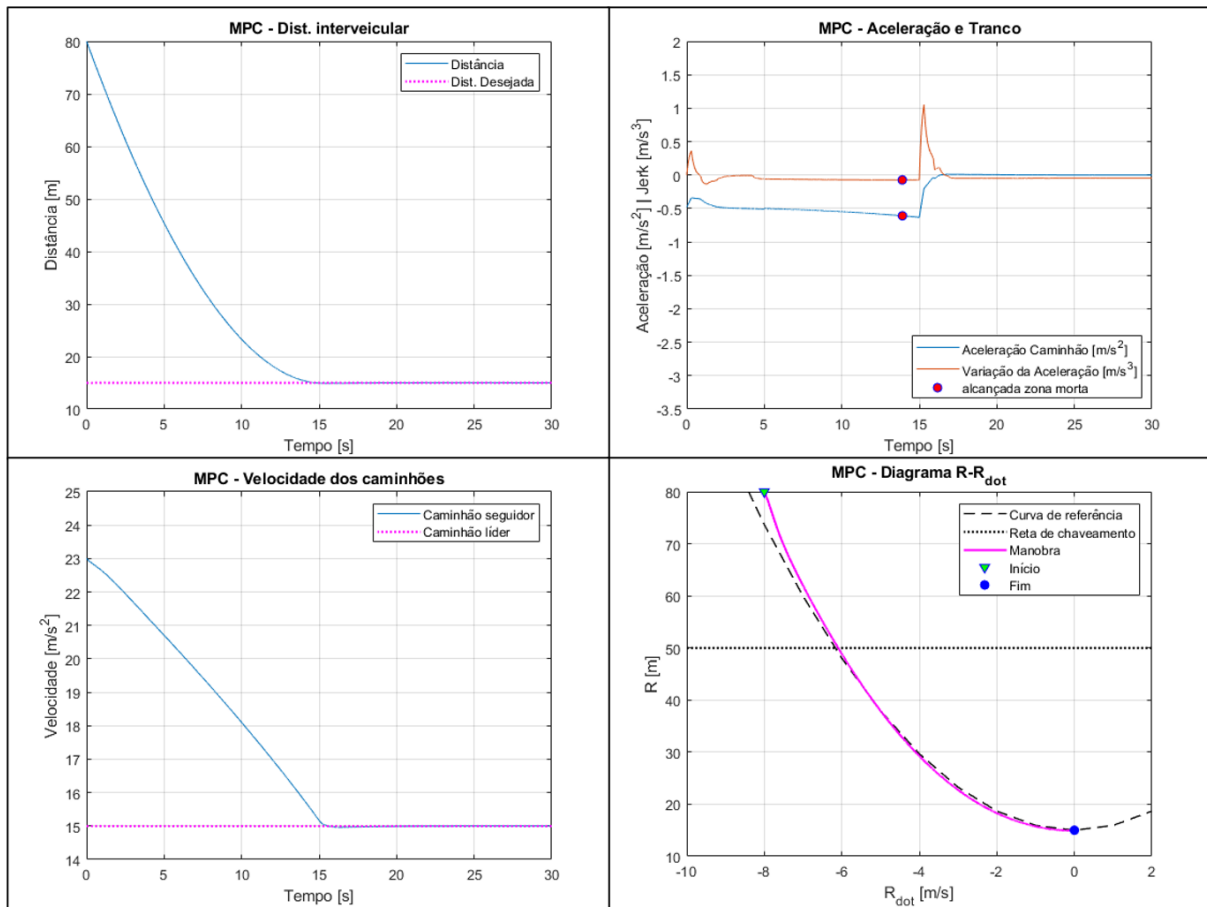


Fonte: Autor

Os parâmetros para comparação dos métodos exibidos, estão concatenados na Tabela 9 e Tabela 10. Analisando alguns pontos, temos o MPC com o tempo de aproximação 28,20% maior que a quadrática, portanto, mais lento e consumo 2,73% acima do mesmo. Vale ressaltar, que o tempo de aproximação não faz parte da função custo do MPC. Porém, nos demais requisitos o comportamento foi superior em segurança e conforto, com valores de tranco e aceleração muito inferiores, com desempenhos acima dos 54% sobre o quadrático e 68% ao linear, não excedendo nenhuma restrição de conforto, concedendo uma viagem tranquila aos passageiros.

Informações e análises referentes ao desempenho do algoritmo criado, serão discutidos na seção 4.8. Porém, nas 36 vezes que foi realizado um ciclo de controle ótimo, ocorreram seis avisos de valor sub-ótimo ou não convergência do controle ótimo, sem ocorrer estouro do buffer ótimo, logo utilizou-se apenas valores ótimos de controle.

Figura 37 – Gráficos Cenário 1 com o MPC com restrição adaptável (MPCa) para R_{des} - distância interveicular, velocidade, aceleração e tranco ao longo do tempo e diagrama $R - \dot{R}$



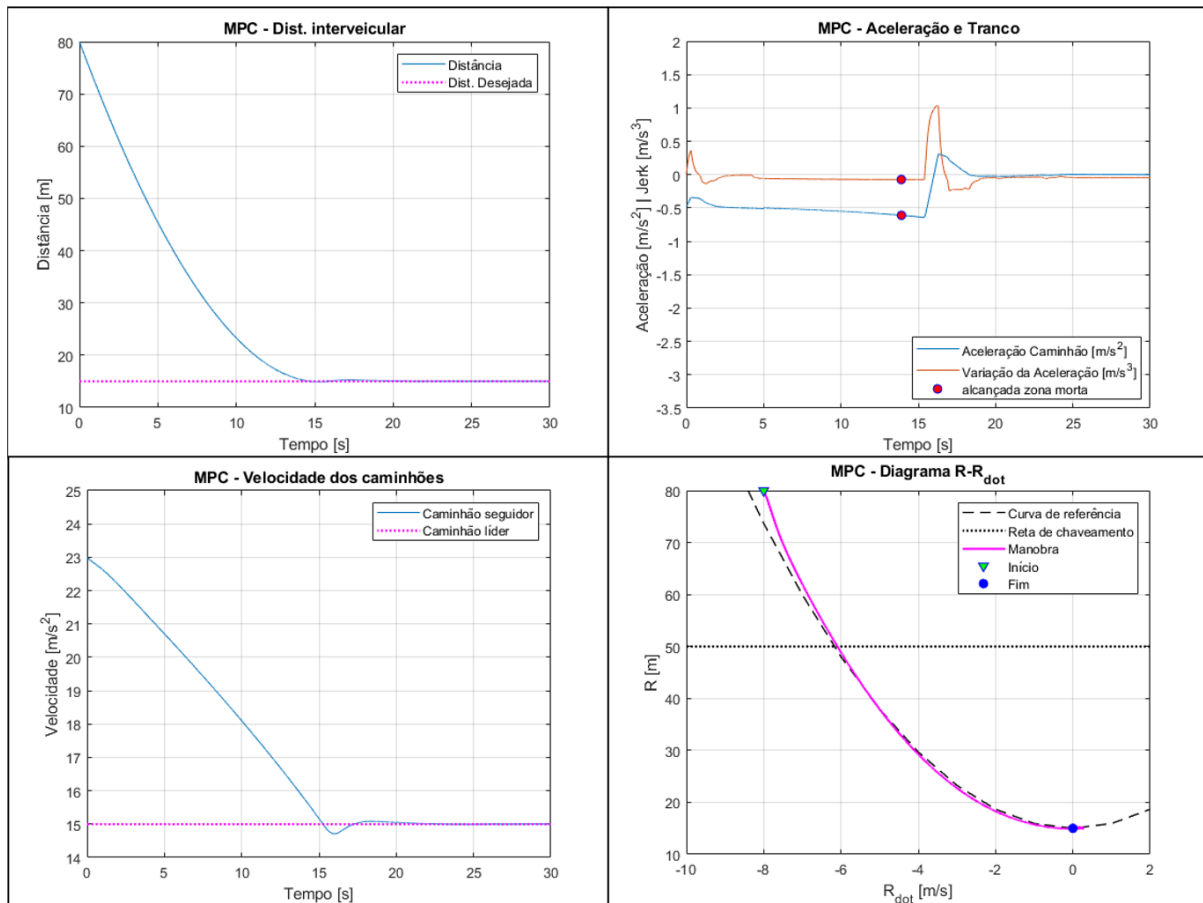
Fonte: Autor

Com intuito de entender a ação da restrição adaptável de distância desejada, foi realizada simulação do MPC com esta restrição fixa e sem se adaptar aos estados do sistema (MPCh), desta forma a equação 38 contempla apenas a parte superior para qualquer situação. Esta simulação apresenta a formação do comboio em 13,9224 segundos, consumindo 0,0301 litros de diesel, alcançando 14,9188 metros do veículo à frente, ultrapassando R_{des} em -0,0812 m. Para aceleração mínima alcançou -0,6064 m/s² e máxima de -0,2821 m/s² e o tranco com mínima de -0,1363 m/s³ e máxima de 0,2998 m/s³. Em todos os pontos analisados, as performances com e sem a restrição adaptável ficaram muito próximas (Tabela 9), com

diferenças ínfimas para este cenário. Entretanto, é possível perceber diferenças no gráfico da Figura 38, que na região de 15 segundos em diante, ocorre leve oscilação na estabilização da posição, refletida em um contra pico de velocidade e modificação do traçado da aceleração e tranco, incluindo um pequeno contra pico de tranco após formar o comboio.

Com esta diferença de restrição o algoritmo apresentou sete avisos, um a mais que o anterior, mas continuou sem estourar o buffer de cinco níveis. Este erro adicional ocorreu justamente no momento que o veículo está finalizando a aproximação nos arredores de R_{des} . Este não é um comportamento conclusivo, mas a utilização desta restrição fixa, mudou a atuação do programa.

Figura 38 – Gráficos Cenário 1 com o MPC sem a restrição adaptável (MPCh) para R_{des} - distância interveicular, velocidade, aceleração e tranco ao longo do tempo e diagrama $R - \dot{R}$



Fonte: Auto

Segue análise dos dados concentrados na Tabela 9 e na Tabela 10, na quais, a Tabela 9 possui os valores em tempo de formação de comboio, consumo de combustível, distância mínima entre os veículos, quanto ultrapassou a R_{des} e valores máximos e mínimos de

aceleração e tranco. A Tabela 10, traz valores percentuais de quanto maior ou menor foram os valores obtidos com o MPC, com as bases de relação aos modos linear e quadrático. Como exemplo, para coluna MPCa/Lin da Tabela 10 e a linha para tempo de formação de comboio, a técnica linear realizou a aproximação em 21,35s e o MPCa fez em 13,91s, portanto o controlador aqui proposto fez um tempo 34,85% menor que o modo linear, esta relação de “menor que” é dada pelo valor negativo deste número na tabela.

Portanto, todas as metodologias controlaram o cenário testado. As técnicas linear e quadrática possuem desempenho satisfatório (BATISTA; LEONARDI; MENDES, 2021b), com a quadrática apresentando melhores valores em tempo e consumo, mas ambas não satisfazem os requisitos de conforto e segurança, com a linear sendo um pouco melhor em segurança, infringindo menos a distância desejada. O MPC, para os dois casos da restrição para R_{des} , apresenta à primeira vista desempenho pior do que a quadrática, pois o tempo de formação de comboio (28,20%) e o consumo de combustível (2,73%) são maiores, mas ainda assim inferior a linear, com tempo (-34,85%) e consumo (-42,88%) menores. Contudo, o MPC é muito superior nos requisitos de conforto, que estão contemplados em suas restrições (equações 35 e 36) e na função objetivo (equação 30 inserida na equação 32), conferindo valores até 95,50% menores que a maneira linear e até 95,05% menores que o quadrático. Perante a exigência de segurança, a qual não se pode ter distância interveicular menor do que a determinada pelo CTH (LIU et al., 2020), o MPC a descumpriu em menos de 10 cm, indicando insegurança por este quesito. Não obstante, uma saída seria impor um fator de segurança à esta restrição, como tentativa de não extrapolar o limite de R_{des} .

Tabela 9 – Dados gerados em simulação do Cenário 1 para os diversos métodos estudados

Descrição	Linear	Quadrática	MPCa	MPCh	Unidade
Tempo de formação	21,35	10,85	13,91	13,91	s
Consumo de combustível	0,0527	0,0293	0,0301	0,0301	l
Distância mínima	14,8252	14,2958	14,9065	14,9188	m
Infringiu Rdes	-0,1748	-0,7042	-0,0935	-0,0812	m
Aceleração mínima	-1,9463	-1,3418	-0,6107	-0,6095	m/s ²
Aceleração máxima	0	0	-0,3412	-0,3412	m/s ²
Tranco mínimo	-3,0273	-2,7518	-0,1363	-0,1363	m/s ³
Tranco máximo	1,6478	1,1972	0,2998	0,3638	m/s ³

Fonte: Autor

Isto posto, é significativa a influência das restrições de conforto na resposta do sistema. Para o consumo de combustível houve economia substancial em relação ao linear (HASPALAMUTGIL; ADALI, 2017), este também utilizado como base de comparação para desaceleração constante de Zhai et al. (2011). No entanto, o ACC aqui desenvolvido cumpre com folga os requisitos de conforto, desempenha bem a minimização do erro de distância com tempo de formação de comboio vantajosa e, entre os métodos estudados, foi a que menos ultrapassou o limite de CTH, indicando maior segurança em viagem.

Tabela 10 – Diferença percentual das abordagens Linear (Lin) e Quadrática (Quad) em relação ao MPC com restrição adaptável (MPCa) e sem restrição adaptável (MPCh)

Descrição	MPCa/Lin	MPCa/Quad	MPCh/Lin	MPCh/Quad
Tempo de formação	-34,85%	28,20%	-34,85%	28,20%
Consumo de combustível	-42,88%	2,73%	-42,88%	2,73%
Distância mínima	0,55%	4,27%	0,63%	4,36%
Passou de R_{des}	-46,51%	-86,72%	-53,55%	-88,47%
Aceleração mínima	-68,62%	-54,49%	-68,84%	-54,81%
Aceleração máxima	-	-	-	-
Tranco mínimo	-95,50%	-95,05%	-95,50%	-95,05%
Tranco máximo	-81,81%	-74,96%	-81,81%	-74,96%

Fonte: Autor

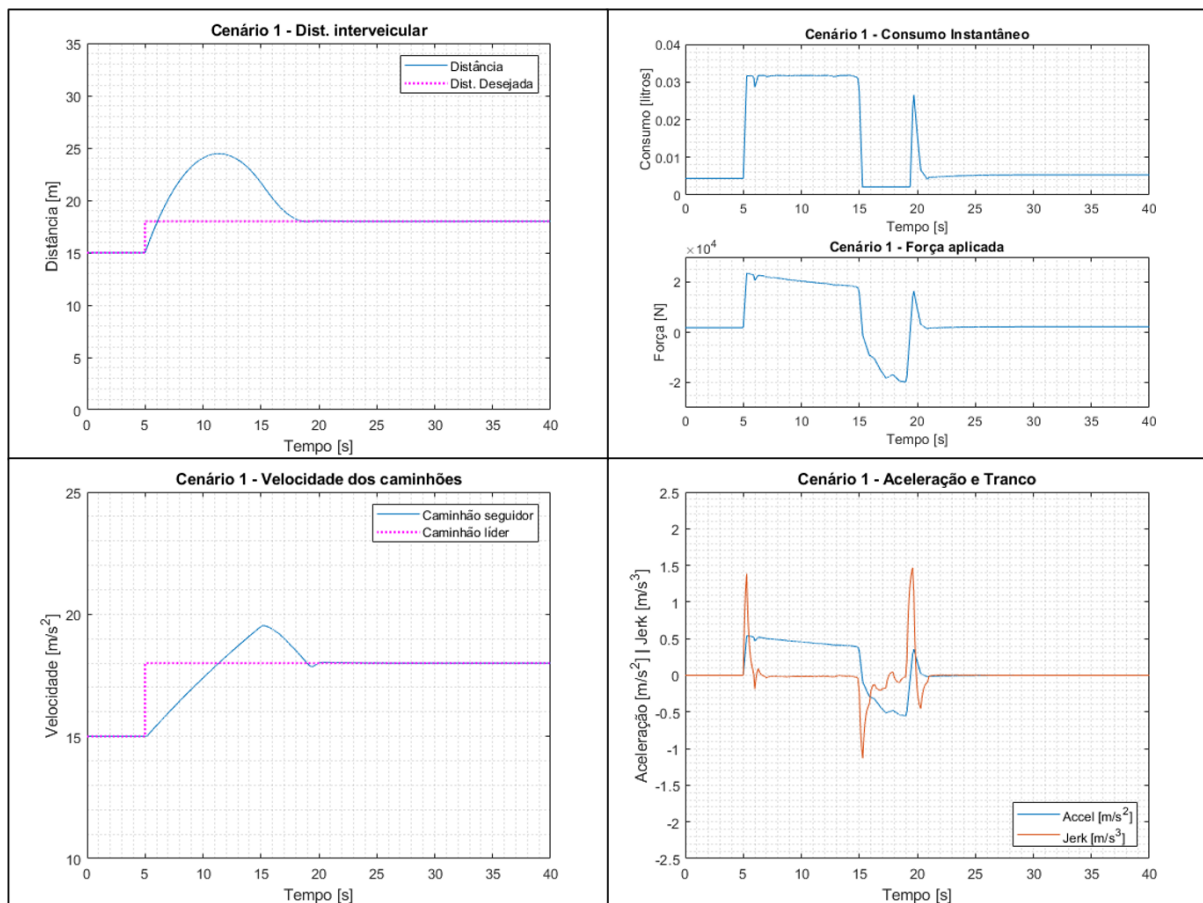
4.2 CENÁRIO 1

Para esta situação, temos os veículos em comboio formado, então o caminhão precedente aumenta sua velocidade de forma repentina em 20%, de 54km/h para 64,8km/h (Tabela 6 e Tabela 7). Esta simulação é apresentada na Figura 39, na qual é possível observar que o ACC controla e estabiliza a distância interveicular e a velocidade do seguidor, obtendo uma resposta suave à modificação de velocidade imposta. Não são cometidas penalidades às restrições de e conforto, com a aceleração atingindo valores menores que $\pm 0,6 \text{ m/s}^2$ e o tranco com valores menores que $\pm 1,5 \text{ m/s}^3$. A segurança também foi atingida no novo comboio, em que a distância não atingiu valores menores que 18 metros. A distância máxima entre os veículos atingiu 24,46 metros nesta manobra, expondo uma resposta lenta do controlador, visto ser um sobressinal de mais de 200% para este degrau de velocidade. Esta lentidão torna a formação de comboio mais demorada, mas é interessante ao conforto por não realizar deslocamentos bruscos.

