

**FERNANDO ZOLUBAS PRETO
HIGOR SOUZA CUNHA**

**Aplicação do estado da arte de controladores em
ACC (Adaptive Cruise Control) no contexto
automotivo**

São Paulo
2022

**FERNANDO ZOLUBAS PRETO
HIGOR SOUZA CUNHA**

**Aplicação do estado da arte de controladores em
ACC (Adaptive Cruise Control) no contexto
automotivo**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para ob-
tenção do Título de Engenheiro Eletricista
com ênfase em Automação e Controle.

São Paulo
2022

**FERNANDO ZOLUBAS PRETO
HIGOR SOUZA CUNHA**

**Aplicação do estado da arte de controladores em
ACC (Adaptive Cruise Control) no contexto
automotivo**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para ob-
tenção do Título de Engenheiro Eletricista
com ênfase em Automação e Controle.

Orientador(a):

Prof. Dr. Bruno Augusto Angélico

São Paulo
2022

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

Catálogo na Publicação

Preto, Fernando; Cunha, Higor

Aplicação do estado da arte de controladores em ACC (Adaptive Cruise Control) no contexto automotivo / F. Preto, H. Cunha -- São Paulo, 2022.
148 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1.Função de Lyapunov de Controle 2.Função de Barreira de Controle
3.Controle sem Modelo 4.Programação Quadrática 5.Sistema Avançado de Assistência ao Motorista I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos primeiramente de agradecer ao nosso professor orientador Bruno Augusto Angélico por nos proporcionar a oportunidade de desenvolver esse projeto e pela disponibilidade em nos ajudar no nosso desenvolvimento dentro da Engenharia de Controle e Automação. Uma vez que esse trabalho representa nosso primeiro passo na carreira de Engenharia, é seguro dizer que começamos com o pé direito sob sua orientação. Muito obrigado professor.

Gostaríamos também de agradecer aos colegas do Laboratório de Controle Aplicado da Escola Politécnica da USP (LCA), Gabriel Pereira das Neves, Jorge Augusto Vasconcelos Alves, Mateus Mussi Brugnolli, Luis Henrique Inagaki da Silva e Caio Igor Gonçalves Chinelato, pela disponibilidade irrestrita de nos ajudar tanto academicamente no projeto quanto sobre reflexões acerca da carreira. E ainda gostaríamos de agradecer ao colega Henrique Caballeria Mesquita e ao professor Armando Antonio Maria Lagana pelos mesmos motivos supracitados. Fiquem com o nosso mais sincero obrigado.

Gostaríamos de agradecer também nossas famílias por estarem conosco todos os dias acreditando em nós, nas nossas escolhas e no nosso potencial. Não há palavras para agradecer a altura do que merecem, mas desejamos que fiquem com o nosso mais sincero obrigado.

E por fim, gostaríamos de agradecer também, por nos proporcionar os meios necessários para a execução do projeto, à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa - Fundep Rota 2030 - Linha V, Projeto SecurAuto - Projeto e Desenvolvimento Integrado de Funções de Segurança Assistida ao Condutor e Ambiente para Veículos Autônomos. Muito obrigado!

“A persistência é o caminho do êxito.”

-Charles Chaplin

RESUMO

O ACC (Controle de Cruzeiro Adaptativo) é uma tecnologia da família ADAS (Sistema Avançado de Assistência ao Motorista) que se destina ao controle de velocidade longitudinal de veículos automotivos no contexto de altas velocidades como estradas e rodovias. A literatura sobre o ACC já apresenta trabalhos relevantes para a modernização da tecnologia ADAS que vêm revolucionando a maneira como se conduz veículos na atualidade. Porém, quase a totalidade dessa literatura carece de uma validação em simulador *benchmark* do setor automotivo e/ou em veículos reais. Sendo assim, o presente trabalho visa suprir essa necessidade ao realizar simulações realistas no software CarSim de uma Lei de Controle em Cascata baseada em Funções de Lyapunov de Controle para requisitos de desempenho, em Funções de Barreira de Controle para requisitos de conforto e segurança, em Programação Quadrática para a solução dos métodos supracitados, bem como em Controle Sem Modelo para que o controle possa depender de poucos parâmetros e, simultaneamente, controlar um veículo real que apresenta não linearidades e até mesmo características estocásticas. A lei de controle é adotada dessa maneira em razão dos indicativos teóricos de que esse controle endereça bem o problema do ACC. O controle é validado segundo o protocolo *benchmark* de validação de sistemas ADAS, o *Euro NCAP Test* em que o sistema proposto passa no teste com excelência.

Palavras-Chave – Função de Lyapunov de Controle, Função de Barreira de Controle, Controle sem Modelo, Programação Quadrática, Sistema Avançado de Assistência ao Motorista, CarSim.

ABSTRACT

The ACC (Adaptive Cruise Control) is a technology from the ADAS (Advanced Driver Assistance System) family that is designed for longitudinal speed control of automotive vehicles in the context of high speeds such as roads and highways. The literature on the ACC already presents relevant works for the modernization of the ADAS technology that has been revolutionizing the way vehicles are driven today. However, almost all of this literature lacks validation in a benchmark automotive simulator and/or in real vehicles. Therefore, the present work aims to meet this gap by performing realistic simulations in the CarSim software of a Cascade Control Law based on Lyapunov Control Functions for performance requirements, on Barrier Control Functions for comfort and safety requirements, on Quadratic Programming for the solution of the aforementioned methods, as well as Model-Free Control so that the control can depend on few parameters and, at the same time, control a real vehicle that presents non-linearities and even stochastic characteristics. The control law is adopted in this way due to theoretical indications that this control addresses the ACC problem well. The control is validated according to the ADAS systems validation benchmark protocol, the Euro NCAP Test in which the proposed system passes the test with excellence.