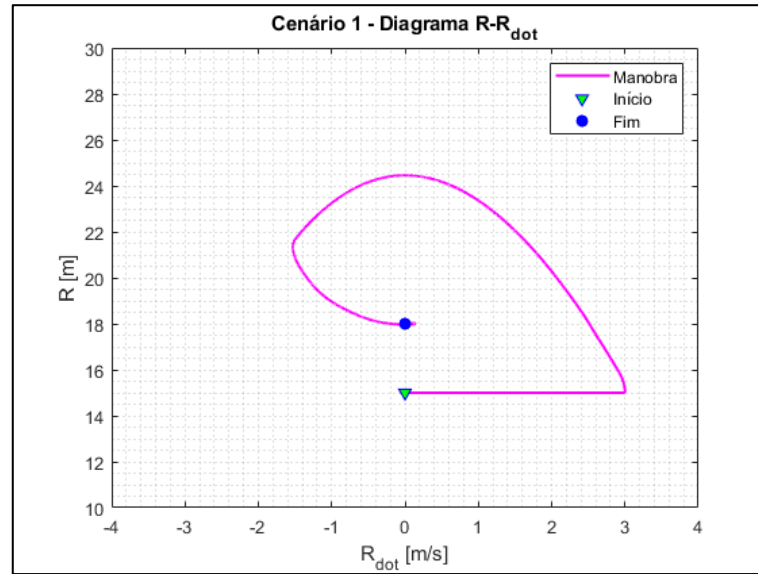
As respostas do consumo instantâneo e da força de controle também são apresentadas na Figura 39, as quais obtiveram traçado sem grandes oscilações, o que é refletido em conforto. O diagrama $R - \dot{R}$ (Figura 40) consegue evidenciar a relação entre as variáveis dos caminhões, retratando uma reta horizontal no instante do aumento de velocidade e conferindo trajetos com aparência quadrática, até chegar a nova R_{des} . Detalhes numéricos estão apresentados na Tabela 11.

Toda a simulação ocorreu de maneira tranquila para o algoritmo criado, o buffer supriu os dois avisos da ferramenta e executou os quarenta segundos de simulação em 2 minutos e 17 segundos.

Figura 39 – Simulação do Cenário 1



Fonte: Autor

Figura 40 - Diagrama $R - \dot{R}$ do Cenário 1

Fonte: Autor

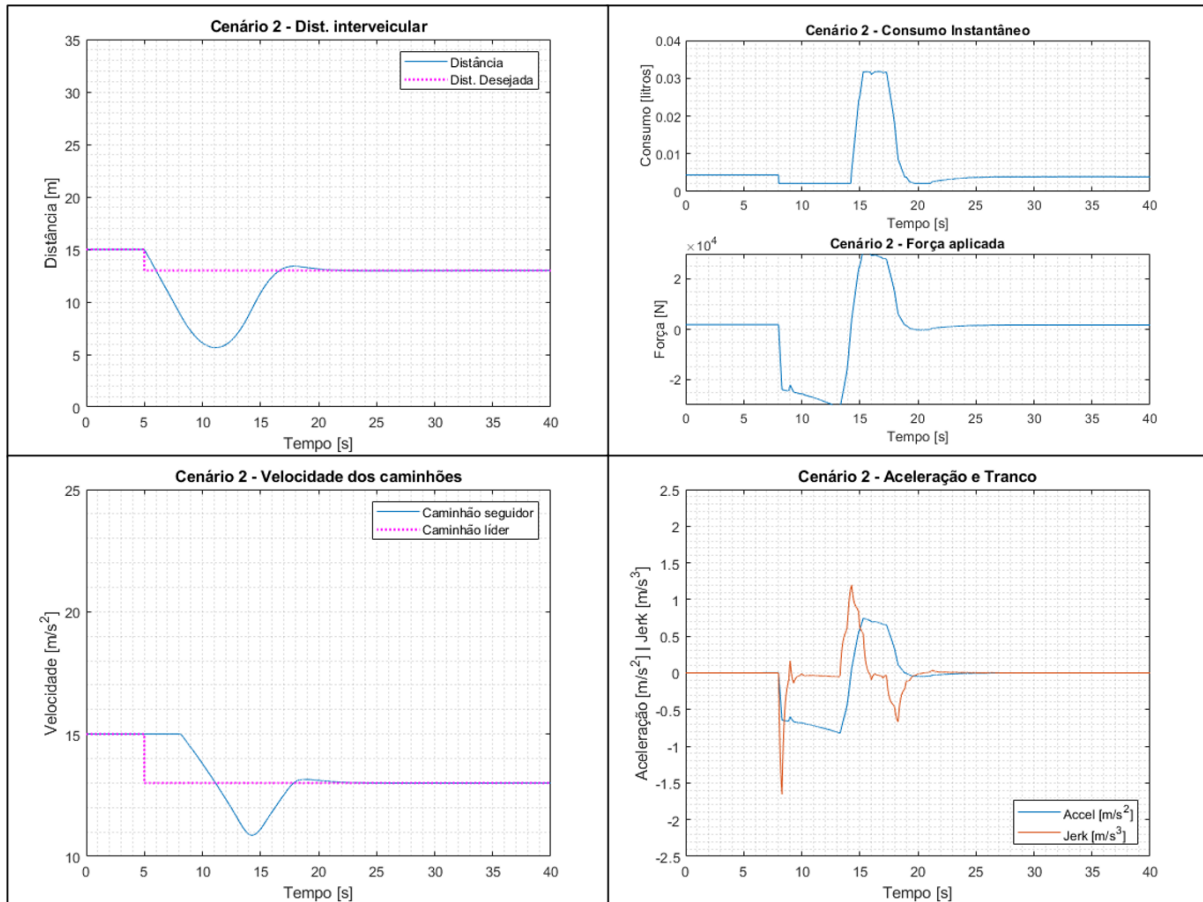
4.3 CENÁRIO 2

Temos aqui a situação contrária ao cenário anterior, que o motorista do caminhão líder freia bruscamente e diminui sua velocidade em 13,33%, de 54km/h para 46,8km/h. Neste caso, o sistema consumiu 0,1402 litros de combustível (Tabela 11), os parâmetros de conforto foram preservados dentro dos limites e conseguiu se reconfigurar ao novo comboio. Porém, é possível perceber que o sistema responde, ao degrau negativo de velocidade, após três segundos que ele aconteceu. Apesar do algoritmo ter apresentado apenas três avisos e não utilizar valores sub-ótimos (Figura 41), este atraso de resposta aconteceu pelo uso do buffer. O buffer possui cinco níveis da ação de controle armazenados, mas estes valores consideram condições do instante em que foram criados, sem ter ciência da modificação de velocidade do caminhão precedente, ocasionado este atraso. Entretanto, ao decorrer da simulação, o MPC conseguiu engrenar e concluir o cenário apresentado.

O programa apresentou três falhas consecutivas e o buffer entrou em ação, porém nestes instantes o sistema ficou cego perante as mudanças da rodovia, gerando o atraso em sua resposta. Claramente a segurança foi falha e pode ser percebida pela distância interveicular mínima de 5,65 metros que o sistema atingiu (Tabela 11). No diagrama da Figura 42 é possível identificar dois acontecimentos, do degrau de velocidade (reta horizontal) e do atraso de resposta do controlador (reta vertical). Os quais são indícios de transtornos, a reta horizontal indica mudança abrupta de velocidade no sistema. A reta horizontal, mais a condição de estar

abaixo da linha L_0 , demonstra que o controle de distância apresenta algo atípico. Após isto, o veículo busca o novo comboio, novamente percorrendo o diagrama com trajetórias parabólicas.

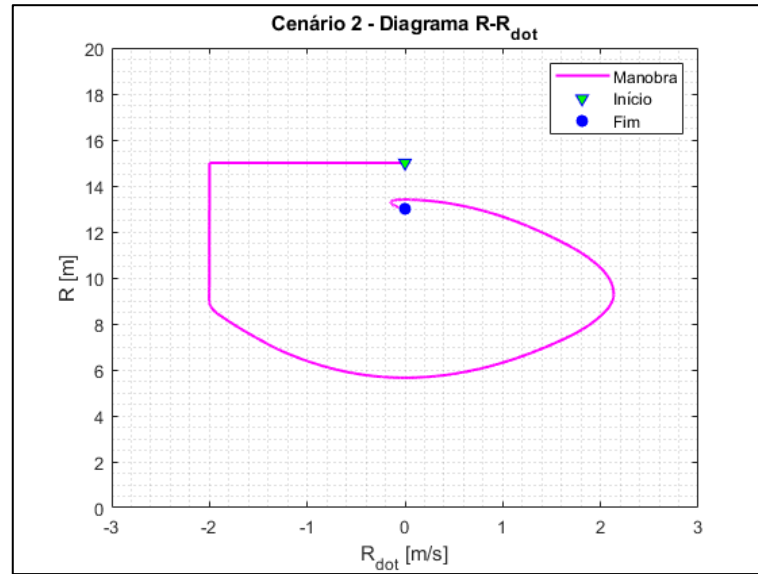
Figura 41 - Simulação do Cenário 2



Fonte: Autor

O atraso na atuação do MPC ao evento de diminuição de velocidade, apresenta uma condição de falta de segurança, que tem relação ao tipo de predição do modelo, que faz a sua previsão com o veículo precedente sempre com velocidade constante. Esta situação, de mudança de velocidade somada a avisos do algoritmo e uso do buffer, poderia ser contornada em esforços futuros, com a utilização de um controlador tipo PID que assume o controle do sistema nessa situação, até o MPC obter um loop com sucesso. Uma outra possibilidade, é o que foi proposto por Lin et al. (2017), para aprimorar a predição da dinâmica do veículo líder (seção 2.4), através de um modelo baseado em método fuzzy de T-S (Tagagi-Sugeno), realizada em seu ANFPC (adaptive neurofuzzy predictive control).

Figura 42 - Diagrama $R - \dot{R}$ do Cenário 2



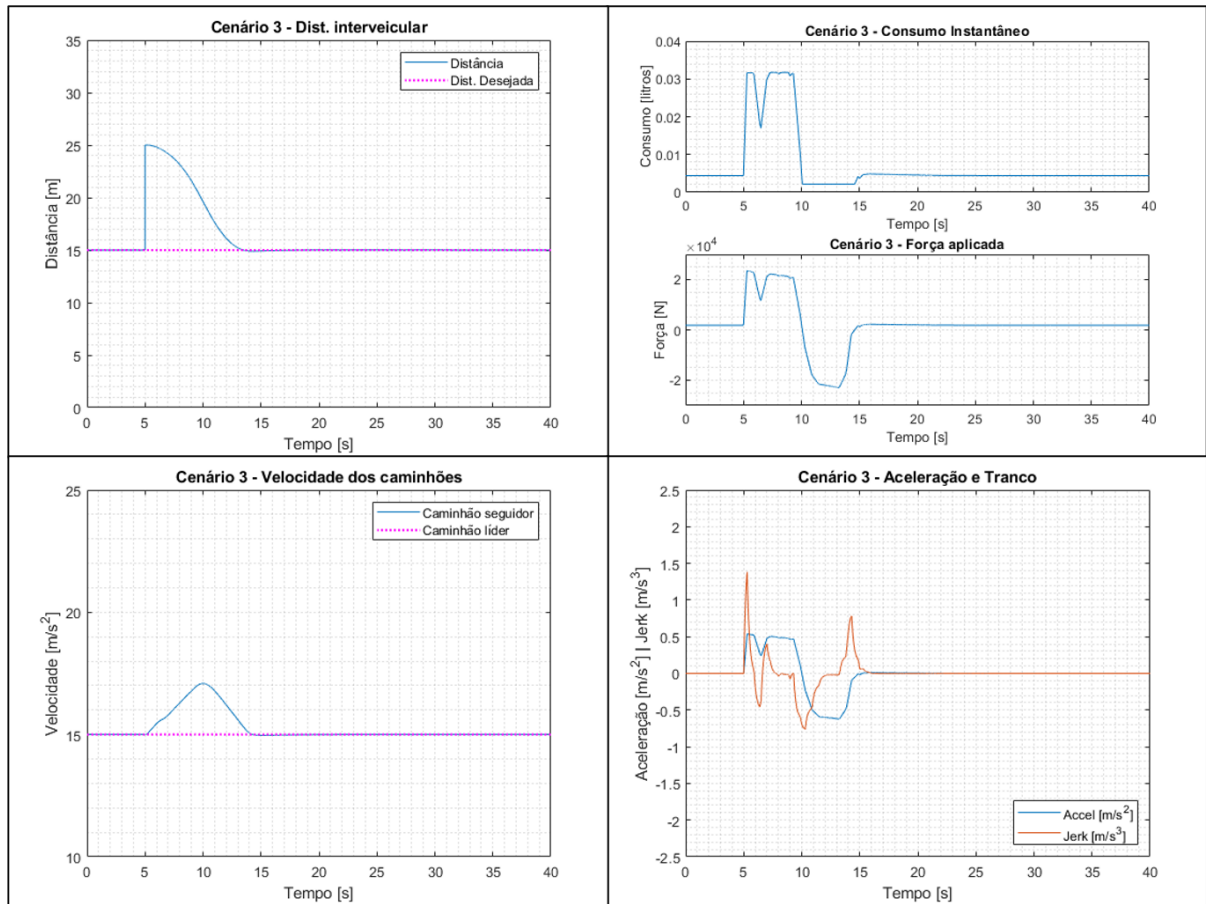
Fonte: Autor

4.4 CENÁRIO 3

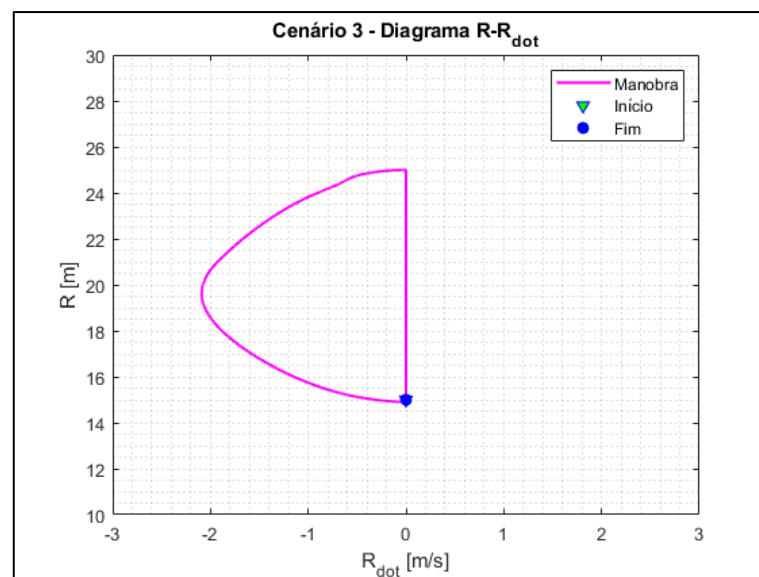
O cenário 3 simula a situação que o veículo líder troca de faixa, saindo do comboio, e existe um outro veículo a frente, com mesma velocidade, mas com 10 metros a mais em relação a distância desejada. O resultado gráfico está na Figura 43 e Figura 44, o sistema recompõe rapidamente o comboio (menos de 10 segundos), sem violar nenhuma restrição e gerando quatro avisos do algoritmo, não comprometendo a dinâmica do percurso. A distância mínima foi de 14,90 m, ultrapassando ligeiramente o limite imposto para segurança.