Keywords – Control Lyapunov Function, Control Barrier Function, Model-Free Control, Quadratic Programming, Advanced Driver Assistance System, CarSim.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Contexto do princípio do ACC. Extraído de [1] | 19 |
| Figura 2 | Arquitetura de controle proposta ao ACC. Extraído de [1] | 21 |
| Figura 3 | Diagrama de Forças de um Veículo. Extraído de [2] | 25 |
| Figura 4 | Figura didática para explicação da teoria de Lyapunov e CLF. Fonte: autores | 32 |
| Figura 5 | Gráfico de $V(x) := (v_h - v_d)^2$ gerado no software Geogebra Online com linha amarela inserida manualmente. Fonte: autores | 35 |
| Figura 6 | Simulação com $c_V = 5$ e demais parâmetros fixados | 36 |
| Figura 7 | Simulação com $c_V = 0.5$ e demais parâmetros fixados | 36 |
| Figura 8 | Simulação com $c_V = 0.05$ e demais parâmetros fixados | 37 |
| Figura 9 | Figura didática para explicação do princípio de Nagumo e CBF. Fonte: autores | 38 |
| Figura 10 | Figura didática para explicação da relaxação do princípio de Na- gumo. Fonte: autores | 40 |
| Figura 11 | Gráfico da barreira $h(x) = D - \tau_d \cdot v_h$ gerado no software Geogebra Online com sombreado em preto pintado manualmente. Fonte: autores | 44 |
| Figura 12 | Efeito da escolha de γ : γ_b (grande) e γ_s (pequeno). Fonte: autores | 45 |
| Figura 13 | Simulação com $\gamma = 10$ e demais parâmetros fixados | 45 |
| Figura 14 | Simulação com $\gamma = 1$ e demais parâmetros fixados | 46 |
| Figura 15 | Simulação com $\gamma = 0.1$ e demais parâmetros fixados | 46 |
| Figura 16 | Simulação do laço ULC - Velocidades | 50 |
| Figura 17 | Simulação do laço ULC - CBF | 51 |
| Figura 18 | Simulação do laço ULC - Esforço de Controle | 51 |
| Figura 19 | Diagrama de Simulação - modelo mais realista para o veículo. Fonte: LCA. | 52 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 20 | Diagrama de Simulação - motor de combustão. Fonte: LCA | 53 |
| Figura 21 | Diagrama de Simulação - sistema de transmissão. Fonte: LCA . . . | 53 |
| Figura 22 | Diagrama de Simulação - modelo das rodas e freios. Fonte: LCA . . | 53 |
| Figura 23 | Diagrama de Simulação - modelo da dinâmica externa do veículo. Fonte: LCA | 54 |
| Figura 24 | Simulink do controle iP (<i>Model-Free</i>) Proporcional. Fonte: LCA . . | 60 |
| Figura 25 | Implementação dos controles ULC e LLC no MATLAB®/Simulink considerando modelo mais complexo do veículo. Fonte: LCA | 62 |
| Figura 26 | Simulação dos controles ULC e LLC considerando controle iP . . . | 63 |
| Figura 27 | Controle iP - gráfico de estimação do Φ | 64 |
| Figura 28 | Cálculo de Φ através de janela fixa. Fonte: autores | 64 |
| Figura 29 | Cálculo de Φ através de janela móvel. Fonte: autores | 65 |
| Figura 30 | Simulação dos controles ULC e LLC considerando controle iP mo- dificado | 66 |
| Figura 31 | Simulink do controle PI. Fonte: autores | 67 |
| Figura 32 | Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - Velocidade | 70 |
| Figura 33 | Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - CBF | 71 |
| Figura 34 | Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - Aceleração . | 72 |
| Figura 35 | Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - Pedais . . . | 72 |
| Figura 36 | Comparação entre os controles iP e iP Modificado - Marcha e Motor | 73 |
| Figura 37 | Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - Phi | 73 |
| Figura 38 | CarSim Interface | 81 |
| Figura 39 | CarSim - Euro NCAP ACC | 82 |
| Figura 40 | CarSim - Veículo <i>host</i> (<i>Pick Up</i> azul) e faixa vermelho (mostrando área considerada para o RADAR). | 82 |
| Figura 41 | Cenário de teste: Estrada Curvínea | 86 |
| Figura 42 | Resultados de simulação de ACC em Estrada Curvilínea com <i>Model- Free</i> (iP) | 88 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 43 | Cenário de teste: Estrada Curvilínea. Distância entre veículo Líder e veículo <i>host</i> com ACC utilizando <i>Model-Free</i> (iP) | 88 |
| Figura 44 | Resultados de simulação de ACC em Estrada Curvilínea com <i>Model-Free</i> Modificado (iP modificado) | 89 |
| Figura 45 | Cenário de teste: Estrada Curvilínea. Distância entre veículo <i>target</i> e veículo <i>host</i> com ACC utilizando <i>Model-Free</i> Modificado (iP modificado) | 89 |
| Figura 46 | Resultados de simulação de ACC em Estrada Curvilínea com PI clássico | 90 |
| Figura 47 | Cenário de teste: Estrada Curvilínea. Distância entre veículo <i>target</i> e veículo <i>host</i> com ACC utilizando PI clássico | 90 |
| Figura 48 | Limite de Velocidade ao redor do mundo: Extraído de [3] | 94 |
| Figura 49 | Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Representação gráfica do teste no CarSim | 95 |
| Figura 50 | Modelagem do mínimo fov para condições de factibilidade. Adaptado de [4]. | 98 |
| Figura 51 | Detalhes da pista curvilínea do Euro NCAP Test no simulador realista CarSim | 98 |
| Figura 52 | Teste CCRs - Estrada Reta: Distância e Barreira | 101 |
| Figura 53 | Teste CCRs - Estrada Reta: Velocidades | 102 |
| Figura 54 | Teste CCRs - Estrada Reta: Acelerações VUT | 102 |
| Figura 55 | Teste CCRs - Estrada Reta: Pedais VUT | 103 |
| Figura 56 | Teste CCRs - Estrada Reta: Marcha e Motor VUT | 104 |
| Figura 57 | Teste CCRS - Estrada Curva: Protocolo Euro NCAP. Extraído de [4]. | 105 |
| Figura 58 | Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Distância e Barreira | 107 |
| Figura 59 | Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Velocidades | 108 |
| Figura 60 | Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Acelerações VUT | 109 |
| Figura 61 | Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Pedais VUT | 109 |
| Figura 62 | Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Marcha e Motor VUT | 110 |
| Figura 63 | Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Distância e Barreira | 111 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 64 | Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Velocidades | 111 |
| Figura 65 | Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Acelerações VUT | 112 |
| Figura 66 | Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Pedais VUT | 112 |
| Figura 67 | Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Marcha e Motor VUT | 113 |
| Figura 68 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 40$ m: Distância e Barreira | 114 |
| Figura 69 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 40$ m: Velocidades . . . | 114 |
| Figura 70 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 40$ m: Acelerações VUT | 115 |
| Figura 71 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 40$ m: Pedais VUT . . . | 116 |
| Figura 72 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 40$ m: Marcha e Motor VUT | 117 |
| Figura 73 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 12$ m: Distância e Barreira | 117 |
| Figura 74 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 12$ m: Velocidades . . . | 118 |
| Figura 75 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 12$ m: Acelerações VUT | 118 |
| Figura 76 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 12$ m: Pedais VUT . . . | 119 |
| Figura 77 | Teste CCRb - Frenagem $-2 m/s^2$ para $D = 12$ m: Marcha e Motor VUT | 120 |
| Figura 78 | Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 40$ m: Distância e Barreira | 121 |
| Figura 79 | Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 40$ m: Velocidades . . . | 121 |
| Figura 80 | Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 40$ m: Acelerações VUT | 122 |
| Figura 81 | Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 40$ m: Pedais VUT . . . | 122 |
| Figura 82 | Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 40$ m: Marcha e Motor VUT | 123 |
| Figura 83 | Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 12$ m: Distância e Barreira | 124 |
| Figura 84 | Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 12$ m: Velocidades . . . | 124 |
| Figura 85 | Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 12$ m: Acelerações VUT | 125 |
| Figura 86 | Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 12$ m: Pedais VUT . . . | 125 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Figura 87 | Teste CCRb - Frenagem -6 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$: Marcha e Motor VUT | 126 |
| Figura 88 | Cenário testado no CUT-IN. Extraído de [4] | 126 |
| Figura 89 | Visualização do resultado da simulação CUT-IN @ 50km/h | 127 |
| Figura 90 | Teste CUT-IN @ 50 km/h: Distância e Barreira | 128 |
| Figura 91 | Teste CUT-IN @ 50 km/h: Velocidades | 128 |
| Figura 92 | Teste CUT-IN @ 50 km/h: Acelerações VUT | 129 |
| Figura 93 | Teste CUT-IN @ 50 km/h: Pedais VUT | 129 |
| Figura 94 | Teste CUT-IN @ 50 km/h: Marcha e Motor VUT | 130 |
| Figura 95 | Visualização do resultado da simulação CUT-IN @ 120km/h | 131 |
| Figura 96 | Teste CUT-IN @ 120 km/h: Distância e Barreira | 131 |
| Figura 97 | Teste CUT-IN @ 120 km/h: Velocidades | 132 |
| Figura 98 | Teste CUT-IN @ 120 km/h: Acelerações VUT | 133 |
| Figura 99 | Teste CUT-IN @ 120 km/h: Pedais VUT | 133 |
| Figura 100 | Teste CUT - IN @ 120 km/h: Marcha e Motor VUT | 134 |
| Figura 101 | Cenário testado no CUT-OUT. Adaptado de [4] | 134 |
| Figura 102 | Resultado do CUT-OUT com $v_c = 70\text{km/h}$. Da esquerda para direita e de cima para baixo apresentam-se os quadros: a), b), c) e d). | 135 |
| Figura 103 | Teste CUT-OUT @ 70km/h: Distância e Barreira | 136 |
| Figura 104 | Teste CUT-OUT @ 70km/h: Velocidades | 136 |
| Figura 105 | Teste CUT-OUT @ 70km/h: Acelerações VUT | 137 |
| Figura 106 | Teste CUT-OUT @ 70km/h: Pedais VUT | 138 |
| Figura 107 | Teste CUT-OUT @ 70km/h: Marcha e Motor VUT | 138 |
| Figura 108 | Teste CUT-OUT @ 90km/h: Distância e Barreira | 139 |
| Figura 109 | Teste CUT-OUT @ 90km/h: Velocidades | 140 |
| Figura 110 | Teste CUT-OUT @ 90km/h: Acelerações VUT | 140 |
| Figura 111 | Teste CUT-OUT @ 90km/h: Pedais VUT | 141 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Figura 112 | Teste CUT-OUT @ 90km/h: Marcha e Motor VUT | 141 |
| Figura 113 | Estratégias de Desenvolvimento | 144 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tabela 1 | Cronograma de Atividades para o 1º Semestre de 2022 | 28 |
| Tabela 2 | Cronograma de Atividades para o 2º Semestre de 2022 | 29 |
| Tabela 3 | Parâmetros Iniciais do Problema e do Projeto | 49 |
| Tabela 4 | Parâmetros Iniciais do Problema e do Projeto | 61 |
| Tabela 5 | Parâmetros do laço ULC | 62 |
| Tabela 6 | Parâmetros para simulação dos controladores | 70 |
| Tabela 7 | Parâmetros dos controles ULC e LLC | 84 |
| Tabela 8 | <i>Setpoint</i> do ACC e velocidades médias para cada controle proposto | 91 |
| Tabela 9 | Classificações do Euro NCAP | 93 |
| Tabela 10 | Testes de ACC do Euro NCAP no CarSim | 95 |
| Tabela 11 | Especificações mínimas do RADAR automotivo | 99 |
| Tabela 12 | Parâmetros dos controles ULC e LLC | 100 |
| Tabela 13 | Conclusão do Teste Euro NCAP | 142 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 19 |
| 1.1 | Contextualização | 19 |
| 1.2 | Objetivos do Projeto | 22 |
| 1.3 | Requisitos do Sistema | 22 |
| 1.3.1 | Estabilidade e Desempenho | 22 |
| 1.3.2 | Segurança | 22 |
| 1.3.3 | Conforto | 23 |
| 1.4 | Revisão Bibliográfica | 23 |
| 1.5 | Modelo Matemático | 24 |
| 1.6 | Cronograma Geral | 26 |
| 1.6.1 | Cronograma 1º Semestre | 26 |
| 1.6.2 | Cronograma 2º Semestre | 28 |
| 2 | Laço ULC - Malha Externa | 30 |
| 2.1 | Ponto de vista de projeto | 30 |
| 2.2 | Função de Lyapunov de Controle | 31 |
| 2.2.1 | Introdução | 31 |
| 2.2.2 | Detalhamento Teórico | 32 |
| 2.2.2.1 | Teoria de Lyapunov | 32 |
| 2.2.2.2 | Função de Lyapunov de Controle | 34 |
| 2.2.3 | Projeto | 34 |
| 2.2.4 | Ajuste do parâmetro c_V | 36 |
| 2.3 | Função de Barreira de Controle | 37 |
| 2.3.1 | Conceito | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3.2 | Detalhamento Teórico | 38 |
| 2.3.2.1 | Princípio de invariância de Nagumo | 38 |
| 2.3.2.2 | Função de Barreira de Controle | 40 |
| 2.3.3 | Subespaço Seguro | 41 |
| 2.3.4 | Zeroing Barrier Function (ZBF) | 41 |
| 2.3.5 | A lei de controle | 42 |
| 2.3.6 | Projeto | 42 |
| 2.3.7 | Ajuste do parâmetro γ | 43 |
| 2.4 | Controlador CLF-CBF | 47 |
| 2.4.1 | Equacionamento | 47 |
| 2.4.2 | Projeto | 49 |
| 2.4.3 | Simulações | 49 |
| 3 | Lço LLC - Malha Interna | 52 |
| 3.1 | Ponto de vista de projeto | 52 |
| 3.2 | <i>Model-Free Control</i> | 54 |
| 3.2.1 | Formulação | 55 |
| 3.2.2 | Dedução do estimador da função Φ | 56 |
| 3.2.3 | Parâmetros do Projeto de Controle | 58 |
| 3.2.3.1 | Parâmetro ν | 58 |
| 3.2.3.2 | Parâmetro α | 58 |
| 3.2.4 | Parâmetro N | 58 |
| 3.2.4.1 | Lei de controle $\mathfrak{C}(e)$ | 59 |
| 3.2.5 | Vantagens do controle <i>Model-Free</i> segundo a literatura | 59 |
| 3.2.6 | Implementação do controle <i>Model-Free</i> no lço LLC | 60 |
| 3.2.7 | Projeto | 60 |
| 3.2.8 | Ajuste do parâmetro α | 60 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2.9 | Simulação | 62 |
| 3.3 | <i>Model-Free</i> Modificado (iP modificado) | 64 |
| 3.4 | Controle PI | 66 |
| 3.5 | Comparação dos Controles | 67 |
| 3.5.1 | Equivalência entre controladores iP e PI Clássico | 67 |
| 3.5.1.1 | Controle PI | 67 |
| 3.5.1.2 | Controle iP | 68 |
| 3.5.1.3 | Equivalência | 69 |
| 3.5.2 | PI, iP, iP Modificado | 69 |
| 4 | Questões a se considerar para simulações realistas | 74 |
| 4.1 | Condições de ACC | 74 |
| 4.2 | Descrição da tarefa de dirigir | 74 |
| 4.2.0.1 | Percepção do ambiente | 74 |
| 4.2.0.2 | Planejamento do movimento | 75 |
| 4.2.0.3 | Controle do veículo | 75 |
| 4.3 | Classes de autonomia automotiva (de 1 a 5) | 76 |
| 4.3.1 | Nível 0: Sistemas manuais e/ou de alerta | 76 |
| 4.3.2 | Nível 1: ADAS | 76 |
| 4.3.3 | Nível 2: Automação Parcial | 77 |
| 4.3.4 | Nível 3: Automação Condicional | 77 |
| 4.3.5 | Nível 4: Alta Automação | 77 |
| 4.3.6 | Nível 5: Automação Completa | 77 |
| 4.3.7 | Entraves da Automação Plena | 77 |
| 4.3.8 | Limitações desse sistema de classificação | 78 |
| 4.4 | ACC e a integração com outras tarefas relacionadas a condução veicular . . | 78 |
| 4.5 | Acelerações comuns | 79 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Simulação Realista | 80 |
| 5.1 | Sinais necessários para controle | 80 |
| 5.2 | CarSim | 80 |
| 5.3 | ConFigurações do veículo <i>host</i> com ACC | 82 |
| 5.4 | Freio de Emergência e limitações do controle de Barreira | 83 |
| 5.5 | Ajuste proposto dos controladores | 84 |
| 5.5.1 | Ajuste ULC - Upper Level Control | 84 |
| 5.5.2 | Ajuste LLC - Lower Level Control | 85 |
| 5.5.3 | Testes empíricos de sintonização | 85 |
| 5.5.4 | Conclusão do ajuste dos parâmetros | 86 |
| 5.6 | Cenário de Teste - Pista Curvilínea | 86 |
| 5.7 | Resultados do teste em estrada curvilínea | 87 |
| 5.8 | Comparação entre controladores iP, iP modificado e PI clássico | 91 |
| 5.8.1 | Velocidades | 91 |
| 5.8.2 | Distancia entre veículos | 91 |
| 5.8.3 | Barreira | 91 |
| 5.8.4 | Acelerações | 91 |
| 5.8.5 | Marcha e Velocidade do Motor | 92 |
| 5.8.6 | Acionamento dos pedais | 92 |
| 6 | Euro NCAP | 93 |
| 6.1 | Introdução | 93 |
| 6.2 | Factibilidade dos testes Euro NCAP | 96 |
| 6.3 | Especificação do RADAR | 97 |
| 6.4 | Ajuste proposto dos controladores | 99 |
| 6.5 | CCRs - Alvo Estacionário | 100 |
| 6.5.1 | Estrada Reta | 100 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.5.2 | Estrada Curva | 103 |
| 6.5.2.1 | Discussão do problema do RADAR e possíveis soluções . . | 104 |
| 6.5.2.2 | Demonstração teórica de que o sistema de ACC apresen- tado deve funcionar para o teste CCRS - Estrada Curva . | 106 |
| 6.6 | CCRm - Alvo em Movimento | 106 |
| 6.6.1 | GVT 20 km/h | 107 |
| 6.6.2 | GVT 60 km/h | 109 |
| 6.7 | CCRb - Alvo Freando | 113 |
| 6.7.1 | Frenagem de -2 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$ | 113 |
| 6.7.2 | Frenagem de -2 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$ | 116 |
| 6.7.3 | Frenagem de -6 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$ | 119 |
| 6.7.4 | Frenagem de -6 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$ | 123 |
| 6.8 | CUT-IN | 126 |
| 6.8.1 | Referência 50 km/h | 127 |
| 6.8.2 | Referência 120 km/h | 130 |
| 6.9 | CUT-OUT | 133 |
| 6.9.1 | Referência 70 km/h | 134 |
| 6.9.2 | Referência 90 km/h | 138 |
| 6.10 | Conclusão do Euro NCAP | 142 |
| 7 | Trabalhos Futuros | 144 |
| 8 | Conclusão | 145 |
| | Referências | 147 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O setor automotivo está em constante mudança e o carro predominantemente mecânico está ficando ultrapassado. A falta de componentes eletrônicos devido à pandemia de COVID-19 e as condições ambientais desfavoráveis em Taiwan em 2021 deixaram isso claro com a escassez de automóveis 0 km nas fábricas ao redor do globo. E essa mudança já chegou ao Brasil, notadamente através do projeto Rota 2030, uma iniciativa do Governo Federal, universidades estaduais e federais, institutos de pesquisa, e em parceria com o setor privado.