A análise do digrama $R - \dot{R}$ apresenta uma outra visão sobre o aparecimento de reta vertical, como sabemos que é um aumento da distância, ela indica a modificação repentina de distância e sua direção de construção (de baixo para cima) aponta para aumento da distância interveicular (FANCHER; BAREKET, 1994).

Figura 43 - Simulação do Cenário 3



Fonte: Autor

Figura 44 - Diagrama $R - \dot{R}$ do Cenário 3

Fonte: Autor

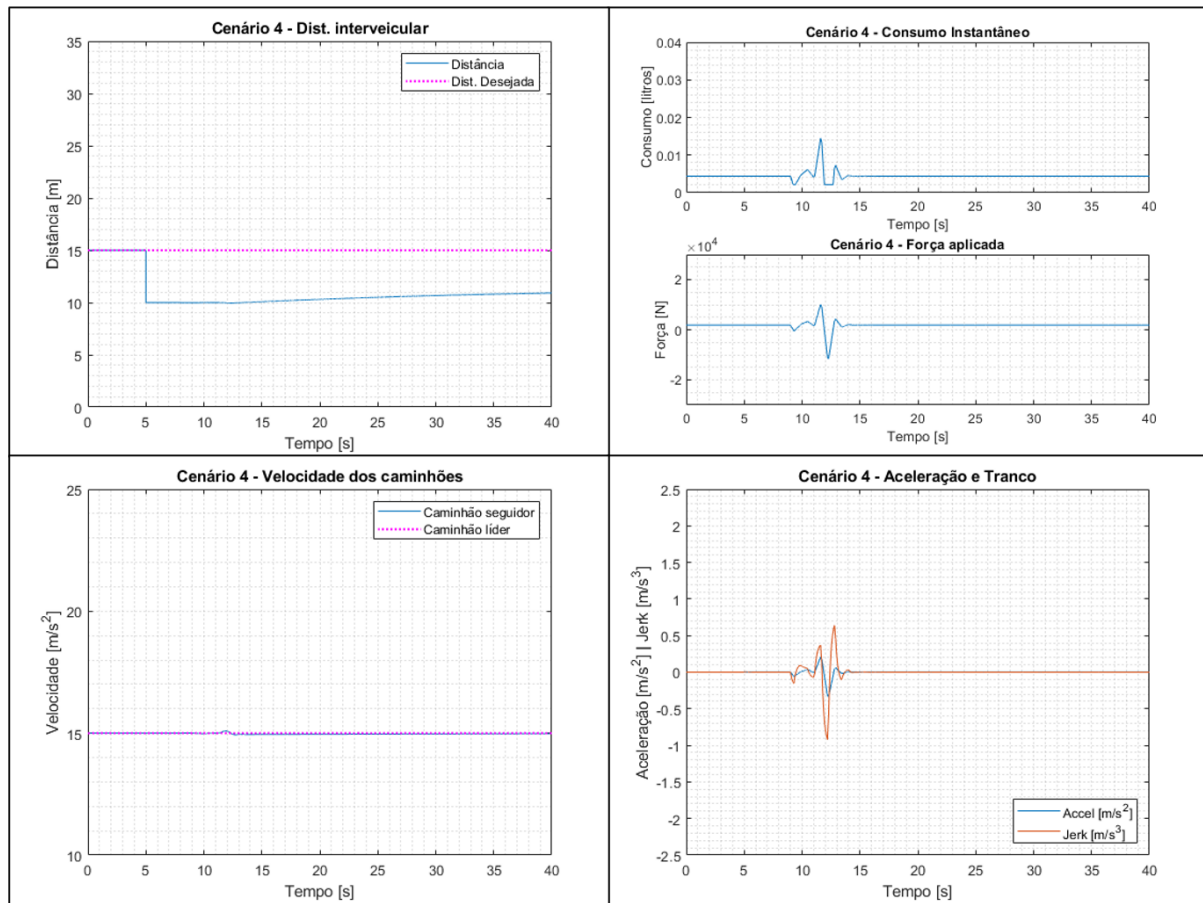
4.5 CENÁRIO 4

Este cenário apresenta o momento em que um terceiro veículo entra no meio do comboio formado, gerando um degrau negativo de distância para o ACC. Este teste motivou a criação da restrição adaptável da equação 38 da seção 3.9.3. O evento que ocorre neste cenário, fez com que outras abordagens mais rígidas para o limite inferior da restrição de distância, causassem perda de ação do controlador e inúmeros avisos do MPC. A primeira tentativa aconteceu com a restrição rígida, apenas o valor fixo de CTH, com isto o sistema mal respondeu a mudança (Figura 45), com a distância caindo para 10m e o sistema respondendo muito lentamente, com o gráfico da distância quase inerte. Com isto, foi incluída mais uma linha na equação 38, com a variação de 5% dos valores de distância, obtendo uma adaptação inicial da restrição. Esta modificação solucionou erros de outros cenários, mas para este o efeito foi ainda pior, deixando ACC estático em velocidade e distância, como apresentado na Figura 46. Nestes dois casos o MPC gerou 36 avisos, todos aconteceram após o evento de diminuição da distância e não parou de gerar erros até o final dos 40 passos da simulação.

Este pulo de distância forçou afrouxar ainda mais a restrição de distância, criando uma restrição adaptável final, que é a equação 38 por completo. Entendendo que, se a distância ultrapassou em excesso o R_{des} , algo muito fora do padrão ocorreu e este relaxamento da restrição irá garantir que o controlador continue no comando. Assim, com valor mínimo de 5m para esta restrição em caso especial, a simulação do cenário 4 ocorreu de forma perfeita e não apresentou nenhum erro de loop do algoritmo, com seus resultado na Figura 47 e o diagrama de distância e velocidade relativa, na Figura 48.

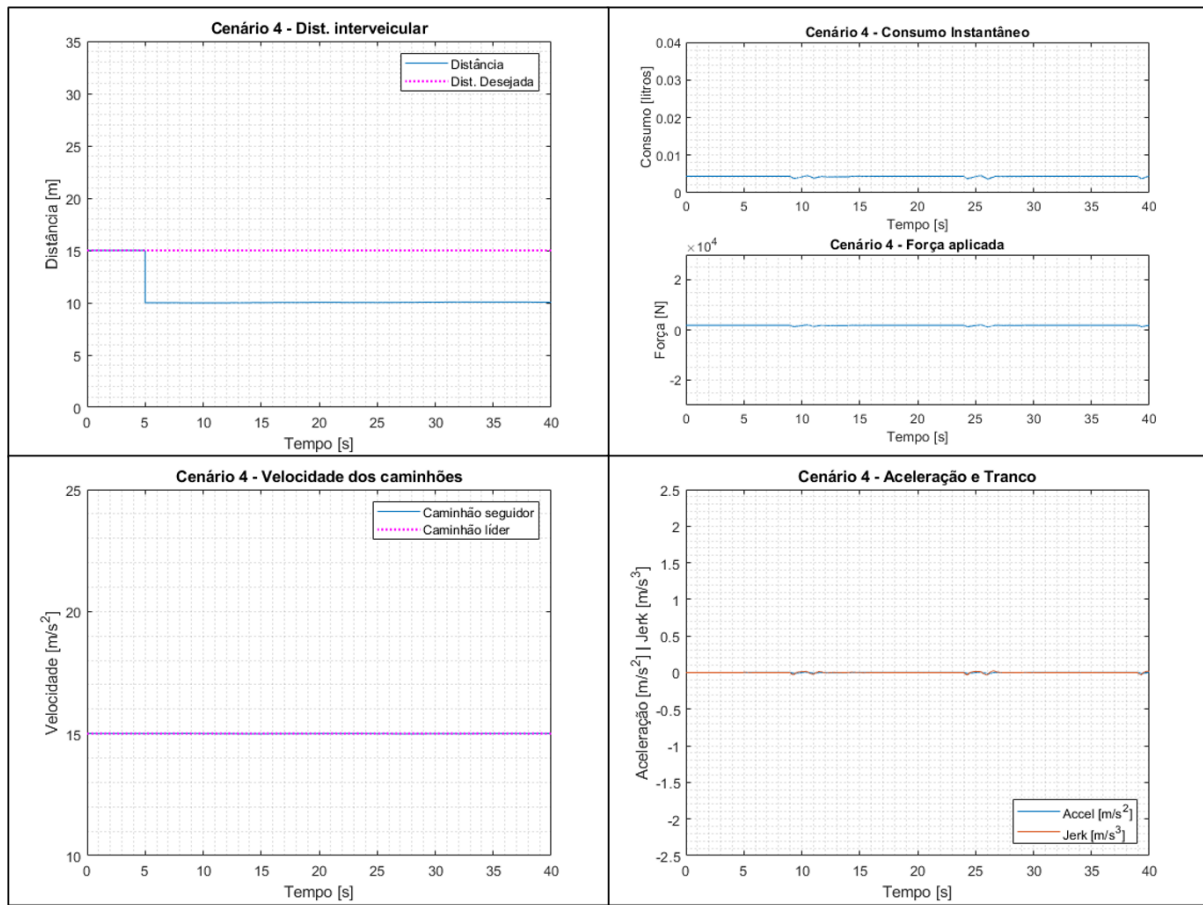
Portanto, com a restrição definida pela equação 38, a resposta do ACC foi muito boa, recompondo o comboio sem nenhum problema (Figura 48), sem infringir restrições, com conforto atingido e com segurança na viagem, pois manteve a distância igual ou acima de R_{des} após o degrau deste cenário.

Figura 45 -Simulação do Cenário 4 sem restrição adaptável



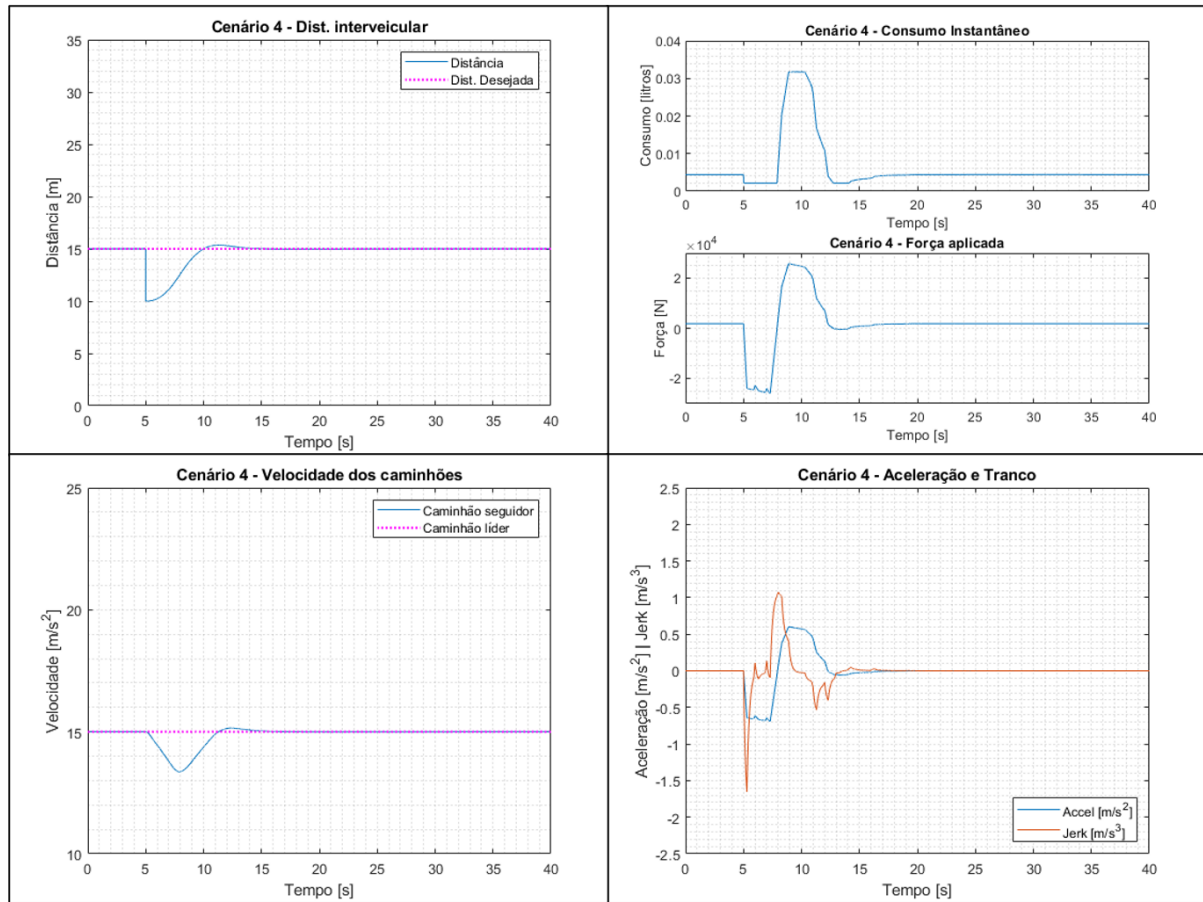
Fonte: Autor

Figura 46 - Simulação do Cenário 4 com restrição adaptável inicial.