Com essa mudança, novas tecnologias automotivas vêm surgindo, os chamados ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*). Os sensores de ré já são bem populares e alguns veículos novos já vêm com o ACC (*Adaptive Cruise Control*) de fábrica, popularmente conhecido como “piloto automático”. Na Figura 1, ilustra-se a estrutura do ACC onde um veículo *host* com esse sistema tenta permanecer na estrada com velocidade v_c , mantendo uma distância segura do veículo *target/leader* à sua frente. A distância é medida através de um radar automotivo.

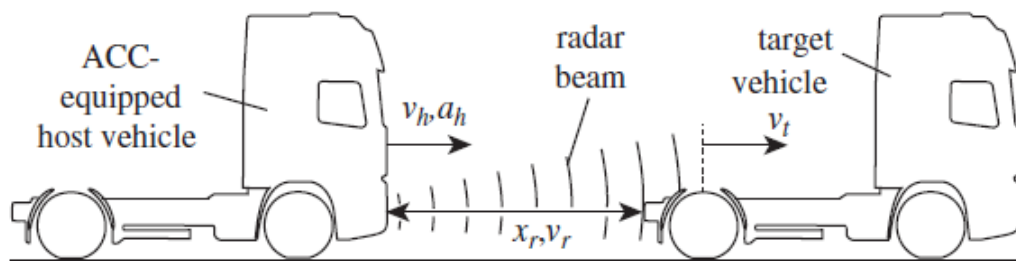


Figura 1: Contexto do princípio do ACC. Extraído de [1]

O ACC não é novo, vem sendo pesquisado e desenvolvido há muito tempo. Já foi chamado de CC (*Cruise Control*), ICC (*Intelligent Cruise Control*), de ACC e a versão mais moderna, o ACC-S&G (*ACC Stop & Go*) que inclui a funcionalidade *Stop & Go*,

isto é, permite que o sistema seja reacionado automaticamente após a parada do veículo. Atualmente já se fala inclusive de uma versão de ACC com ultrapassagem automática como considerado no manual do Euro NCAP [4].

Fica claro, então, que o ACC é uma tecnologia importante e em constante evolução como mostrado. E nesse sentido, através de uma revisão bibliográfica sobre o assunto, percebeu-se que existe uma proposta interessante de um controlador no estado da arte da área de controle e automação proposto por Ames et al. (2017) [5] que ainda carece de validação prática. A técnica chama-se *CLF-CBF by QP (Control Lyapunov Function - Control Barrier Function powered by Quadratic Programming)* e possui vasta validação teórica, mas poucos exemplos de aplicações em simuladores *benchmark* do setor automotivo e veículos reais. Por simplicidade de notação escreve-se apenas CLF-CBF em lugar de *CLF-CBF by QP*.

O grande diferencial dessa técnica é que ela introduz um controlador que atende especificações mais complexas do que aquelas atendidas por técnicas de Controle Clássico. Além de estabilidade e desempenho, são atendidos via CLF-CBF requisitos de segurança e conforto, totalizando quatro categorias de requisitos. As duas primeiras categorias, Estabilidade e Desempenho, são satisfeitas através de uma Função de Lyapunov de Controle (CLF, do inglês *Control Lyapunov Function*). Já as categorias Conforto e Segurança são atendidas através das Funções de Barreira de Controle (CBFs, ou *Control Barrier Functions*), as que fazem com que os estados do sistema sejam invariantes a um conjunto de estados seguros \mathcal{C} . Para resolver os conflitos que possam existir entre essas duas categorias, um *framework* baseado em QP (*Quadratic Programming*) é utilizado priorizando-se os requisitos de segurança face aos demais.