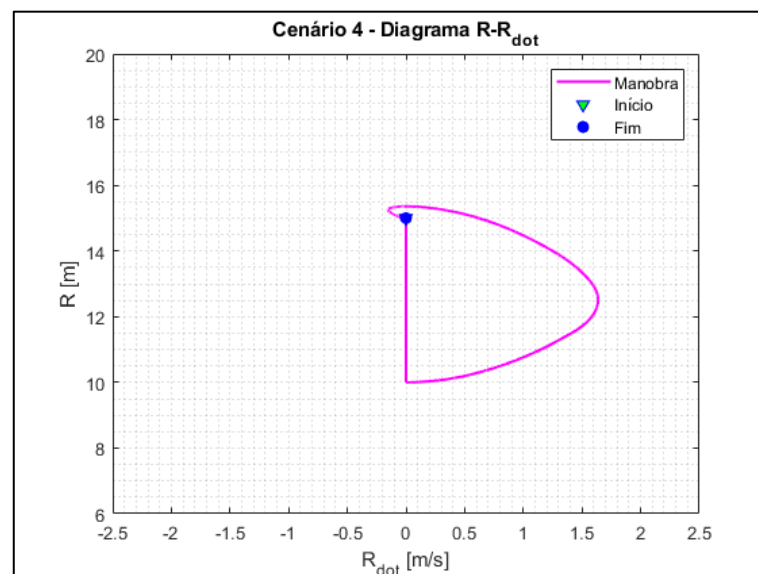
Fonte: Autor

Figura 47 - Simulação do Cenário 4 com restrição adaptável final



Fonte: Autor

Figura 48 - Diagrama $R - \dot{R}$ do Cenário 4 com restrição adaptável final

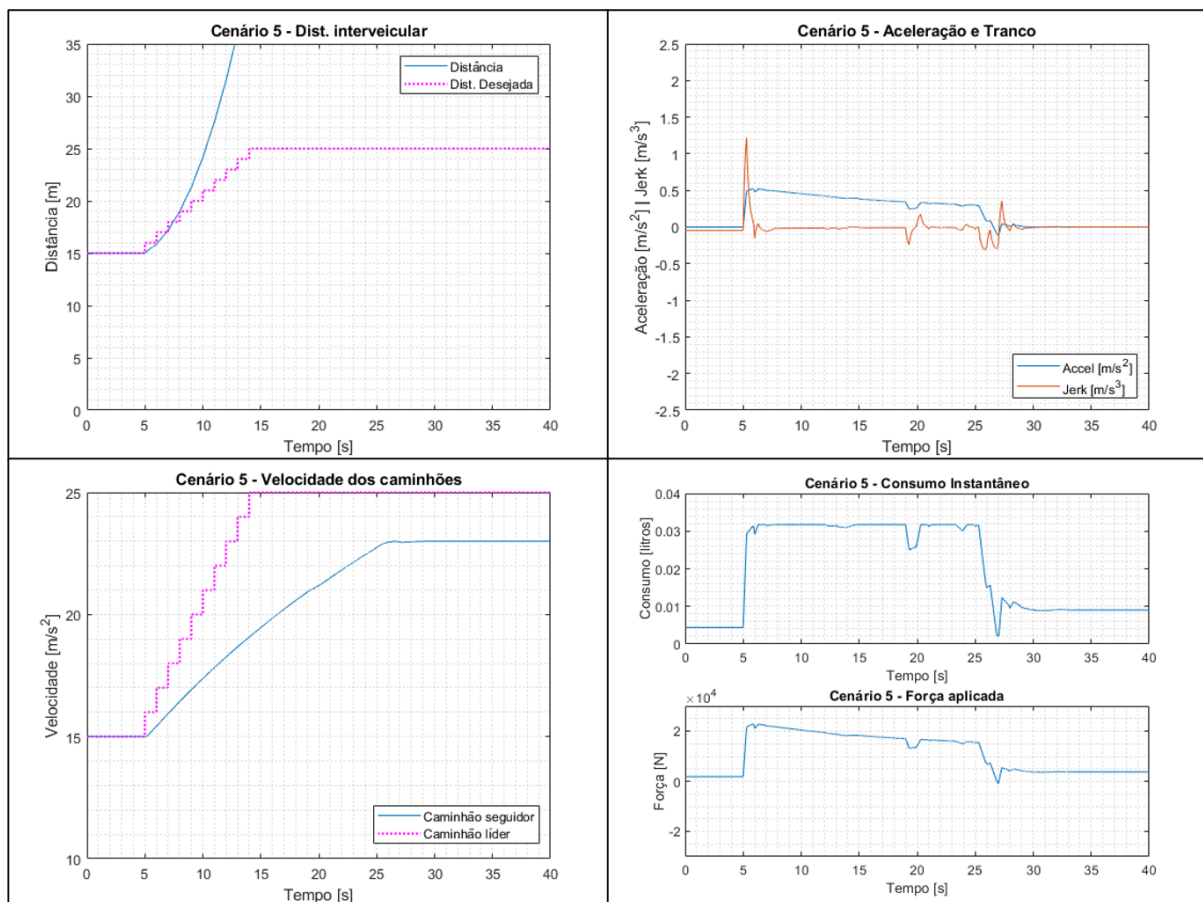


Fonte: Autor

4.6 CENÁRIO 5

Neste último teste, o veículo líder aumenta sua velocidade gradativamente até ultrapassar a velocidade de referência imposta pelo condutor seguidor, com isto o veículo seguidor tem que parar de aumentar sua velocidade quando chegar a v_{ref} , sendo este um quesito de segurança e controle do ACC (LIU et al., 2020). Portanto, o ACC cumpriu com o que deveria, o caminhão seguidor foi tentando acompanhar o líder até alcançar sua velocidade de referência e, depois deste momento, se manteve com velocidade constante de 82,8km/h. Para este caso, a distância interveicular aumenta indefinidamente e o diagrama $R - \dot{R}$ não tem serventia. O controlador gerou apenas um aviso aos 12 segundos, que é o momento em o veículo líder ultrapassa a velocidade de cruzeiro do caminhão seguidor. Os demais requisitos e restrições foram respeitados, demonstrando funcionamento satisfatório.

Figura 49 - Simulação do Cenário 5



Fonte: Autor

4.7 ANÁLISE GERAL DO SISTEMA

Foram realizados diversos cenários para testar o ACC com MPC, o qual foi desenvolvido com foco na fase da aproximação de formação de comboio veicular. Para a aproximação o controlador teve um bom desempenho perante as outras técnicas comparadas, conseguindo alcançar um conjunto de quesitos e restrições previamente estabelecidas, com apresentado na seção 4.1. Os demais cenários foram realizados para verificar o comportamento deste ACC em possíveis ocorrências na via. A Tabela 11 concentra dados destes cenários adicionais ao de aproximação. Fato, que em nenhum dos cenários houve violação das restrições do sistema (vide equações 33 a 38), demonstrando um bom gerenciamento do sistema pelo controlador proposto.

O uso de restrição mais aberta nos limites inferiores da velocidade e distância se mostraram efetivos em manter o controlador operante e efetivo. Porém, ficou claro que no cenário 2, ocorreu uma situação muito perigosa por conta do buffer aplicado, em que o veículo trafegou com um controle as escuras, retomando o controle após três segundos e quase chegando ao limite de velocidade inferior, por não ter processado as informações do ambiente nos controles aplicados.

Tabela 11 - Dados dos cenários simulados

Descrição	C1	C2	C3	C4	C5	Unid.
Consumo	0,2105	0,1402	0,1547	0,1444	0,2987	l
Distância mínima	15,00	5,65	14,90	10,00	15,00	m
Distância Máxima	24,46	15,00	25,00	15,36	115,29	m
Velocidade mínima	15,00	10,86	14,97	13,36	15,00	m/s
Velocidade Máxima	19,53	15,00	17,09	15,15	23,00	m/s
Aceleração mínima	-0,5496	-0,8190	-0,6221	-0,6929	-0,1150	m/s ²
Aceleração Máxima	0,5391	0,7445	0,5373	0,6016	0,5220	m/s ²
Tranco mínimo	-1,1328	-1,6546	-0,7618	-1,6546	-0,3090	m/s ³
Tranco Máximo	1,4681	1,1988	1,3823	1,0730	1,2216	m/s ³
Força mínima	-19776	-31240	-22968	-26003	-902	N
Força Máxima	23447	31329	23448	258101	22786	N

Fonte: Autor.

Os valores da Tabela 11 com as figuras dos respectivos cenários, além de se visualizar que nenhuma restrição foi ultrapassada, servem de análise para possíveis valores com

discrepâncias, auxiliando na interpretação do sobressinal e de certa lentidão de resposta do cenário 1. Observa-se um comportamento peculiar do controlador em determinados cenários, no qual possui uma boa resposta que estabiliza rapidamente nos cenários C3, C4 e C5, e para os cenários C1 e C2 aparenta lentidão nas suas ações. Isto aparenta, que para mudanças abruptas de velocidade, o sistema possui comportamento moderado na ação de controle, mas para mudanças abruptas de distância, este ACC possui bom comportamento. Entende-se, que qualquer mudança de velocidade de um veículo real será gradativa, por maior que for a sua variação de velocidade, fazendo necessário um trabalho neste ponto de forma mais real. O bom comportamento do controlador a variação de distância é um ponto positivo, pois mudanças de faixa de rodagem são normais e o comportamento é bem próximo do simulado.

4.8 PONTOS SOBRE O ALGORITMO DO MPC

O algoritmo criado e o solver SNOPT utilizado, geram uma série de informações sobre seu funcionamento nas simulações. Estas informações, enriquecem e complementam as análises do comportamento dos cenários com o ACC aqui proposto. Os dados computados referem-se, ao tempo total de execução do algoritmo, êxito do solver, estouro do buffer ótimo, avisos do solver, valor final da função custo a cada loop, todos com o respectivo passo que ocorreram. Com tudo isto, a Tabela 12 concentra estes dados de cada cenário testado, contendo em seu cabeçalho, da direita para a esquerda: tempo total de realização do algoritmo em minutos e segundos; período simulado em segundos; quantidade e passos que ocorreram avisos do solver; quantidade e passos de estouro do buffer; valor máximo da função custo e o passo; valor mínimo da função custo e o passo; média dos valores da função custo em toda a simulação; e mediana dos valores da função custo em toda a simulação. Na primeira coluna, temos os números do respectivo cenário, com atenção aos sufixos do cenário quatro com “h” para a não utilização da restrição adaptável, “ai” para o uso da restrição adaptável inicialmente proposta e “af” para o uso da restrição adaptável final.

Em todos os casos, o tempo de execução do MPC é maior do que o tempo simulado e não há relação linear nem determinística entre estes tempos, inviabilizando sua utilização em um caso real. Abrindo a possibilidade de trabalhos futuros, para aplicação das técnicas deste ACC com foco computacional para aplicações reais, focando em apresentar um resultado ótimo ou sub-ótimo, antes do término do período de amostragem do loop. Este algoritmo, também se preza a ser um benchmark para outros trabalhos, por exemplo, em melhoria de tempo de processamento e linearização do sistema. A aplicação em tempo real, embarcando o MPC em

um veículo, uma possibilidade futura, pode ser o uso de técnicas de emulação dos cálculos de controle ótimo, utilizando-se redes neurais artificiais, como descrito por Oliveira, Barros e Lima (2021), com seu MPC não linear.

Ocorreu estouro do buffer ótimo, apenas nas duas tentativas do cenário 4 com as restrições preliminares, abrindo frente ao estudo de controladores em segundo plano, que possam receber o comando do sistema, até o MPC se recompor. Os cenários com êxito na simulação, não apresentaram estouro de buffer e apenas o cenário 4-SS não utilizou valores do buffer ótimo, por não ter apresentado nenhum aviso do solver. Explicando, avisos consecutivos do solver, indicam uso mais profundo do buffer. Então, o cenário 1 obteve dois avisos seguidos e utilizou os níveis 2 e 3 do buffer, no cenário de aproximação MPCa e nos cenários 2 e 3, aconteceram três avisos consecutivos, o que indica o uso dos níveis 2, 3 e 4 do buffer, e no cenário de aproximação MPCh, ocorreram quatro warnings sucessivos, utilizando os níveis 2, 3, 4 e 5. Neste último, mais um aviso incorreria em estouro do buffer, mas para este e os demais, o uso do buffer foi útil e eficaz, demonstrando-se com um método útil e aplicável em contornar tais avisos da otimização.

Observando os valores máximos da função custo alcançados, é possível ver que estes acontecem junto com um aviso do solver, apresentando aparente tendência para maiores valores na incidência de maior quantidade de avisos, talvez pelo acúmulo destes. Porém, isto não é regra, por exemplo no cenário 2, ocorrem três avisos e seu valor máximo (606,4067) é inferior aos dos cenários 1 (11.922,0581) e 5 (13.250,4807), que possuem apenas dois avisos. Os menores valores calculados, são próximos, e vale separar o cenário de aproximação dos demais cenários, para a análise. Nos cenários de aproximação, eles ocorrem no último loop realizado, quando o comboio está formado e estabilizado. Para os demais cenários, a menos do cenário 2, o menor valor ocorre no passo 3, logo no início da simulação, que é um instante que o primeiro comboio continua formado e estabilizado. Portanto, para o sistema em regime, sem perturbações, é quando as otimizações alcançam seus menores valores neste ACC. Contudo, apenas um valor baixo da função custo, não é fator de sucesso, visto que no cenário 2 seu menor valor foi zero, ocorrendo em um warning do solver e quando ocorre o atraso de resposta do MPC. Logo, este fator deve ser analisado em conjunto com os demais dados trazidos pelo solver.

Ao final de uma otimização, obtemos um valor da função custo, a qual traz uma possível indicação de quão efetiva foi a otimização. Porém, o MPC executa otimizações sucessivas ao longo do tempo, tantos forem os passos necessários no período de funcionamento, gerando um resultado da função custo para cada loop calculado. À vista disto, foi calculada a média e a

mediana do total de passos performados, com a intenção de obter maior criticidade nestes ensaios. Vide, a média ou média aritmética, soma todos os valores e divide o resultado pela quantidade de valores (FÁVERO; BELFIORE, 2020), gerando a média das otimizações. No entanto, a média pode trazer uma informação tendenciosa, por termos valores muito grandes e muito pequenos no mesmo conjunto de dados (ZENDESK, 2022). A mediana, traz um valor que indica o ponto médio da distribuição dos pontos (FÁVERO; BELFIORE, 2020), utilizada para obter a tendência do centro do conjunto dos valores estudados, evitando tendências da média aritmética pelos valores discrepantes (ZENDESK, 2022).

Organizando os cenários pós aproximação, pelo menor valor de média, observa-se o cenário 4 com o menor valor e, apesar deste ter sido o cenário que não gerou avisos, os cenários em seguida não apresentam relação sólida com a quantidade de erros, portanto em ordem do menor ao maior valor, temos os cenários: 4 (sem avisos); 2 (3 avisos); 1 (2 avisos); 3 (4 avisos); 5 (2 avisos). Para a mediana destes cenários pós aproximação, os valores são muito próximos entre si, à menos do cenário 5 e organizando em ordem decrescente para mediana, temos os cenários: 2 (3 avisos); 3 (4 avisos); 4 (sem avisos); 1 (2 avisos); 5 (2 avisos). Nota-se, que os menores valores da mediana, são próximos aos menores valores da função objetivo, mas sem conclusão evidente. Em vista disto, estas ordenações, não trazem uma definição para medir o desempenho do ACC em diferentes cenários, até porque, os valores do cenário 4 com as diferentes restrições sem sucesso, apresentam os menores valores de ambas as medidas. Uma área a ser explorada no futuro, pode ser a das relações numéricas e estatísticas dos diversos valores gerados, tendo em vista o comportamento do controlador.

Verificando a média dos valores dos cenários de aproximação, mostra que estes possuem valores muito maiores que os demais testes, apesar de sua grande magnitude e de serem valores próximos entre si, ambos obtiveram sucesso em suas simulações. Entretanto, a mediana traz uma comparação mais interessante, por apresentar valores bem distintos entre eles, sabendo que o cenário de aproximação MPCa (mediana de 69,5744) obteve uma reposta temporal ligeiramente melhor do que o MPCh (mediana de 782,3435). Recordando, que os demais dados gerados destes cenários, foram muito próximos um ao outro. Isto posto, a mediana, aparenta ser um termo razoável a ser analisado dentre outros, na comparação e definição de quais diferenças são influentes ao desempenho, em um mesmo set de testes. Logo, se abre uma outra frente para pesquisas posteriores, com foco no desempenho e ajustes de um MPC, em que uma investigação estatística dos dados gerados, pode trazer melhores parâmetros a este tipo de método.

Tabela 12 - Informações de execução do MPC nos cenários realizados

Cenário	Parâm.	T. total [m:s]	T. teste [s]	Avisos SNOPT	Estouro buffer	Função custo máximo	Função custo mínimo	Média função custo	Mediana função custo
Apróx. MPCa	Valor	02:13	30	6 / 30	0	32.889,8006	0,1591	6.311,8177	69,5744
	Passo	-	-	5, 7, 10, 13, 14, 15	-	10	30	-	-
Apróx. MPCh	Valor	02:14	30	7 / 30	0	36.635,9319	0,1601	7.533,0684	782,3435
	Passo	-	-	5, 7, 10, 13, 14, 15, 16	-	16	30	-	-
1	Valor	02:17	40	2 / 40	0	11.922,0581	0,1586	370,0538	0,1974
	Passo	-	-	19, 20	-	20	3	-	-
2	Valor			3 / 40	0	606,4067	0,0000	42,6606	0,1586
	Passo	-	-	6, 7, 8	-	6	7	-	-
3	Valor	02:33	40	4 / 40	0	8.712,5496	0,1586	451,3920	0,1597
	Passo	-	-	7, 12, 13, 14	-	14	3	-	-
4 – af	Valor	02:17	40	0	0	57,6136	0,1586	2,9899	0,1598
	Passo	-	-	-	-	6	3	-	-
4 – ai	Valor	02:50	40	35 / 40	7	0,1586	0,0000	0,0198	0,0000
	Passo	-	-	6 a 40	-	2	6 em diante	-	-
4 – h	Valor	02:02	40	35 / 40	7	0,1586	0,0000	0,0198	0,0000
	Passo	-	-	6 a 40	-	2	6 em diante	-	-
5	Valor	02:56	40	2 / 40	0	13.250,4807	0,1586	629,0812	2,2381
	Passo	-	-	12, 32	-	12	3	-	-

Fonte: Autor

Por fim, a respeito dos tipos de avisos gerados pelo SNOPT nos cenários, ocorram determinados avisos que estão listados na Tabela 13, nos quais temos a soma da quantidade (Qtd) de ocorrência em todos os cenários, o número da saída (Exit) do aviso, informação do grupo que este está contido, texto apresentado pelo solver e possibilidade de resolução indicada

por Holmström, Göran e Edvall (2008b). A segunda e terceira coluna, são os indicadores dos avisos, nos qual o Exit é uma variável de computo do programa SNOPT e está ligada ao grupo do que foi sinalizado. O Inform, também contém a informação de grupo, mais a indicação do texto de saída, que entrega um melhor indicativo do que pode ter ocorrido. Na última coluna, estão as possíveis ações para mitigar o tipo de aviso, que foram aplicadas ao decorrer do desenvolvimento diminuindo sensivelmente a ocorrência delas. Sendo que, para a última linha, (Exit = 10, Inform = 41), também é indicada a equalização das magnitudes das variáveis manipuladas pela função custo, esta que não foi aplicada no desenvolvimento deste MPC. Desta parte, poderá se trabalhar adiante, na normalização da função custo e nos pesos de cada porção dela, impondo mais peso em um quesito ou em outro.

Na primeira linha, temos o aviso com maior ocorrência (Exit = 10, Inform = 41), este e o da segunda linha, fazem parte do grupo 10 de avisos e erros do SNOPT, o qual cita que os avisos desse grupo surgem quando existe uma solução, mas não necessariamente ela é ótima (HOLMSTRÖM; GÖRAN; EDVALL, 2008b). Com isto e a possibilidade de utilizar um resultado sub-ótimo, tem-se mais um ponto de trabalho à frente, que é analisar a criticidade destas sinalizações do solver e decidir seu tratamento, se deve utilizar o buffer ótimo ou não.

Em suma, o algoritmo desenvolvido possui o aparecimento de certos avisos do SNOPT, estes de baixa criticidade, mas que devem ser tratados. Importante, que não ocorreram erros na versão final, para os cenários testados, indicando êxito ao que foi proposto neste estudo.

Tabela 13 - Avisos do SNOPT, significado e possível solução

Qtd	Exit	Inform	Grupo	Texto de saída	Possibilidade de resolução aplicada
16	4	13	Grupo 10 - O problema parece ser inviável	Inviabilidades não lineares minimizadas	- Aplicar restrições que sejam do tipo "soft constraints"
1	4	14	Grupo 10 - O problema parece ser inviável	Inviabilidades minimizadas	- Aplicar restrições que sejam do tipo "soft constraints"
5	1	32	Grupo 30 - Erro de limite de recursos (iterações etc.)	Limite de iteração principal atingido	- Número de interações máximo foi alcançado, alterar opções do solver, para aumentar este limite.
2	10	41	Grupo 40 - Terminado após dificuldades numéricas - Erro de entrada. Sem precisão.	Ponto atual não pode ser melhorado	- Alterar as tolerâncias e precisões dos cálculos para a função objetivo.

Fonte: Compilado e interpretado de Holmström, Göran e Edvall (2008b)

5 CONCLUSÕES

O ACC vem sendo utilizado comercialmente em diversos tipos de veículos e pode ser aplicado com propósitos diversos, onde formar um comboio de maneira mais rápida pode ter seu interesse ou os olhares podem estar voltados à economia de combustível em comboios programados ou, bem como, para maior segurança ou ao conforto da viagem. Neste trabalho, discutiu-se o ACC, com olhares nas principais estratégias de chaveamento no ULC, focando no momento de aproximação em se formar um comboio. Propondo, o desenvolvimento de um ACC com a técnica MPC, para obter benefício das propriedades de Controle Ótimo, inserindo objetivos de consumo, segurança e conforto em viagem, no momento de projeto deste controlador. Identificou-se, os requisitos necessários, em relação à economia de combustível, segurança e conforto, para serem incorporados a formulação deste MPC e seu problema de Controle Ótimo. Realizando simulações, com os dois tipos usuais de procedimentos para a aproximação, linear e quadrática, comparando-as com as respostas do ACC idealizado. Além disto, outros cinco cenários foram elaborados, pretendendo recriar possíveis situações que ocorrem em uma rodovia. Sendo que, todas estas simulações, tiveram seus resultados apresentados, com análises ao desempenho e comportamento do sistema e do MPC proposto.

A partir das simulações e comparações dos controladores, para a fase de aproximação, conclui-se que a técnica proposta obteve êxito, em controlar o caminhão com ACC e obter bons resultados em relação à economia de combustível, segurança e conforto. Esta performance, demonstrou que nenhum dos requisitos foi negligenciado, como o caso das outras duas técnicas, alcançando o escopo de desenvolver um controlador, que contemplasse diferentes objetivos, no momento de seu projeto. Neste cenário, o MPC também foi testado com dois tratamentos diferentes da restrição de distância interveicular, com e sem o relaxamento de seu limite inferior por loop. Isto posto, o controlador com restrição adaptável se mostrou ligeiramente melhor do que o sistema sem este recurso, gerando um aviso a menos e apresentando uma resposta temporal mais firme. Entende-se, que a utilização desta restrição adaptável foi benéfica a resposta do sistema, nesta ocasião, em que o ponto de operação fica limítrofe à esta restrição.

Um detalhe interessante, foi a constatação da propriedade preditiva do MPC, que mesmo antes de chegar ao limite de troca, para velocidade ou distância em L_0 , já eram tomadas ações de controle com vistas aos passos futuros, destoando da evolução dinâmica das outras técnicas comparadas. Demonstrando, que a utilização de controlador preditivo, por antever situações que outros não preveem, pode suavizar as ações de controle, como percebido nas respostas

temporais das simulações. Outra particularidade, foi a trajetória no diagrama $R - \dot{R}$ realizada pelo MPC, este caminho foi muito próximo a do método quadrático, concluindo, que o exposto por Zhai et al. (2011), é próximo aos cálculos ótimos performados pelo MPC, com referência a celeridade em executar a manobra de aproximação para formar um comboio.

Com os demais cenários simulados, conseguimos observar o comportamento do MPC de forma mais abrangente. Para condição de degrau de velocidade do veículo líder, cenário 1, o sistema demonstrou aparente lentidão em recompor o comboio, mas efetuou a manobra de maneira suave, sem descumprir nenhuma restrição. O evento do cenário 3, de troca de faixa pelo caminhão precedente, apresenta boas respostas das variáveis do sistema, com uma recomposição de comboio mais veloz que o cenário 1. Apontando, que o algoritmo possui comportamentos diferentes, em relação ao tipo de perturbação sofrida, para recompor o comboio, mesmo nestes casos, que em ambos é necessário aumentar a velocidade para buscar o veículo líder. Assim, abrindo espaço para estudo futuro, de quais parâmetros influenciam este comportamento.

No episódio de frenagem brusca do cenário 2, foi constatado um atraso na ação de controle do ACC. Neste evento, aconteceram ao mesmo tempo, um aviso do solver e mudança abrupta no ambiente, deixando o controlador cego por três segundos, aplicando ação de controle de instante anterior, sem perceber a mudança ocorrida no cenário. Como proposição de trabalho posterior, além de um possível PID em segundo plano, poderia se melhorar o modelo de predição do veículo líder, com alguma técnica avançada, como inteligência artificial, que aprimore esta porção da predição do MPC, evitando esta cegueira do controlador.

Para cenário 4, em que um terceiro veículo, entra de forma repentina, no meio do comboio e encurta a distância interveicular, conseguiu-se uma boa resposta do sistema. Este comportamento, se deve ao trabalho com a restrição adaptável da distância interveicular, relaxando a restrição da distância, ciclo a ciclo, em condição adversa como esta. Em relação ao uso de restrições relaxadas, também é constatado, que seu uso se faz necessário em sistemas dinâmicos que possam apresentar mudanças das condições de contorno, mantendo regiões de convergência possíveis ao solver.

Por conta do histórico do desenvolvimento de ACCs, foi realizado o cenário 5, para testar a segurança do algoritmo. O qual, temos a condição de um veículo líder de comboio, que começa a aumentar sua velocidade, até ultrapassar a velocidade de referência do veículo precedente, este devendo fixar sua velocidade em sua referência e não continuar seguindo o líder. Nesta condição, o MPC se comportou como esperado, estabilizando o sistema na velocidade de referência e deixando o líder partir. Corroborando, com a aplicação do valor da

velocidade de cruzeiro escolhida, para o limite superior da restrição de velocidade do sistema, a qual funcionou a contento.

Para todas estas simulações, foram gerados diversos diagramas $R - \dot{R}$, mesmo quando não se tratava apenas da fase de aproximação. Com estes diagramas, constatou-se, que este diagrama pode ser utilizado para examinar distúrbios do tipo degrau, analisando o comportamento do sistema. Os quais, sempre se apresentaram como uma reta horizontal ou vertical, a depender do tipo de perturbação, e somando a esta, a informação da direção de formação desta reta, podem ser identificadas condutas indesejadas do controlador.

O MPC idealizado, possui um buffer de sinais de controle ótimo, para ser utilizado em caso de falha do controlado, porém ele é finito. Desta forma, uma possibilidade de trabalho futuro, seria aplicar um controlador convencional tipo PID, este funcionando em segundo plano e entrando em ação, caso um evento indesejado ocorra com o controlador preditivo, devolvendo o comando quando o MPC se reestabelecer.

As investigações ao comportamento do algoritmo proposto, abrem algumas possibilidades de novos trabalhos. Pelo MPC ser um Controle Ótimo recursivo, são gerados diversos dados das otimizações, que são de difícil interpretação. Com isto, um ponto a ser explorado, seria a das interações numéricas e estatísticas destes valores, buscando uma melhor interpretação, para o comportamento, desempenho e ajustes do controlador. Referente ao problema de controle ótimo, existe um ponto a ser mais bem explorado em possível continuação deste trabalho, que é a normalização da função custo e ponderação de pesos das diversas parcelas da função custo proposta. Isto, com intuito de mitigar avisos de mal funcionamento do solver e entender a atuação de cada requisito, que constam das parcelas da função objetivo. Um outro estudo posterior, seria a respeito da análise dos tipos de avisos do solver, visto que existem avisos de otimizações que geram valores sub-ótimos, que talvez possam ser utilizados ao invés do buffer.

O algoritmo aqui desenvolvido e a ferramenta de otimização utilizada, não possuem foco em embarcar o ACC idealizado, para um sistema de tempo real. Visto, que seus tempos de execução, superam em muito o tempo total simulado. Porém, este feito é benchmark para trabalhos futuros e anteriormente realizados, por exemplo, para melhorias de tempo de execução, linearizações ao sistema ou a função objetivo e restrições do MPC, dentre outros pontos passíveis de modificações e análises. Ainda neste tema, uma possibilidade de nova frente de trabalho, para tornar este ACC uma aplicação de tempo real, é a utilização de técnicas de emulação computacional de Controle Ótimo contido no MPC, como utilizando-se de redes

neurais, para salvar poder de processamento, viabilizando a aplicação em tempo real à ser embarcado.

Em suma, os objetivos foram alcançados de forma satisfatória, utilizando-se de um controlador que trabalha com diversas restrições simultâneas, um MPC, que realiza um esforço único à estas restrições, sem sacrificar um quesito demasiadamente em prol de outro. Desempenhando, a manobra de aproximação de maneira convincente e, performando de forma razoável, nos demais cenários comuns à uma rodovia. Além disso, foi extraído das simulações e suas análises, possibilidades de continuidade de pesquisas deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ACURA. **Adaptive Cruise Control (ACC) with Low-Speed Follow**. Disponível em: <https://www.acura.com/tlx/modals/adaptive-cruise-control-with-low-speed-follow>. Acesso em: 31 de outubro de 2021.

ALADWAN, M. N.; AWAYSHEH, F. M.; ALAWADI, S.; M. ALAZAB, T.; PENA, F. P.; CABALEIRO, J. C. TrustE-VC: Trustworthy Evaluation Framework for Industrial Connected Vehicles in the Cloud. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, vol. 16, no. 9, pp. 6203-6213, Sept. 2020, doi: 10.1109/TII.2020.2966288.

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. DOI:10.3141/1587-07.

BATISTA, F. J. B.; LEONARDI, F.; MENDES, A. S. Comparativo De Controladores Tipo Acc Em Relação Ao Consumo, Conforto E Segurança Na Fase De Aproximação Da Formação De Comboios Veiculares. **Congresso SAE BRASIL 2021**. São Paulo, SP, Brasil, 2021a. n. 2021-36-4628. ISSN 0148-7191

BATISTA, F. J. B.; LEONARDI, F.; MENDES, A. S. Controle de Cruzeiro (CC) e Controle de Cruzeiro Adaptativo (ACC): revisão da literatura. **XXI CONEMI - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial; Anais do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial**. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2021b. doi: 10.29327/aconemi.412363

BETTS, John T. **Practical methods for optimal control and estimation using nonlinear programming**. 2. ed. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. ISBN: 978-0-898716-88-7.

BRUMMELEN, J. V.; O'BRIEN, M.; GRUYER, D.; NAJJARAN, H. Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. Vol. 89, pp. 384-406, 2018, doi: 10.1016/J.TRC.2018.02.012.

CHEN, J.; YU, G.; YAN, X. Data Based Parameter Setting Method for Adaptive Cruise Control. **IEEE Access**, vol. 8, pp. 15291-15302, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2967321.

CHU, K.; LEE, M.; SUNWOO, M. Local Path Planning for Off-Road Autonomous Driving With Avoidance of Static Obstacles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, vol. 13, no. 4, pp. 1599-1616, Dec. 2012, doi: 10.1109/TITS.2012.2198214.

CORONA, D.; SCHUTTER, B. DE. Adaptive Cruise Control for a SMART Car: A Comparison Benchmark for MPC-PWA Control Methods. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, vol. 16, no. 2, pp. 365-372, March 2008, doi: 10.1109/TCST.2007.908212.

DASGUPTA, S.; RAGHURAMAN, V.; CHOUDHURY, A.; TEJA, T. N.; DAUWELS, J. Merging and splitting maneuver of platoons by means of a novel PID controller. **2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)**, 2017, pp. 1-8, doi: 10.1109/SSCI.2017.8280871.

DONOHEW, Barnaby E., GRIFFIN, Michael J. Motion sickness: effect of the frequency of lateral oscillation. **Aviation, Space, and Environmental Medicine** 75.8 (2004): 649-656. PMID: 15328780.

FANCHER, P.; BAREKET, Z. Evaluating Headway Control Using Range Versus Range-Rate Relationships. **Vehicle System Dynamics**, vol. 23:1, pp. 575-596, 1994. DOI: 10.1080/00423119408969076.

FÁVERO, L. P., BELFIORE, P. **Manual de Análise de Dados**. editora LTC - Rio de Janeiro - Parte 1 – Cap1 – pp. 38-44, 2020. ISBN 978-85-352-7087-7

GUERRERO-IBANEZ, J. A.; ZEDADALLY, S.; CONTRERAS-CASTILLO, J. Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things Technologies. **IEEE Wireless Communications**, vol. 22, no. 6, pp. 122-128, December 2015, doi: 10.1109/MWC.2015.7368833

HASPALAMUTGIL, K.; ADALI, E., Adaptive switching method for Adaptive Cruise Control. 2017. **21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)**, Sinaia, 2017, pp. 140-145, doi: 10.1109/ICSTCC.2017.8107024.

HIRZ, M.; WALZEL, B. Sensor and Object Recognition Technologies for Self-driving Cars. **Computer-Aided Design & Applications**. vol. 15, no. 4, pp.501-508, 2018. doi: 10.1080/16864360.2017.1419638

HTIKE, Z., PAPAIOANNOU, G., Velenis, E., Longo, S. Motion Planning of Self-driving Vehicles for Motion Sickness Minimisation, **2020 European Control Conference (ECC)**, 2020, pp. 1719-1724, doi: 10.23919/ECC51009.2020.9143789.

HOLMSTRÖM, Kenneth; GÖRAN, Anders O.; EDVALL, Marcus M. **USER'S GUIDE FOR TOMLAB /SNOPT**. 2008a. Disponível em: https://tomopt.com/docs/TOMLAB_SNOPT.pdf Acesso em: 13 nov. 2021.

HOLMSTRÖM, Kenneth; GÖRAN, Anders O.; EDVALL, Marcus M. **USER'S GUIDE FOR TOMLAB /SOL**. 2008b. Disponível em: https://tomopt.com/docs/TOMLAB_SOL.pdf Acesso em: 13 nov. 2021.

HU, Z. H.; ZHAO, D. B. Adaptive cruise control based on reinforcement learning with shaping rewards. **J. Adv. Camp. intell. intell. inform.**, vol. 15, no. 3, pp. 351-356, 2011. Doi: 10.20965/jaciii.2011.p0351.

HUCHO, Wolf Heinrich; AHMED, Syed R. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. [S.l.]: **Society of Automotive Engineers**, 1989.

KATO, S.; TAKEUCHI, E.; ISHIGURO, Y.; NINOMIYA, Y.; TAKEDA, K.; HAMADA, T. An Open Approach to Autonomous Vehicles. **IEEE Micro**, vol. 35, no. 6, pp. 60-68, Nov.-Dec. 2015, doi: 10.1109/MM.2015.133.

KATZOURAKIS, D. I.; LAZIC, N.; OLSSON, C.; LIDBERG, M. R. Driver Steering Override for Lane-Keeping Aid Using Computer-Aided Engineering. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, vol. 20, no. 4, pp. 1543-1552, Aug. 2015, doi: 10.1109/TMECH.2015.2401044.

KURAL, E.; GÜVENÇ, B. A. Model Predictive Adaptive Cruise Control. **2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**. 2010. pp. 1455-1461, doi: 10.1109/ICSMC.2010.5642478.

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.; PENG, H.; LI, K.; WANG, J. Minimum Fuel Control Strategy in Automated Car-Following Scenarios. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, vol. 61, no. 3, pp. 998-1007, March 2012, doi: 10.1109/TVT.2012.2183401.

LIN, Y.; NGUYEN, H. T.; WANG, C. Adaptive neuro-fuzzy predictive control for design of adaptive cruise control system. **2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)**. 2017. pp. 767-772. doi: 10.1109/ICNSC.2017.8000187.