Entendido isso, é preciso ainda se aprofundar no modelo controlado pelo CLF-CBF, pois esse controlador refere-se à malha externa de um sistema com malhas em cascata. A razão da divisão em múltiplas malhas de controle é que um veículo automotivo é um sistema extremamente complexo, com muitas variáveis e as relações entre elas que podem ser não lineares, sendo até mesmo estocásticas em alguns casos.

Uma estratégia interessante é separar o problema em duas malhas de controle, o ULC (*Upper Level Controller*) e o LLC (*Lower Level Controller*). O ULC é o controlador de alto nível projetado para resolver o problema em si, isto é, atender os requisitos do ACC e por isso é interessante utilizar o CLF-CBF como o ULC do sistema. Já o LLC é um controlador que lidará com a dinâmica complexa do veículo de tal modo que o ULC “enxergue” um sistema simples.

Em Naus et al. (2010) [1], o ULC é chamado de *vehicle independent* e o LLC é chamado de *vehicle dependent*, e essa é a nomenclatura que aparece na Figura 2. No entanto, como essa nomenclatura induz a um erro de interpretação da arquitetura de controle, adota-se então a nomenclatura ULC/LLC como o padrão nesse trabalho.

Na arquitetura trabalhada no LCA-USP (Laboratório de Controle Aplicado da Escola Politécnica da USP), o ULC enxerga o veículo como um corpo com massa e que, portanto, apresenta uma inércia face aos comandos de aceleração/desaceleração do carro. O LLC é um *Model-Free*, uma técnica de controle que se baseia no princípio de linearização ultra-local e instantânea da planta, o que permite que o ULC “enxergue” o veículo de forma simples. A lei de controle que utiliza essa combinação de técnicas será referenciada como “*CLF-CBF powered by QP with Model-Free*”. A referida arquitetura é ilustrada na figura 2.

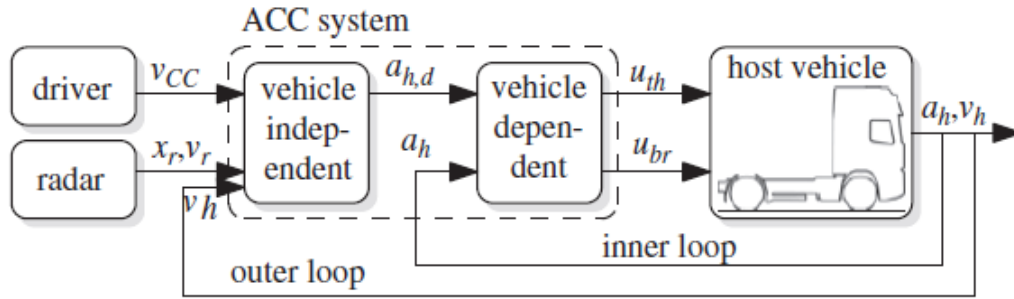


Figura 2: Arquitetura de controle proposta ao ACC. Extraído de [1]

Na figura 2, é mostrado um diagrama esquemático das malhas de controle do ACC. O controle de alto nível determina a aceleração/desaceleração $a_{h,d}$ necessária para o veículo *host* manter uma distância segura do veículo *target*. O controle de baixo nível faz o rastreamento da aceleração desejada determinada no controle de alto nível. Ele recebe como entradas a aceleração atual a_h e a aceleração desejada $a_{h,d}$ do veículo, compara estas duas acelerações e gera os sinais de controle do pedal do acelerador u_{th} e do pedal do freio u_{br} para que a_h rastreie $a_{h,d}$. O motorista pode ativar ou desativar o ACC. Quando o ACC está desativado, o sistema atua no modo CC, ou seja, rastreia a velocidade de cruzeiro v_{CC} determinada pelo motorista.

Sistemas ADAS como o ACC têm sido validados ao redor do mundo por meio dos protocolos de teste Euro NCAP na Europa e o Latin NCAP na América Latina. Sendo assim, se o ACC a ser desenvolvido nesse trabalho desempenhar bem no teste, então será possível atestar com base em fatos concretos a qualidade da lei de controle proposta face aos métodos que vem sendo utilizados na indústria.

1.2 Objetivos do Projeto

A partir das vantagens da técnica de controle “*CLF-CBF powered by QP with Model-Free*”, notadamente no quesito segurança, o presente trabalho tem por objetivo explorar a implementação dessa técnica de controle no contexto do ACC em simuladores *benchmark* do setor automotivo. Isso será feito visando validar os resultados teóricos e simulados obtidos através dos meios propostos na literatura.

Para uma simulação mais realista, será adotada a arquitetura de controle que vem sendo desenvolvida no LCA, isto é, CLF-CBF com *Model-Free*, de tal modo a controlar um veículo simulado em SIL (*Software-In-the-Loop*).

1.3 Requisitos do Sistema

1.3.1 Estabilidade e Desempenho

Rastrear velocidade de referência: o motorista seleciona uma velocidade de cruzeiro desejada, normalmente a velocidade máxima permitida na estrada em que ele se encontra. O ACC deve fazer com que o veículo transacione de sua velocidade atual para a velocidade de referência, garantindo estabilidade assintótica e em um tempo de transição finito, sendo essa última condição referente ao desempenho do sistema.

O referido tempo finito é alcançado quando o controlador CLF-CBF é utilizado e definido através de um dos parâmetros desse controlador que impõe uma convergência aproximadamente exponencial da velocidade atual do veículo para o valor referência. A convergência é aproximada, pois sobre essa condição aplica-se uma condição de relaxação do requisito de estabilidade/desempenho para que seja possível priorizar os requisitos de segurança.

1.3.2 Segurança

Mínima distância segura: uma regra geral definida em K. Vogel (2003) [6] é que a mínima distância D entre dois carros é a “metade do velocímetro”. Isso se traduz na restrição $D \geq 1.8 \cdot v_h$, que implica no atraso da resposta humana $\tau_d = 1.8$ [5]. O tempo τ_d é frequentemente referenciado como *time-to-collision*.

1.3.3 Conforto

Restrição de Aceleração/Desaceleração: as rodas do sistema não podem exercer força ilimitada, logo, para fins de conforto, limita-se o esforço de controle do bloco de alto nível para ficar em uma região $U_{acc} := [-a_f \times g, a'_f \times g]$. Numericamente o valor de referência é $|a_f| = |a'_f| = 0.25$ [5].

1.4 Revisão Bibliográfica

Como explicitado na seção 1.2, o presente trabalho se propõe a implementar a arquitetura de controle trabalhada no LCA, que se baseia em CLF-CBF e *Model-Free*, e há três artigos/referências que fundamentam esse trabalho. O primeiro deles é o de Ames et al. (2017) [5], cujo *framework* baseado em programação quadrática é definido para arbitrar conflitos de requisitos de segurança perante a estabilidade/desempenho e conforto. O segundo é o de Polack et al. (2019) [7], em que o controlador *Model-Free* é utilizado no contexto automotivo voltado para aceleração/frenagem. O terceiro é o de Naus et al. (2010) [1], no qual é baseada a arquitetura de controle trabalhada no LCA e escolhida para o presente trabalho. O desenvolvimento da teoria de CBF e da BF (*Barrier Function*) é apresentado em Ames et al. (2019) [8].