LIU, Y.; FU, C.; TANG, X.; GUO, C.; HU, M. A Comparison of Mode Switching Strategies for Adaptive Cruise Control. **4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)**. 2020. pp. 465-470. doi: 10.1109/CVCI51460.2020.9338575.

LU, Y.; XU, X.; ZHANG, X.; QIAN, L.; ZHOU, X. Hierarchical Reinforcement Learning for Autonomous Decision Making and Motion Planning of Intelligent Vehicles. **IEEE Access**, vol. 8, pp. 209776-209789, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034225

LUU, D. L.; LUPU, C. Dynamics Model and Design for Adaptive Cruise Control Vehicles. **2019. 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)**, pp. 12-17, 2019, doi: 10.1109/CSCS.2019.00010.

MAN Trucks & Buses. **ACC Adaptive Cruise Control**. Disponível em: <https://www.mantruckandbus.com/en/company/glossar/acc-adaptive-cruise-control.html>. Acesso em: 31 de outubro de 2021.

MATHWORKS. **Understanding Model Predictive Control**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/videos/series/understanding-model-predictive-control.html>. Acesso em: 15 dez. 2020.

MARTINEZ, J.; CANUDAS-DE-WIT, C. A Safe Longitudinal Control for Adaptive Cruise Control and Stop-and-Go Scenarios. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, vol. 15, no. 2, pp. 246-258, March 2007, doi: 10.1109/TCST.2006.886432.

MCAULIFFE, B.; LAMMERT, M.; LU, X.-Y.; SHLADOVER, S.; SURCEL, M.-D.; KAILAS, A. Influences on Energy Savings of Heavy Trucks Using Cooperative Adaptive Cruise Control. **SAE Technical Paper** 2018-01-1181, 2018, doi:10.4271/2018-01-1181

MENDES, A. S. **Estratégia ótima de coordenação de caminhões para formação de comboios em rodovias**. Orientador: Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury, 2020. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

MENDES, A. S.; ACKERMANN, M.; LEONARDI, F.; FLEURY, A. T. Heavy-duty truck platooning: A review. **24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**, 2017.

MUNIR, U.; JUNZHI, Z. Weight Changing Model Predictive Controller for Adaptive Cruise Control with Multiple Objectives. **2018 IEEE International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA)**. 2018. pp. 62-66, doi: 10.1109/ICMRA.2018.8490547.

NANNI, B. B. **Estudo da Minimização do Consumo de Combustível em Comboio de Veículos Pesados por meio da Otimização dos Perfis de Velocidade**. Orientador: Prof. Dr. Fabrizio Leonardi, 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2020

NANNI, B. B.; PEREIRA, M. C.; MENDES, A. S.; LEONARDI, F. Análise Comparativa das Abordagens Quase-Estática e Dinâmica na Otimização dos Perfis de Velocidade de Veículos Pesados. **XIX CONEMI - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial**. Mato Grosso do Sul, Brasil. Campinas: Galoá, 2019. Doi: 10.17648/conemi-2019-108673

NEWTON, ISAAC. **Carta Para Robert Hook**. Em 05 de Fevereiro de 1676.

NORMA SAE J3016: **Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems**, 2014, USA, www.sae.org/autodrive, [20161012]

OLIVEIRA, A. D. B.; BARROS, S. N.; LIMA, R. B. C. "Controlador NMPC Embarcado para Aeropêndulo Utilizando MLP," **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, 2021, p. 1469-1475, doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529867.

RAJAMANI, R. **Vehicle Dynamics and Control**, ed Springer - New York - Cap6- pg141-166, 2012. ISBN 978-1-4614-1432-2. DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9

RAKHA, Hesham A.; AHN, Kyoungcho; MORAN, Kevin; SAERENS, Bart; VAN DEN BULK, Eric. Virginia Tech Comprehensive Power-Based Fuel Consumption Model: Model development and testing. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. 2011. Vol. 16, Issue 7, p. 492-503. Doi: 10.1016/j.trd.2011.05.008.

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. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:5(418)

RUTQUIST, Per E.; EDVALL, Marcus M. **PROPT - Matlab Optimal Control Software**. 2010. Disponível em: https://tomopt.com/docs/TOMLAB_PROPT.pdf. Acesso em: 13 de nov. 2021.

SARKER, Ruhul Amin; NEWTON, Charles S. **Optimization modelling: a practical approach**. CRC press, 2007. ISBN:978-1-4200-4310-5.

SEBORG, Dale E.; EDGAR, Thomas F.; MELLICHAMP, Duncan A.; DOYLE III, Francis J. **Process dynamics and control**. 4. ed. John Wiley & Sons, 2016. ISBN: 978-1-119-28591-5

SHAKOURI, P.; ORDYS, A.; LAILA, D.S.; ASKARI, M. Adaptive Cruise Control System: Comparing Gain-Scheduling PI and LQ Controllers. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 44, p. 12964-12969, 2011.

TE CONECTIVITY. **Autonomous Vehicle Technology**. Disponível em: https://www.te.com/usa-en/industries/automotive/insights/connected-car-2.html?te_bu=Aut&te_type=srch&te_campaign=ggl_usa_aut-ggl-usa-srch-auto-search-connected-car_sma-1890_1&elqCampaignId=105166&gclid=Cj0KCQjw5oiMBhDtARIsAJi0qk3Zi1W1eiqQclM1dDyavoLxQlzpHEA3nSR-DZnLznCwN877Xfrib6Z8aAouxEALw_wcB. Acesso em: 31 de outubro de 2021.

TOMLAB. **The TOMLAB® Optimization Environment**. 1989. Disponível em: <https://tomopt.com/tomlab/>. Acesso em: 13 nov. 2021.

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.

TURRI, Valerio. **Fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning through look-ahead control**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica (licentiate thesis), KTH Royal Inst. Technol., Stockholm, Sweden, 2015.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) 2010**. [S.l.], 2010.

VENKATARAMAN, Panchapakesan. **Applied optimization with MATLAB programming**. 2. ed. John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 978-0-470-08488-5

WANG, B.; ZHAO, D.; LI, C.; DAI, Y. Design and implementation of an adaptive cruise control system based on supervised actor-critic learning. **2015 5th International Conference on Information Science and Technology (ICIST)**. 2015, pp. 243-248, doi: 10.1109/ICIST.2015.7288976.

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, 2017. Doi: 10.1016/j.trd.2017.06.011.

WANG, Liuping. **Model predictive control system design and implementation using MATLAB®**. Springer Science & Business Media, 2009. ISBN 978-1-84882-330-3.

WIDMANN, G.; DANIELS, M.; HAMILTON, L.; HUMM, L.; RILEY, B; SCHIFFMANN, J. K.; SCHNELKER, D. E.; WISHON, W. H. Comparison of Lidar-Based and Radar-Based Adaptive Cruise Control Systems. **SAE Technical Paper**, Detroit, MI, EUA, n. 2000-01-0345, 2000. Doi: 10.4271/2000-01-0345.

XIAO, L.; GAO, F. Practical String Stability of Platoon of Adaptive Cruise Control Vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**. 2011. vol. 12, no. 4, pp. 1184-1194, Dec. 2011, doi: 10.1109/TITS.2011.2143407.

XIAO, L.; GAO, F. A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems. **Vehicle System Dynamics**. 2010. vol. 48:10, pp. 1167-1192, 2010. DOI: 10.1080/00423110903365910.

ZENDESK. **Média versus Mediana**. Disponível em: <https://support.zendesk.com/hc/pt-br/articles/4408839402906-M%C3%A9dia-versus-Mediana>. Acesso em: 03 de julho de 2022.

ZHAI, Y.; LI, L.; WIDMANN, G. R.; CHEN, Y. Design of switching strategy for Adaptive Cruise Control under string stability constraints. **Proceedings of the 2011 American Control Conference**, San Francisco, CA, USA, 2011, pp. 3344-3349, doi: 10.1109/ACC.2011.5991004.

ZHANG, J.; IOANNOU, P. A. Longitudinal control of heavy trucks in mixed traffic: environmental and fuel economy considerations. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**. 2006. Vol. 7, no. 1, p. 92-104, 2006. Doi: 10.1109/TITS.2006.869597.

ZHAO, R.C.; WONG, P.K.; XIE, Z.C.; ZHAO, J. Real-time weighted multi-objective model predictive controller for adaptive cruise control systems. **Int. Journal of Automotive Technol.** Vol 18, 279–292 (2017). doi: 10.1007/s12239-017-0028-2.

ZHAO, D. B.; HU, Z. H.; XIA, Z. P.; ALIPPI, C.; ZHU, Y.; WANG, B. Full-range adaptive cruise control based on supervised adaptive dynamic programming. **Neurocomputing**, vol. 125, pp.57-67, 2014. Doi: 10.1016/j.neucom.2012.09.034.

ZHAO, D. B.; WANG, B.; LIU, D. R. A supervised Actor-Critic approach for adaptive cruise control. **Soft Comput.**, vol. 17, no. 11, pp. 2089-2099, 2013. doi: 10.1007/s00500-013-1110-y.

ZHENHAI, G.; JUN, W.; HONGYU, H.; WEI, Y.; DAZHI, W.; LIN, W. Multi-argument Control Mode Switching Strategy for Adaptive Cruise Control System. **Procedia Engineering**. 2016. Vol.137, p. 581-589, 2016. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.295.

**APÊNDICE A – CÓDIGOS MATLAB DESENVOLVIDOS PARA O MPC E SUAS
SIMULAÇÕES NOS CENÁRIOS DESENVOLVIDOS.**

FrameWork do MPC para simulações

Início arquivo <FrameWork_Scene_10.m>

```
%% #10 CRIANDO O SCRIPT BASE PARA A SIMULAÇÃO

%Arquivos:
% BASE:
% script FW: FrameWork_Scene_10.m
% sub-função: "myode"
% função CO: CO_Velo_Dist_10_init.m ; CO_Velo_Dist_10.m
% Jerk scripts: Init_Jerk_My_ODE_Vector.m
% Jerk Func: jerk_myode.m
% Figuras: PLOTS_10_S0_Aprox.m ; Testes_Scratch.m
% Consumo via Simulink: MultiConsumo_MPC_01.slx
% origem: C:\Users\flavi\OneDrive - FEI\Flávio
Batista\MatLab\2022_08_07_Pos_DEFESA_Apendix

%% SISTEMA:
% dot(x) = v;
% dot(v) = (f - Phi*c*v^2 -m*g*kf)

% (L<=50) Phi = (1-(Cd1/(Cd2+d))); % coeficiente de redução de
arrasto
% (L >50) Phi = 1;

clear,clc , close all
tic % início de contagem de tempo do programa
%% Constantes do sistema
L = 50; % Ponto de decisão, pela distância
interveicular "d"
% Bloco C.I.s (serão as CIs iniciais em t0)
xi = 0; % posição inicial veículo Seguidor
xpi = 80; % posição inicial veículo Precedente
di = xpi-xi; % (xpi - xi) dist intrerveicular inicial,
vi = 23; % Velocidade inicial medida em 14m/s =
50.4km/h
vref = 23; % ref de velocidade de cruzeiro (CC) 20m/s
= 72km/h
vpi = 15; % velocidade inicial (e cte) do Veiculo
Precedente
% Força inicial com veículo a v=cte, está abaixo por causa das
contas.

% Bloco ctes
th = 1; % [s] tempo de impacto
g = 9.8066; % aceleração da gravidade m/s^2
kf = 0.003; % (BAETA) coef de resistencia ao rolamento
m = 40000; % [kg] Massa total
A = 10; % [m^2] Área frontal em m^2
```

```

rho = 1.2256;           % [kg/m^3] densidade do ar
Cd = 0.78;              % coef de arrasto aerodinâmico [adimens]
c = 0.5*rho*A*Cd;      % cte de arrasto aero dinâmico

% Ajuste de Força/Pos/Velô inicial com veículo a v=cte para o
#CO# no Init pré-loop
fii = c*vi^2+m*g*kf;    % Força inicial, Phi=1 =>
f=Phi*c*v^2+m*g*kf p/ v=cte
fiit=fii;
% #EDO# Inicialização VETORZÃO (tudo na base da EDO)
T = [0];               % Vetorzão Tempo
X = [0];               % Vetorzão Posição
V = [0];               % Vetorzão Velocidade
D = [0];               % Vetorzão Distância interveicular
A = [0];               % Vetorzão Aceleração
F = [0];               % Vetorzão Força (controle)
Xp = [0];              % Vetorzão Posição Precedente
Vp = [0];              % Vetorzão Velocidade Precedente

Tctrl = [0];
Fctrl = [0];

% Bloco de ctes para MPC
Ni = 1;                % N inicial do FW
Nf = 30;                % N final = passo final do FW.
%Qtd de loops, representando 1 segundo de período

% APOIO - Flags, Vetores de erros e otimização, etc.
w = -1                  % cte para mostrar em que passo está
Nerro = 0;              % numero de erros totais do #CO#
NePasso = [0,0,0,0];    % passo que ocorreram erros Passo,
ExitFlag, Inform
pN=1;                   % numero para a matriz NePasso
Otimizado =[0];         % Valor da Func Objetivo de cada
Otimização

%Ajustes do cenário
Scene = 0;              % Cenário = 0 | 1 | 2 | 3 | 4;
TScene = 40;            % tempo em que o Cenário entra em ação
Scene5Flag = 0;         % Flag que ativa o Cenário 5
VpMax = 20;             % Velocidade máx líder no Cenário 5
fllaagg=0;              % flag do pré loop para ter sucesso no
1º loop

%% PREPARATIVOS AO RECURSIVO - "Pré LOOP"
% faz o primeiro calc do #CO# para ter o primeiro Initial
GUESS p/ inciar o
% loop com um "chute" mais certo.

% #####
% ### PRÉ - LOOP ###

```

```

% #####

% ## decisão de "di" para não ferir as restrições (restrição
adaptável):
if di>=(vpi*th + 0.1)
    dmin=vpi*th;
elseif di<= vpi*th*(1-0.05)
    dmin=5;
else
    dmin=vpi*th*(1-0.05);
end

% #CO# p/ cálculo do controle "f_ctrl" e seu tempo "t_ctrl",
dado "vref" e c.i.s
[~,f_ctrl_c,solutionS,result] = CO_Velo_Dist_10_init( xi, vi,
vref, xpi, vpi, fii, L, w,dmin);
fii=f_ctrl_c(1);
[~,f_ctrl_c,~,solutionSout,result] = CO_Velo_Dist_10( xi, vi,
vref, xpi, vpi, fii, solutionS, L, w,dmin);
solutionS=solutionSout;
% Enquanto não houver uma solução sem erros, não começa a
simulação
while result.ExitFlag~=0&&ffllaagg~=25 % verificar se
existiu erro/warning no TomLab
    clc
    result.ExitFlag; % número da Flag
    result.ExitText; % texto do
erro/warning
    NePasso(pN,:) = [pN , result.ExitFlag , result.Inform
, -1] %infos do erro "ErroExFlag=-1"
    fii=f_ctrl_c(pN)
    pN=pN+1;
    [~,f_ctrl_c,~,solutionSout,result] = CO_Velo_Dist_10(
xi, vi, vref, xpi, vpi, fii, solutionS, L, w,dmin);
    solutionS=solutionSout;
    ffllaagg=ffllaagg+1;
end

% #####
w=0; % ### Marcar início do loop da simulação ### %GARANTIDO
QUE O 1º LOOP RODA SEM ERRO, PELO ANTERIOR
% #####
cprintf('blue*', 'Início loop N°d\n',w+1);
[t_ctrl_c,f_ctrl_c,j_ctrl_c,solutionSout,result] =
CO_Velo_Dist_10( xi, vi, vref, xpi, vpi, fii, solutionS, L,
w,dmin);
Otimizado(1,1) = result.f_k; % Func Obj final
solutionS=solutionSout;
if result.ExitFlag~=0 % verificar se existiu
erro/warning no TomLab
    result.ExitFlag % número da Flag