Já um compêndio simplificado sobre ACC é explorado em [9], onde se explica o ACC, os subsistemas automotivos envolvidos, uma lista de nomenclatura usual da área de ADAS e um mapeamento dos diferentes sinais de informação entre componentes físicos do automóvel que viabilizam o ACC.

Atualmente algumas montadoras vêm oferecendo uma variação do ACC chamada ACC “*Stop & Go*”, em que o termo adicional no nome significa que o sistema é projetado para reiniciar automaticamente limitado ao tempo máximo de até 3s parado em um congestionamento, a depender da montadora [10]. Além disso, alguns sistemas de ACC utilizam câmeras em conjunto com o radar para aumentar a segurança do sistema, como nos caminhões da marca MAN [10].

O ACC, embora venha sendo empregado nos veículos comerciais modernos, ainda não é preponderante em virtude dos desafios da sua implementação. O problema em si tem caráter interdisciplinar, pois envolve áreas como Eletrônica Automotiva, Instrumentação e Técnicas de Controle, logo, a integração das áreas é um dos principais pontos de atenção, uma vez que há arquiteturas de hardware e software sofisticadas [2].

Para implementar a estratégia CLF-CBF em um sistema embarcado como um carro, onde o hardware costuma ser limitado, pode-se utilizar o algoritmo de Hildreth que apresenta bom desempenho [11]. Esse algoritmo é destinado a resolver a programação quadrática e os resultados obtidos são equivalentes aos obtidos com algoritmos menos computacionalmente eficientes, como o **quadprog** do MATLAB.

Além disso, foram realizados cursos e treinamentos de aprofundamento sobre a temática dos veículos autônomos e ADAS, tendo como objetivo o desenvolvimento de um conhecimento mais apurado sobre o assunto e que possibilite *insights* importantes. Foram realizadas as seguintes capacitações:

- **Introduction to Self-Driving Cars Course:** curso de 35h oferecido por S. Waslander and J. Kelly - University of Toronto Course - na plataforma Coursera [2].
- **Advanced Driver Assistance Systems (ADAS):** curso de 9h oferecido por K. Suchit na plataforma Udemy [10].
- **Treinamento de software CarSim:** treinamento de 12h oferecido pela empresa VirtualCAE.
- **Treinamento de software TruckSim:** treinamento de 12h oferecido pela empresa VirtualCAE.
- **Fundamentos de CAN:** treinamento de 7h oferecido pela empresa Vector Informatik.

1.5 Modelo Matemático

Em termos de modelo matemático é interessante equacionar a dinâmica externa do veículo *host*, não considerando eventuais dinâmicas internas. Basicamente, o modelo considera a propulsão e as resistências externas, apenas para fins do projeto de controle. Em um contexto genérico, um possível diagrama de forças é indicado na Figura 3.

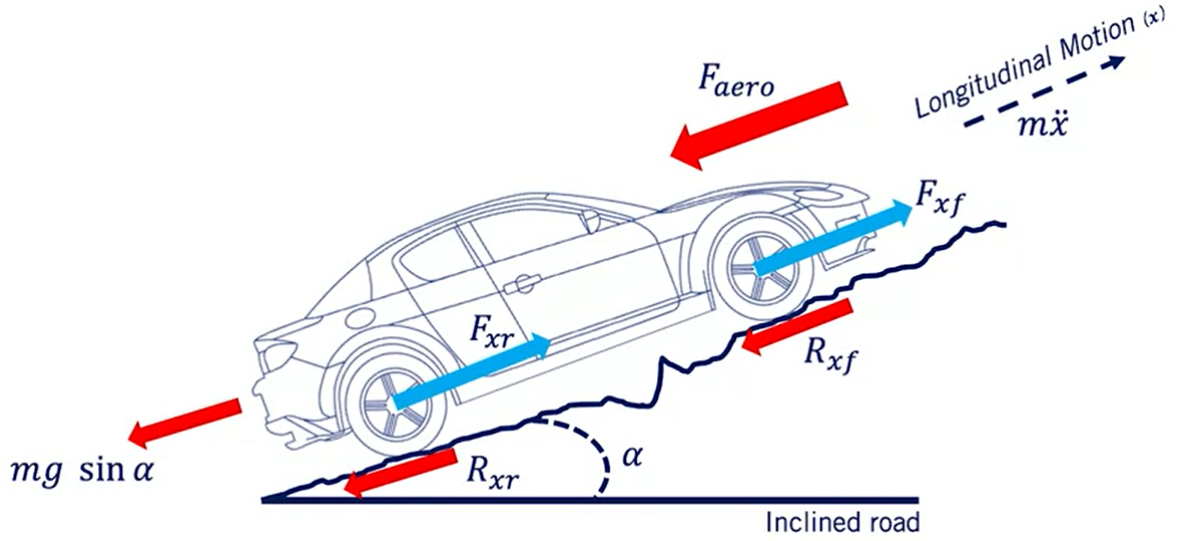


Figura 3: Diagrama de Forças de um Veículo. Extraído de [2]

Das forças atuantes, tem-se:

- **Força das rodas dianteiras e traseiras:** F_{xr} e F_{xf}

Pode-se assumir que $F = F_{xr} + F_{xf}$ é a força de propulsão

- **Forças aerodinâmicas:** F_{aero}
- **Resistência de rolamento das rodas dianteiras e traseiras:** R_{xr} e R_{xf}

Pode-se assumir que $F_r = R_{xr} + R_{xf} + F_{aero}$ é a força de resistência total sobre o veículo (força aerodinâmica junto aos atritos), sendo $F_r(v_h)$ uma função da velocidade v_h do veículo controlado. Uma possível função seria $F_r(v_h) = f_0 + f_1 \cdot v_h + f_2 \cdot v_h^2$, com as constantes f_0 , f_1 e f_2 determinadas empiricamente [5].

- **Força Gravitacional:** $Mg \sin \alpha$

Da 2ª Lei de Newton, tem-se que:

$$M\dot{v}_h = F - Mg \sin \alpha - F_r(v_h), \quad (1.1)$$

onde M é a massa do veículo. Definindo $x = v_h$ e a força de propulsão como F a entrada do sistema, a equação pode ser reescrita como:

$$\dot{x} = \underbrace{\frac{-F_r(v_h) - Mg \sin \alpha}{M}}_{f(x)} + \underbrace{\frac{1}{M}}_{g(x)} F \quad (1.2)$$

O sistema de controle é dividido em alto nível (ULC) e baixo nível (LLC). Como o controle ULC gera uma referência de aceleração para o controle LLC, um novo modelo pode ser aproximado considerando o seguinte esforço de controle $\bar{u} = a_h^* = \frac{F}{M}$. Ademais, para tal modelo, pode-se adotar a simplificação $\alpha = 0$, uma vez que o ULC apenas gerará a referência almejada ao LLC, sendo que este tratará de como atingir a aceleração pretendida manipulando o acelerador (força de propulsão).

Deste modo, considerando a velocidade relativa $\dot{x}_r = v_l - v_h$, as equações do problema em questão são as seguintes:

$$\begin{cases} \dot{v}_h = -\frac{F_r(v_h)}{M} + u & \text{Equação de Performance} \\ \dot{x}_r = v_l - v_h & \text{Equação de Segurança} \end{cases} \quad (1.3)$$

Matricialmente, tem-se, para $u = F$ que:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_h \\ \dot{x}_r \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{F_r(v_h)}{M} \\ v_l - v_h \end{bmatrix}}_{f(x)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{g(x)} u \quad (1.4)$$

A partir desse modelo simplificado da planta, o objetivo é projetar os controladores pretendidos e posteriormente validar em modelos mais complexos (software de simulação realista).

1.6 Cronograma Geral

1.6.1 Cronograma 1º Semestre

Nesta seção será apresentado o cronograma detalhado dos resultados obtidos no 1º semestre de 2022. A seguir há uma descrição detalhada dos marcos:

- **Março**

Revisão Bibliográfica: levantamento bibliográfico acerca das implementações mais recentes do ACC, assim como das técnicas de controle do estado da arte inte-

ressantes para a aplicação.

Realização de Cursos e Treinamentos: de modo a propiciar um maior aprofundamento sobre veículos autônômicos e ADAS, atividade importante no sentido de possibilitar um olhar mais clínico acerca dos desafios intrínsecos ao projeto escolhido.

- **Abril**

Análise dos Requisitos: após o levantamento bibliográfico e maior aprofundamento sobre o tema com os cursos/treinamentos, foi realizada uma análise dos requisitos necessários para um funcionamento satisfatório do sistema de ACC.

Modelagem do Sistema: foi realizada uma modelagem do sistema dinâmico (planta) de modo a possibilitar a implementação dos controladores, assim como análise dos sinais de entrada/saída.

- **Maior**

Projeto do Controlador da Malha Externa: desenvolvimento do controlador para a malha externa ULC responsável pelo sinal de aceleração/frenagem de referência para a malha interna.

- **Junho**

Projeto do Controlador da Malha Interna: desenvolvimento do controlador para a malha interna LLC responsável pelos sinais enviados aos pedais do acelerador e freio.

Finalização do Relatório 2 e Realização da 2^a Apresentação.

- **Julho**

Simulação e Validação em MATLAB: ao longo do 1^o semestre foram feitas simulações no software MATLAB para avaliar o desempenho dos controladores desenvolvidos perante o modelo do sistema proposto. Posteriormente o objetivo foi validar em modelos mais complexos também utilizando o software MATLAB.

Finalização do Relatório 3 e Realização da 3^a Apresentação.

Segue abaixo o cronograma resumido em formato de tabela:

Tabela 1: Cronograma de Atividades para o 1^o Semestre de 2022

| Data | Descrição |
|-------------|--|
| Março | Revisão Bibliográfica Realização de Cursos |
| Abril | Análise dos Requisitos e Modelagem do Sistema |
| Maio | Projeto do Controlador da Malha Externa |
| Junho | Projeto do Controlador da Malha Interna Finalização do Relatório 2 2 ^a Apresentação |
| Julho | Simulação e Validação em MATLAB Finalização do Relatório 3 3 ^a Apresentação |

1.6.2 Cronograma 2^o Semestre

Nesta seção será apresentado o cronograma detalhado dos resultados obtidos no 2^o semestre de 2022.

Com o alcance dos marcos propostos para o 1^o semestre, o objetivo para o semestre seguinte é utilizar simuladores mais realistas para simular o radar e ter um modelo do carro mais fidedigno. No âmbito automobilístico há softwares de simulação realista que possibilitam uma validação mais robusta dos controles desenvolvidos antes de uma eventual implementação em hardware.

Dentre os softwares existentes, o CarSim e o DYNA-4 se apresentam como interessantes opções, uma vez que apresentam elevada confiabilidade na indústria automobilística. Atualmente, na literatura, já existem trabalhos publicados que utilizam o CarSim [12,13], principalmente pela sua efetiva integração com MATLAB/Simulink, a ferramenta preferencial da área de controle e automação.

A seguir há uma descrição detalhada dos marcos, sem considerar entrega e/ou apresentações intermediárias:

- **Agosto e Setembro**

Simulação e Validação em software realista: Após a simulação e validação em MATLAB realizada em Julho, entra-se na 2ª etapa do projeto referente ao uso de simuladores *benchmark* para validar os controladores desenvolvidos.

- **Outubro e Novembro**

Euro NCAP: O *European New Car Assessment Programme* é um teste referência na análise de segurança de sistemas ADAS como o ACC. Sendo assim, se for possível alcançar uma nota alta o suficiente com essa estratégia de controle, então será possível atestar que de fato a lei de controle proposta nesse trabalho é útil na prática e tem potencial para figurar entre as melhores implementações para ACC. Logo, o controle será validado no simulador realista CarSim executando esse procedimento de teste.

- **Dezembro**

Finalização do Relatório Final e realização da Apresentação Final.

Segue abaixo o cronograma resumido em formato de tabela:

Tabela 2: Cronograma de Atividades para o 2º Semestre de 2022

| Data | Descrição |
|--------------------|--|
| Agosto e Setembro | Simulação e Validação em Software Realista |
| Outubro e Novembro | Euro NCAP |
| Dezembro | Finalização do Relatório Final Apresentação Final |

2 LAÇO ULC - MALHA EXTERNA

Neste capítulo será detalhado o projeto do ULC, malha introduzida na seção 1.1. Dentre os conceitos que serão apresentados, destacam-se:

- Retomada da importância dessa malha de controle e como ela concebe o problema.
- Implementação dos controles que atendem aos requisitos de Estabilidade/Desempenho, Segurança e Conforto.
- Arbitragem dos requisitos.

2.1 Ponto de vista de projeto

Conforme introduzido na seção 1.1, o problema do ACC é caracterizado por uma planta complexa em termos de modelagem (veículo) e requisitos conflitantes. Uma abordagem pragmática é dividir o problema em duas vertentes, uma focada em atender os requisitos e outra focada em lidar com a complexidade da planta. Diante dessa estratégia que surgiu o *insight* de trabalhar com um controle em cascata (ULC e LLC), assim como ilustrado na Figura 2.

O ULC concebe o problema de natureza complexa de forma simplificada, somente considerando dinâmicas externas e não considerando as dinâmicas internas, tais como os modelos dos pneus, amortecedores, câmbio, sistema de ignição, etc. A partir desta estratégia foi utilizado o modelo desenvolvido no capítulo 1.5 para a implementação do controle.

A seguir serão detalhados os pormenores acerca do *CLF-CBF*, proposta de controle para tratar o problema. Para compreender adequadamente as leis de controle mostradas a seguir e para ser possível realizar o projeto dos controladores, isto é, realizar a sintonização dos parâmetros adequadamente, é fundamental entender com razoável profundidade o significado da CLF e da CBF, bem como os teoremas de Lyapunov e Nagumo que embasam

essas leis de controle respectivamente. É importante ter em mente que uma das grandes vantagens dessa categoria de controles voltados para dinâmica automotiva é justamente as garantias teóricas sólidas associadas à essas leis de controle.

2.2 Função de Lyapunov de Controle

2.2.1 Introdução

Para tratar o problema de estabilização, isto é, acompanhar a velocidade de cruzeiro v_d (referência) definida pelo motorista, há diferentes alternativas, desde aplicação de controle clássico quanto controle avançado ou mesmo não-linear. Para esse projeto de controle será escolhida a técnica Função de Lyapunov de Controle ou simplesmente CLF conforme introduzido no capítulo 1.