```



```

        result.ExitText                %texto do erro/warning
        Nerro = Nerro+1;                %qtd erros
        NePasso(pN,:) = [w+1 , result.ExitFlag ,
result.Inform , 0]; %infos do erro
        pN=pN+1;
    end

% % #CO# Ajuste de ti, tf, fi, ff, etc vindo do TomLab - vetor
completo
t_ctrl_c = [0 ; t_ctrl_c];
f_ctrl_c = [fii ; f_ctrl_c];

% #CO#>>#EDO# cria tempo p/ trabalhar na #EDO#
% Precisa, de base 0.1 para pegar o tepo certo entre "0~1s"
t_ctrl_x = 0:0.1:35; %:36;                %t = 35s passo 0.1s
(SMOTH)
f_ctrl_x = interp1(t_ctrl_c,f_ctrl_c,t_ctrl_x); %vetor total e
linear no passo

% #CO#>>#EDO# Cria vetores de 0~1s
t_ctrl = 0:0.1:1;                %1s - t do controle de 0~1s
[ll , cc]=size(t_ctrl);
for iii=1:cc
    f_ctrl_1(iii) = f_ctrl_x(iii); % f do controle no periodo
0~1s
    f_ctrl_2(iii) = f_ctrl_x(1*cc+iii-1); % f do controle no
periodo 1~2s
    f_ctrl_3(iii) = f_ctrl_x(2*cc+iii-2); % f do controle no
periodo 2~3s
    f_ctrl_4(iii) = f_ctrl_x(3*cc+iii-3); % f do controle no
periodo 3~4s
    f_ctrl_5(iii) = f_ctrl_x(4*cc+iii-4); % f do controle no
periodo 3~4s
    solutionL = solutionS;
end

ErroExFlag = 1;
% >>#EDO# (t_ctrl\/, f_ctrl\/, vpi\/, xpi\/,L\/) + CIs (xi\/,
vi\/)

%% DAQUI PRA FRENTE JÁ DEVE SER RECURSIVO EM UM "FOR"
for w = Ni:Nf

    %% #EDO# Programa que processa a EDO

    %CO#>>#EDO# decisão do vetor f de controle para #EDO#
    switch ErroExFlag
        case 1
            f_ctrl = f_ctrl_1;
        case 2
            f_ctrl = f_ctrl_2;

```

```

        case 3
            f_ctrl = f_ctrl_3;
        case 4
            f_ctrl = f_ctrl_4;
        case 5
            f_ctrl = f_ctrl_5;
        otherwise
            disp( ['BUG - ErroExFlag = ', num2str(ErroExFlag)]
);
            break;
        end

% >>#EDO# (t_ctrl\/, f_ctrl\/, vpi\/, xpi\/, L\/) + CIs
(xi\/, vi\/)

% #EDO# as c.i.s estão acima no cabeçalho xi, vi. Apenas
c.i.s do veículo a simular (seguidor)
IC = [xi vi]; %C.I.s xi =
0, vi = 0
% #EDO# ti=0, tf=1s tempo simulação de 1 segundo p/ ODE45
Tspan = [t_ctrl(1) t_ctrl(end)]; % sempre de 0 a
1s

% limpa sujeitira de loop anterior, não atrapalhar a ode45
clear t f z dz x v a d
% #ODE# Opções da ODE45 (odeset) aumentando o numero de
ptos (precisão)
options = odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-10, 'MaxStep',
1e-2);
% #ODE# z = [x v]'
[t,z] = ode45(@(t,z)myode(t,z,t_ctrl,f_ctrl,vpi,xpi,L),
Tspan,IC, options); %executa ODE45

% #EDO# #GUARDAR# Retrieving states
xs = z(:,1); %posição veículo seguidor
vs = z(:,2); %velocidade veículo seguidor
[dz,x,v,a,f,d,xp] = myode(t,z,t_ctrl,f_ctrl,vpi,xpi,L);

% ### FIM de cálculos de UM LOOP ###

% NESTE PONTO TENHO:
% #CO# Variáveis *_ctrl_c (0~35s) ; t_ctrl e f_ctrl (0~1s);
% #EDO# Variáveis: xs ; vs ; a ; f ; d ; xp ; t (0~1s)

% #EDO# VETORIZAÇÃO coluna(tudo na base da EDO)
T = [ T ; (T(end)+t)]; % Vetorção Tempo sempre de 0 a
1
X = [ X ; xs ]; % Vetorção Posição
V = [ V ; vs ]; % Vetorção Velocidade
D = [ D ; d ]; % Vetorção Distância
interveicular

```

```

A = [ A ; a ];           % Vetorção Aceleração
F = [ F ; f ];           % Vetorção Força (controle)
Xp = [ Xp ; xp ];        % Vetorção Posição Precedente
[linha,~]=size(xp);
Vpp = [];
for i = 1:linha
    Vpp(i,1)=vpi;
end
Vp = [ Vp ; Vpp ];       % Vetorção Velocidade
Precedente

Tctrl = [ Tctrl ; (Tctrl(end)+t_ctrl)']; % Vetorção
Tempo #CO#
Fctrl = [ Fctrl ; f_ctrl' ]; % Vetorção
Força #CO#

% $$$ PONTO PARA MEXER NO CENÁRIO $$$
vref_N = vref;           % Nova vref
xpi_N = xp(end);         % Nova xpi
vpi_N = vpi;             % Nova vpi

% escolha e ação dos Cenários
if w==TScene
    switch Scene
        case 0
            % nada % S0 - Cenário 0
        case 1
            vpi_N = vpi_N + 3; % S1 - Cenário 1
        case 2
            vpi_N = vpi_N - 2; % S2 - Cenário 2
        case 3
            xpi_N = xpi_N + 10; % S3 - Cenário 3
        case 4
            xpi_N = xpi_N - 5; % S4 - Cenário 4
        case 5
            Scene5Flag = 1; % S5 - Cenário 5
ativado
        otherwise
            cprintf('red*','BUG - Erro no Cenário\n')
            break;
        end
    end
end
% desenvolvimento do Cenário 5
if Scene5Flag == 1
    vpi_N = vpi_N + 1;
    if vpi_N == VpMax;
        Scene5Flag = 0;
    end
end
end

% $$$ Gerar CIs para próximo LOOP $$$

```

```

% #CO# xi, vi, vref, xpi, vpi, fi, L(nunca muda)
% #EDO# te & fe(ger #CO#), vpi, xpi, L(nunca muda)

xi = xs(end); % posição inicial veículo
Seguidor
xpi = xpi_N; % ### posição inicial veículo
Precedente
vi = vs(end); % Velocidade inicial medida em
14m/s = 50.4km/h
vref = vref_N; % ref de velocidade de
cruzeiro (CC) 20m/s = 72km/h
vpi = vpi_N; % ### velocidade inicial do
Veiculo Precedente
fii = f(end); % Força inicial (usar f ou
f_ctrl - não há diferença)

% mostra o número do LOOP que vai começar
fprintf('blue*', 'Início loop N°%d\n', w+1);

%          $$$$$$$$$$$$$$$$
%          $$$ NOVO LOOP $$$
%          $$$$$$$$$$$$$$$$

% limpar vetores da #CO#, pois tamanho do vetor pode
variar
clear t_ctrl_c f_ctrl_c
% LOOP Anterior>>#CO#
% >>#CO# Inputs: (xi\/, vi\/, vref\/, xpi\/, vpi\/, L\/)
di=xpi-xi;
% ## decisão de "di" (restrição adaptável):
if di>=(vpi*th + 0.1)
    dmin=vpi*th;
elseif di<= vpi*th*(1-0.05)
    dmin=5;
else
    dmin=vpi*th*(1-0.05);
end

% #CO# p/ cálculo do controle "f_ctrl" e seu tempo
"t_ctrl", dado "vref" e c.i.s
[t_ctrl_c, f_ctrl_c, j_ctrl_c, solutionSout, result] =
CO_Velo_Dist_10( xi, vi, vref, xpi, vpi, fii, solutionS, L,
w, dmin);
Otimizado(w+1,1) = result.f_k; % Func Obj final
solutionS=solutionSout;
if result.ExitFlag~=0 % verificar se existiu
erro/warning no TomLab
    result.ExitFlag % número da Flag
    result.ExitText % texto do erro/warning
    Nerro = Nerro+1; % qytd erros

```

```

        NePasso(pN,:) = [w+1 , result.ExitFlag ,
result.Inform , ErroExFlag+1 ];%infos do erro
        pN=pN+1;
        ErroExFlag = ErroExFlag+1;
        solutionS = solutionL;
    end

    if (result.ExitFlag~=0)&&(ErroExFlag~=6) % verificar
se existiu erro/warning no TomLab
        cprintf('red*','ErroExFlag, usando
f_ctrl_%d\n',ErroExFlag);
    else
        if ErroExFlag==6
            cprintf('red*','Estouro do ErroExFlag = 6, cauculo
#CO# vindo de ERRO');
        end

        ErroExFlag = 1

        % #CO# Ajuste de ti, tf, fi, ff, etc vindo do TomLab -
vetor completo
        t_ctrl_c = [0 ; t_ctrl_c];
        f_ctrl_c = [fii ; f_ctrl_c];

        % #CO#>>#EDO# cria tempo p/ com a EDO
        % Precisa, para pegar o tepo certo entre "0~1s"
        t_ctrl_x = 0:0.1:35; %t =
35s passo 0.1s
        f_ctrl_x = interp1(t_ctrl_c,f_ctrl_c,t_ctrl_x); %vetor
total e linear no passo

        %##já existe t_ctrl = 0:0.1:1; %1s - t do
controle de 0~1s
        [ll , cc]=size(t_ctrl);
        for iii=1:cc
            f_ctrl_1(iii) = f_ctrl_x(iii); % f do
controle no período 0~1s
            f_ctrl_2(iii) = f_ctrl_x(cc+iii-1); % f do
controle no período 1~2s
            f_ctrl_3(iii) = f_ctrl_x(2*cc+iii-2); % f do
controle no período 2~3s
            f_ctrl_4(iii) = f_ctrl_x(3*cc+iii-3); % f do
controle no período 3~4s
            f_ctrl_5(iii) = f_ctrl_x(4*cc+iii-4); % f do
controle no período 4~5s
            solutionL = solutionS;
        end
    end

    % >>#EDO# (t_ctrl\/, f_ctrl\/, vpi\/, xpi\/,L\/) + CIs
(xi\/, vi\/)

```

```

end
timeElapsed = toc; %finaliza tempo de execução do
MPC
tempo = seconds(timeElapsed);
cprintf('blue-', 'Tempo total de execução do MPC = ');
tempo.Format = 'hh:mm:ss'

Nerro
NePasso

%% Consertando "VETORZÃO" - retirando o "0" extra inicial e
os tempos
% inteiros repetidos.
% #EDO# VETORZÃO (base da EDO)
T(1,:) = []; % Vetorzão Tempo
X(1,:) = []; % Vetorzão Posição
V(1,:) = []; % Vetorzão Velocidade
D(1,:) = []; % Vetorzão Distância interveicular
A(1,:) = []; % Vetorzão Aceleração
F(1,:) = []; % Vetorzão Força (controle)
Xp(1,:) = []; % Vetorzão Posição Precedente
Vp(1,:) = []; % Vetorzão Velocidade Precedente
[linha, coluna] = size(T);
for i = 1:(Nf-1)
    ii=1;
    while(ii~=linha-i)
        if (T(ii,:) == i)
            T(ii,:) = []; % Vetorzão Tempo
            X(ii,:) = []; % Vetorzão Posição
            V(ii,:) = []; % Vetorzão Velocidade
            D(ii,:) = []; % Vetorzão Distância
interveicular
            A(ii,:) = []; % Vetorzão Aceleração
            F(ii,:) = []; % Vetorzão Força (controle)
            Xp(ii,:) = []; % Vetorzão Posição Precedente
            Vp(ii,:) = []; % Vetorzão Velocidade
Precedente
            ii=ii+2;
        else
            ii=ii+1;
        end
    end
end
end
% #CO# VETORZÃO (base da CO)
Tctrl(1,:) = []; % Vetorzão Tempo da #CO#
Fctrl(1,:) = []; % Vetorzão Força da #CO# (controle)
[linha, coluna] = size(Tctrl);
for i = 1:(Nf-1)
    ii=1;
    while(ii~=linha-i)
        if (Tctrl(ii,:) == i)

```

```

        Tctrl(ii,:) = [];          % Vetorção Tempo
        Fctrl(ii,:) = [];          % Vetorção Força (controle)
        ii=ii+2;
    else
        ii=ii+1;
    end
end
end
% neste ponto, todos os vetores gerados na simulação e
controle, estão ajustados.

%% Calculo do Jerk #JEDO#
% limpa sujeitira de loop anterior
clear t f z dz x v a d xp vp

% #JEDO# CIs do sistema para #JEDO#
xi = X(1); vi = V(1); ai=A(1);          % CIs Veículo Seguidor
xpi = Xp(1); vpi = Vp(1);              % CIs Veículo Precedente

% #JEDO# CIs para a ODE45
IC = [xi vi ai];
% #JEDO# tempo de simulação inicio e fim, 36 ou 35 "decidir"
Tspan = [Tctrl(1) Tctrl(end)];

% #JODE# Opções da ODE45 (odeset)
options = odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-10, 'MaxStep', 1e-
2);
% #JODE# z = [x v]' - cálculos da para o sistema modificado
para ter o Jerk
[t,z] =
ode45(@(t,z)jerk_myode(t,z,Tctrl,Fctrl,vpi,xpi,L,Scene,TScene)
, Tspan,IC, options);      %executa ODE45
%[t,z] =
ode45(@(t,z)jerk_myode_Vector(t,z,Tctrlj,Fctrlj,vpi,xpi,L,Scen
e,TScene), Tspan,IC);      %executa ODE45

fprintf('blue*','calculos ode45 executados para o JERK\n')

% #JODE# recupera as informações para o Jerk e demais
informações.
[dz,x,v,a,jerk,f,d,xp] =
jerk_myode(t,z,Tctrl,Fctrl,vpi,xpi,L,Scene,TScene);

fprintf('blue*','\nretrieve da ode45 executados para o
JERK\n')

%% Cálculo do CONSUMO:
Alfa0    = 2.16e-3;                %s^-1                %Baeta =
1.45e-3
Alfa1    = 7.98e-5;                %s^-1*kW^-1        %Batea =
8.48e-5

```

```

Alfa2      = 1.00e-8;                                %s^-1*kW^-2

if F(1)*V(1) >= 0
    ConsumoL_t(1) = (Alfa0 + Alfa1*((F(1)*V(1))/1000) +
Alfa2*((F(1)*V(1))/1000)^2);
else
    ConsumoL_t(1) = Alfa0;
end

[linha, coluna] = size(T);
for i = 2:linha
    if F(i)*V(i) >= 0
        ConsumoL_t(i) = (Alfa0 + Alfa1*((F(i)*V(i))/1000) +
Alfa2*((F(i)*V(i))/1000)^2);% + ConsumoL_t(i-1);
    else
        ConsumoL_t(i) = Alfa0; % + ConsumoL_t(i-1);
    end
end

%% Calculo para Diagrama R-Rdot
R = Xp-X;
Rdot = Vp-V;

tempo = seconds(timeElapsed);
cprintf('blue-', 'Tempo total de execução = ');
tempo.Format = 'hh:mm:ss'

%% #####
% #####          FUNÇÕES          #####
% #####

%% #EDO# Função p/ EDO, da dinâmica a ser processada (myode.m)
%% #####
% #####          EDO - DINÂMICA p/ LOOP          #####
% #####

    function [dz,x,v,a,f,d,xp] = myode(t,z,te,fe,vpi,xpi,L)
% Ajuste da base de tempo, te;fe base externa, t;f base
interna
    f = interp1(te,fe,t);
% Dados/constantes da dinâmica do veículo seguidor
    g = 9.8066;                % aceleração da gravidade m/s^2
    kf = 0.003;                % coef de resistencia ao rolamento
    m = 40000;                 %[kg] Massa total
    A = 10;                    %[m^2] Área frontal em m^2
    rho = 1.2256;              %[kg/m^3] densidade do ar net-> 1.201
kg/m^3

```



```

    Cd = 0.78;           % coef de arrasto aerodinâmico
[adimens]
    c = 0.5*rho*A*Cd;    % [kg/m] cte de arrasto aero dinâmico

    %SaÃ-das e alias
    [Ll,Cc] = size(z);  % SE vetor coluna, transforma em vetor
linha
    if Cc ==1
        z = z';
    end

    % estados e dados a exporatar (Partel), pois preciso de
"x"
    x = z(:,1);          % [m] posição

    % Veículo Precedente, para ter a Distância Interveicular
    xp(:,1) = xpi + vpi*t; % [m] posição veículo
Precedente
    d(:,1) = (xp - x);    % [m] distância interveicular

    % Arrasto com veículo a frente
    %(HUCHO; AHMED, 1987)
    Cd1 = 14.0766;       % coef ajuste da curva
    Cd2 = 24.4626;       % coef ajuste da curva
    %d = ((di + vpi.*t) - x)      ;% [m] distância
interveicular
    % coeficiente de redução de arrasto
    if d <= L
        Phi = (1-(Cd1./(Cd2+d))); %Phi = (1-
(Cd1/(Cd2+d)));
    else
        Phi = 1;          %Phi = 1;
    end

    % estados e dados a exporatar (Parte2)
    v = z(:,2);           %velocidade
    a = (f -c*Phi.*(v.^2) -m*g*kf)/m; %aceleração

% EDO
    dotx = v;
    dotv = a;
    dz = [ dotx
           dotv ];
end

```

Fim do arquivo <FrameWork_Scene_10.m>

Script do PROPT para preparo e inicialização da simulação do MPC.

Início arquivo < CO_Velo_Dist_10_init.m>

```
%% FUNÇÃO #CO# VELOCIDADE e DISTÂNCIA de inicialização
%
% Função a ser chamada para gerar Initial Guess para início da
simulação

%Sistema:
% dot(x) = v;
% dot(v) = (f - Phi*c*v^2 -m*g*kf)/m

function [t_ctrl_c,f_ctrl_c,solutionS,result] =
CO_Velo_Dist_10_init( xi, vi, vref, xpi, vpi, fii, L, w,dmin)
    %% constantes
    th = 1;                %[s] tempo de impacto
    g = 9.8066;            % aceleração da gravidade m/s^2
    kf = 0.003;            % coef de resistencia ao rolamento
    m = 40000;             %[kg] Massa total
    A = 10;                %[m^2] Área frontal em m^2
    rho = 1.2256;          %[kg/m^3] densidade do ar net-> 1.201
kg/m^3
    Cd = 0.78;             % coef de arrasto aerodinâmico
[adimens]
    c = 0.5*rho*A*Cd;      % cte de arrasto aero dinâmico

    %% iniciando as escritas do Propt
    Timef =36;
    toms t                  % variável
independente TEMPO
    p = tomPhase('p', t, 0, Timef, 60,[],'fem1s'); % cria
phase de estudo
    setPhase(p);

    tomStates v x           % estados X, V
    tomControls f           % controle FORÇA
Tração é o "u"
    toms accel jerk d s1 s2
    %ver a aceleração:
    accel = dot(v);
    jerk = dot(accel);

    %% initial guess - chute inicial
    x0 = { icollocate(x == vi*t)      %guess como se Vi ==
cte
            icollocate(v == vi)       %guess com Vi=cte
            collocate(f == fii)       %guess com nop
fii=c*vi^2+m*g*kf; (Phi=1)
    };
```

```

%% dados do Veículo Precedente, para ter a Distância
Interveicular
xp = xpi + vpi.*t;    % [m] este dado virá do sistema, mas
tem que estimar com vpi=cte
                        %e caminhão precedente estando a xpi
(abs) e di metros a frente do seguidor
d = (xp - x);        % [m] distância interveicular (talvez
já entregue esse dado
                        %pronto e terá que estimar com
evolução cte no periodo da otimização

%% box constraints - são restrições de desigualdade geral
(upper, Lower e demais)
cbox = { 0 <= collocate(x) <= 1500           %
distancia absoluta (não precisa)
        10 <= collocate(v) <= vref           % Limites
de velocidade
        -355000 <= collocate(f*v) <= 355000   % Limite
de potência do motor
        -2 <= collocate(accel) <= 1           % Limite
de Aceleração
        -2 <= collocate(jerk) <= 2           % Limite
de Tranco (Jerk)
        %collocate(dmin <= d)                % Limite da
Distância interveicular
        %dmin <= collocate(d)
        %vpi*th <= collocate(d)
        vpi*th <= collocate(d+(s1-s2))        %
distancia com0 SOFT CONSTRAINT
        collocate(s1)>=0                      % soft
constraint 1
        collocate(s2)>=0                      % soft
constraint 2
    };

%% Boundary Constraints - condições de contorno
cbnd = {initial({x == xi;
                v == vi;
                })
    };

%% Arrasto com veículo a frente
%(HUCHO; AHMED, 1987)
Cd1 = 14.0766;    % coef ajuste da curva
Cd2 = 24.4626;    % coef ajuste da curva

Phi = ifThenElse(d, 'lt', L, (1-(Cd1/(Cd2+d))), 1, 0.2);

%% ODEs and path constraints
ceq = collocate({
    dot(x) == v;

```

```

dot(v) == (f - m*g*kf - Phi*c*v^2)/m;
});

%% CONSUMO:
Alfa0 = 2.16e-3; %s^-1 %Baeta
= 1.45e-3
%Alfa1 = 7.98e-5; %s^-1*kW^-1
%Batea = 8.48e-5
%Alfa2 = 1.00e-8; %s^-1*kW^-2
% Para valores negativos de potência:
Alfa1 = ifThenElse(f*v,'lt',0,0,7.98e-5,0.1);
Alfa2 = ifThenElse(f*v,'lt',0,0,1e-8,0.1);

ConsumoL_s = (Alfa0 + Alfa1*((f*v)/1000) +
Alfa2*((f*v)/1000)^2);

%% FUNÇÃO OBJETIVO
% %minimiza o Jerk (tranco) no veículo - presentenas duas
OBJ
objectiveJ = sqrt(integrate(accel^2));
% %minimiza o consumo de combustível(Pot em kW) -
presentenas duas OBJ
objectiveC = integrate(Alfa0 + Alfa1*((f*v)/1000) +
Alfa2*((f*v)/1000)^2);
% %minimiza a distância do th com a distância que está do
Precedente
objectiveD = (d - vpi*th)^2;
% %minimiza o erro de velocidade em relação a referência
VREF
objectiveV = 10*(v-vref)^2;

%Então temos duas funções objetivo
objective =
integrate(ifThenElse(d,'gt',L,objectiveV,objectiveD,0))+object
iveJ+objectiveC+s1+s2;

% Solving the Problem
options = struct;
options.name = 'Dist_Velo_FW 10 init';
% ## New Options ##
options.Prob.SOL.optPar = repmat(-999,72,1); % limpa a
"optPar" para valores default
options.Prob.SOL.optPar(10) = 1e-5; % 1e-5; Major
optimality tolerance
options.Prob.SOL.optPar(41) = 3e-13; % Function precision,
default 3.0E-13

options.Prob.SOL.optPar(30) = 200000; % maximal sum of
minor iterations (max(10000,20*m))

```

```

options.Prob.SOL.optPar(36) = 5000; % maximal number of
minor iterations in the solution of the QP problem (500)
% options.scale = 'auto'; % seta auto scale para resolver
o problema.

options.PriLevOpt = 0; %3; %Screen output - o que vai ser
apresentado de dados do solver
options.feasibilitychecks = 1; % Teste de viabilidade do
Initial Guess

[solution,result] = ezsolve(objective, {cbox,cbnd,ceq},
x0,options);

%extraindo os dados
t_ctrl_c = subs(collocate(t), solution);
f_ctrl_c = subs(collocate(f), solution);
solutionS = solution;

end

```

Fim do arquivo <CO_Velo_Dist_10_init.m>

Script do PROPT do Controle Ótimo desenvolvido para simulação do MPC.

Início arquivo <CO_Velo_Dist_10.m>

```

%% FUNÇÃO DO M-FILE VELOCIDADE e DISTÂNCIA +++
%
% Função a ser chamada para gerar o controle "f" para ser
utilizado na
% ODE45 em cada loop do MPC

%Sistema:
% dot(x) = v;
% dot(v) = (f - Phi*c*v^2 -m*g*kf)/m

function [t_ctrl_c,f_ctrl_c,j_ctrl_c,solutionSout,result] =
CO_Velo_Dist_10( xi, vi, vref, xpi, vpi, fii, solutionS, L,
w,dmin)
    %% constantes

    th = 1;                %[s] tempo de impacto
    g = 9.8066;            % aceleração da gravidade m/s^2
    kf = 0.003;            % coef de resistencia ao rolamento

```

```

m = 40000;           %[kg] Massa total
A = 10;              %[m^2] Área frontal em m^2
rho = 1.2256;        %[kg/m^3] densidade do ar net-> 1.201
kg/m^3
Cd = 0.78;           % coef de arrasto aerodinâmico
[adimens]
c = 0.5*rho*A*Cd;    % cte de arrasto aero dinâmico

    %% iniciando as escritas do Propt
Timef =36;
toms t                % variável
independente TEMPO
p = tomPhase('p', t, 0, Timef, 60,[],'fem1s'); % cria
phase de estudo
setPhase(p);

tomStates v x          % estados X, V
tomControls f          % controle FORÇA
Tração é o "u"
toms accel jerk d
%ver a aceleração:
accel = dot(v);
jerk = dot(accel);

    %% initial guess - chute inicial - não precisa - usando
"solutionS"
%      x0 = { icollocate(x) ==
atPoints(icollocate(t)+delta_t,subs(x, solutionS)) %vi*t)
%guess com se Vi == cte
%      icollocate(v) ==
atPoints(icollocate(t)+delta_t,subs(v, solutionS)) %vi)
%guess com Vi=cte
%      collocate(f) ==
atPoints(collocate(t)+delta_t,subs(f, solutionS)) %fii
%guess com nop fii=c*vi^2+m*g*kf; (Phi=1)
%      };

    %% dados do Veículo Precedente, para ter a Distância
Interveicular
xp = xpi + vpi*t;    % [m] este dado virá do sistema, mas
tem que estimar com vpi=cte
                    %e caminhão precedente estando a xpi
(abs) e di metros a frente do seguidor
d = (xp - x);        % [m] distância interveicular (talvez
já entregue esse dado
                    %pronto e terá que estimar com
evolução cte no periodo da otimização

    %% box constraints - são restrições de desigualdade geral
(upper, Lower e demais)
cbox = { 0 <= collocate(x) %<= 15000 %
distancia absoluta (não precisa)

```

```

        10 <= collocate(v) <= (vref) %
Limites de velocidade
        -355000 <= collocate(f*v) <= 355000 % Limite
de potência do motor e freio
        -2 <= collocate(accel) <= 1 % Limite
de Aceleração
        -2 <= collocate(jerk) <= 2 % Limite
de Tranco (Jerk)
        % collocate(dmin <= d) % Limite da
Distância interveicular
        dmin <= collocate(d)
        %vpi*th <= collocate(d)
%        vpi*th <= collocate(d+(s1-s2)) %
distancia comO SOFT CONSTRAINT
%        collocate(s1)>=0 % soft
constraint 1
%        collocate(s2)>=0 % soft
constraint 2
    };

%% Boundary Constraints - condições de contorno
cbnd = {initial({x == xi;
                v == vi;
                f == fii;
                })
    };

%% Arrasto com veículo a frente
%(HUCHO; AHMED, 1987)
Cd1 = 14.0766; % coef ajuste da curva
Cd2 = 24.4626; % coef ajuste da curva

Phi = ifThenElse(d, 'lt', L, (1-(Cd1/(Cd2+d))), 1, 0.2);

%% ODEs and path constraints
ceq = collocate({
    dot(x) == v;
    dot(v) == (f - m*g*kf - Phi*c*v^2)/m;
});

%% CONSUMO:
Alfa0 = 2.16e-3; %s^-1 %Baeta
= 1.45e-3
%Alfa1 = 7.98e-5; %s^-1*kW^-1
%Batea = 8.48e-5
%Alfa2 = 1.00e-8; %s^-1*kW^-2
% Para valores negativos de potência:
Alfa1 = ifThenElse(f*v, 'lt', 0, 0, 7.98e-5, 0.1);
Alfa2 = ifThenElse(f*v, 'lt', 0, 0, 1e-8, 0.1);

```

```

ConsumoL_s = (Alfa0 + Alfa1*((f*v)/1000) +
Alfa2*((f*v)/1000)^2);

% FUNÇÃO OBJETIVO
% %minimiza o Jerk (tranco) no veículo - presentenas duas
OBJ
objectiveJ = sqrt(integrate(accel^2));
% %minimiza o consumo de combustível(Pot em kW) -
presentenas duas OBJ
objectiveC = integrate(Alfa0 + Alfa1*((f*v)/1000) +
Alfa2*((f*v)/1000)^2);
% %minimiza a distância do th com a distância que está do
Precedente
objectiveD = (d - vpi*th)^2;
% %minimiza o erro de velocidade em relação a referência
VREF
objectiveV = 10*(v-vref)^2;

%objective = integrate((v-vref)^2);
%Então temos duas funções objetivo
objective =
integrate(ifThenElse(d, 'gt', L, objectiveV, objectiveD, 0))+object
iveJ+objectiveC;

%% Solving the Problem
options = struct;
options.name = 'Dist_Velo_FW 10';

% ## New Options - testing ##
options.Prob.SOL.optPar = repmat(-999,72,1); % limpa a
"optPar" para valores default
options.Prob.SOL.optPar(10) = 1e-5; % 1e-5; Major
optimality tolerance
options.Prob.SOL.optPar(41) = 3e-13; % Function precision,
default 3.0E-13

options.Prob.SOL.optPar(30) = 200000; % maximal sum of
minor iterations (max(10000,20*m))
options.Prob.SOL.optPar(36) = 5000; % maximal number of
minor iterations in the solution of the QP problem (500)
% options.scale = 'auto'; % seta auto scale para resolver
o problema.

options.PriLevOpt = 0; %3; %Screen output - o que vai ser
apresentado de dados do solver
options.feasibilitychecks = 1; % Teste de viabilidade do
Initial Guess

```



```

[solution,result] = ezsolve(objective,
{cbox,cbnd,ceq}, solutionS,options);

%extraíndo os dados
t_ctrl_c = subs(collocate(t), solution);
f_ctrl_c = subs(collocate(f), solution);
solutionSout = solution;
j_ctrl_c = subs(collocate(jerk), solution);

end

```

Fim do arquivo <CO_Velo_Dist_10.m>

Script de EDO para cálculo do tranco (jerk).

Início arquivo <jerk_myode.m>

```

%% #EDO# Função p/ JERK, processa vetor finalizado, para obter
JERK (jerk_myode.m)
%% #####
% #####          EDO - CÁLCULO DO JERK          #####
% #####
function [dz,x,v,a,jerk,f,d,xp] =
jerk_myode(t,z,te,fe,vpi,xpi,L,Scene,TScene)
% Ajuste da base de tempo, te;fe base externa, t;f base
interna
    f = interp1(te,fe,t);
% Dados/constantes da dinâmica do veículo seguidor
    g = 9.8066;           % aceleração da gravidade m/s^2
    kf = 0.003;           % coef de resistencia ao rolamento
    m = 40000;            %[kg] Massa total
    A = 10;               %[m^2] Área frontal em m^2
    rho = 1.2256;         %[kg/m^3] densidade do ar net-> 1.201
kg/m^3
    Cd = 0.78;            % coef de arrasto aerodinâmico
[adimens]
    c = 0.5*rho*A*Cd;     % [kg/m] cte de arrasto aero dinâmico
    G = 5;                % ##Ganho da malha interna para o JERK

    Degrau = t>=TScene;   % função degrau em TScene segundos

%SaÃ-das e alias
    [Ll,Cc] = size(z);    % SE vetor coluna, transforma em vetor
linha
    if Cc ==1

```

```

        z = z';
    end

    % estados e dados a exportar (Partel), pois preciso de
    "x"
    x = z(:,1);                % [m] posição

    % Posição Veículo Precedente, para ter a Distância
    Interveicular
    % Escolha do Cenário = 0 | 1 | 2 | 3 | 4;
    switch Scene
        case 0
            xp(:,1) = xpi + vpi*t;                                %
S0 - Cenário 0
        case 1
            xp(:,1) = xpi + vpi*t + 3*Degrau.*(t-TScene);        %
S1 - Cenário 1
        case 2
            xp(:,1) = xpi + vpi*t - 2*Degrau.*(t-TScene);        %
S2 - Cenário 2
        case 3
            xp(:,1) = xpi + vpi*t + 10*Degrau;                    %
S3 - Cenário 3
        case 4
            xp(:,1) = xpi + vpi*t - 5*Degrau;                     %
S4 - Cenário 4
        case 5
            xp(:,1) = xpi + vpi*(t + 1*Degrau.*(t-TScene)); %
S5 - Cenário 5 ativado
        otherwise
            disp( ['BUG - Erro no Cenário'] );
            return;
    end

    d(:,1) = (xp(:,1) - x(:,1));                % [m] distância
    interveicular

    % Arrasto com veículo a frente
    %(HUCHO; AHMED, 1987)
    Cd1 = 14.0766;                % coef ajuste da curva
    Cd2 = 24.4626;                % coef ajuste da curva
    %d = ((di + vpi.*t) - x)        ;% [m] distância
    interveicular
    % coeficiente de redução de arrasto
    if d <= L
        Phi = (1-(Cd1./(Cd2+d)));        %Phi = (1-
(Cd1/(Cd2+d)));
    else
        Phi = 1;                        %Phi = 1;
    end

```

```

% estados e dados a exportar (Parte2)
v = z(:,2);           %velocidade
a = z(:,3);           % ## aceleração

w = (f -c*Phi.*(v.^2) -m*g*kf)/m;    % ## aceleração criada
jerk = G*(w-a);                % ## jerk

% EDO
dotx = v;
dotv = a;
dota = jerk;

dz = [ dotx
       dotv
       dota ];

end

```

Fim do arquivo <jerk_myode.m>