A aplicação de CLF é uma das técnicas mais modernas para projeto de controladores para estabilização de sistemas não-lineares. De modo semelhante à equação 1.4 obtida na modelagem do problema, considere o seguinte sistema de controle:

$$\dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u \quad (2.1)$$

A ideia principal é que um controlador u pode estabilizar o sistema no sentido de Lyapunov se satisfizer o seguinte:

$$\dot{V}(x) = L_f V(x) + L_g V(x)u \leq -c_V V(x) \quad (2.2)$$

onde

- $L_f V(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) \Rightarrow$ Derivada de Lie de V em relação a $f(x)$
- $L_g V(x) = \frac{\partial V}{\partial x} g(x) \Rightarrow$ Derivada de Lie de V em relação a $g(x)$
- c_V uma constante positiva, parâmetro de projeto relacionado à taxa de convergência da estabilização

A função $V(x)$ é uma Função de Lyapunov de Controle exponencialmente estabilizante que gera uma família de controladores $u(x)$ no seguinte conjunto:

$$K_{clf}(x) := \{u \in U : L_f V(x) + L_g V(x)u + c_V V(x) \leq 0\}, \quad (2.3)$$

Uma explicação menos concisa do equacionamento sumarizado na equação 2.2 pode ser encontrada em Ames et al. (2017) [5].

2.2.2 Detalhamento Teórico

2.2.2.1 Teoria de Lyapunov

Para introduzir a teoria, considere um sistema autônomo não linear da forma

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.4)$$

cuja estabilidade se quer analisar segundo as ideias baseadas em energia de Lyapunov.

Considerando-se o estado inicial do sistema dinâmico autônomo $x(0) = x_0$, deseja-se analisar se o sistema irá convergir para um ponto de equilíbrio estável representado pelo estado x_e como mostrado na Figura 4.

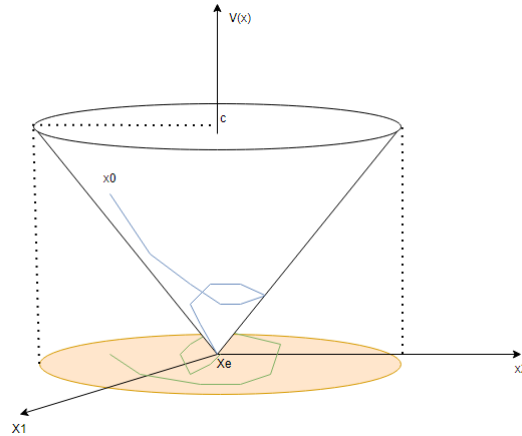


Figura 4: Figura didática para explicação da teoria de Lyapunov e CLF. Fonte: autores

Na Figura 4, a curva em azul é a função $V(x)$ ao longo da trajetória do vetor de estados $x \in \mathbb{R}^n$ no plano $\Omega_c \subset \mathbb{R}^n$ representado pelo disco plano laranja. Note que a cota c define as fronteiras do plano Ω_c que contém as possíveis trajetórias do vetor de estados x . A curva verde é a projeção da curva azul no plano Ω_c .

Pela teoria de Lyapunov, se for possível encontrar uma função de Lyapunov $V(x)$ que verifique as condições mostradas em 2.8, então o sistema dinâmico é estável. Com isso é possível provar a estabilidade de um sistema sem resolver as equações diferenciais não lineares do sistema 2.4.

$$\begin{aligned}
& V(x) \\
& s.t \ V(x_e) = 0, V(x) > 0 \text{ for } x \neq x_e, \\
& \dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) < 0 \text{ for } x \neq x_e
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Como $\dot{V}(x) < 0$ para $x \neq x_e$, então isso implica que o subespaço $\Omega_c = \{x | V(x) \leq c\}$ é invariante. Ou seja, para qualquer valor inicial x_0 será determinada uma cota c tal que a projeção da trajetória dos estados do vetor de estados x seja invariante ao subespaço Ω_c .

A intuição por trás dessa formulação é que a função $V(x)$ é a própria função que descreve a energia do sistema dinâmico, ou uma função inspirada em funções clássicas de energia. Sendo assim, $V(x) = 0$ é o ponto de mínima energia, o que remete à ideia de ponto de equilíbrio, ainda que $V(x)$ não seja exatamente a função de energia do sistema. A estabilidade é garantida para o sistema se sua trajetória é tal que $\dot{V}(x) < 0$ para $x \neq x_e$, isto é, tal que a “potência” do sistema seja negativa, o que significa que o sistema dissipa energia até que sua energia se anule. Analogamente, $\dot{V}(x) < 0$ indica que o sistema caminha para o ponto de equilíbrio x_e ao longo de todo o tempo, sempre se aproximando dele.

Entretanto, é preciso salientar que a restrição $\dot{V}(x) < 0$ é muito severa e leva a um subaproveitamento da região em que o sistema é estável para realizar requisitos de desempenho mais interessantes. Uma condição igualmente suficiente para estabilidade no sentido de Lyapunov, mas que aproveita melhor as possibilidades de trajetórias dos estados e, portanto, de desempenho é $\dot{V}(x) < -c_V V(x)$. Essa outra forma é interessante também por definir uma estabilidade exponencial ou até mais rápida. Sabe-se que a solução de $\dot{a} = c \times a$, $\{c \in \mathbb{R} | c > 0\}$ é $a = e^{-ct}$, é estável e converge para o ponto de equilíbrio exponencialmente. Então $\{c_V \in \mathbb{R} | c > 0\}$ na equação 2.2 representa a taxa de convergência da estabilidade no sentido de Lyapunov.

Dessa forma, é mais interessante definir matematicamente a teoria de Lyapunov como:

$$\begin{aligned}
& V(x) \\
& s.t \ V(x_e) = 0, V(x) > 0 \text{ for } x \neq x_e, \\
& \dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) < -c_V V(x) \text{ for } x \neq x_e
\end{aligned} \tag{2.6}$$

2.2.2.2 Função de Lyapunov de Controle

Considere agora o sistema controlado por um vetor de esforço de controle u . O sistema dinâmico é descrito por:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2.7)$$

E a função de Lyapunov $V(x)$ passa a depender do esforço de controle u . A nova formulação da função de Lyapunov $V(x, u)$ para garantir a estabilidade do sistema é:

$$\begin{aligned} & V(x, u) \\ & s.t \ V(x_e) = 0, V(x) > 0 \text{ for } x \neq x_e, \\ & \exists u, \ s.t \ \dot{V}(x, u) < -c_V V(x, u) \text{ for } x \neq x_e \end{aligned} \quad (2.8)$$

Essa nova condição para a derivada expandida em termos da derivada de Lie resulta em:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, u) &= \nabla V(x)\dot{x} + c_V V(x) \\ &= \nabla V(x)(f(x) + g(x)u) + c_V V(x) \\ &= \nabla V(x)f(x) + \nabla V(x)g(x)u + c_V V(x) \\ &= L_f V(x) + L_g V(x)u + c_V V(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

A solução da equação 2.9 é mostrada na equação 2.12 que é a CLF fazendo-se $\delta = 0$.

2.2.3 Projeto

Em termos de projeto, deseja-se que a velocidade do veículo *host* tenha convergência para a velocidade de cruzeiro v_c . Matematicamente isso é representado na forma da equação 2.10

$$\text{Performance: } \lim_{t \rightarrow \infty} v_h(t) = v_c \quad (2.10)$$

Uma função de Lyapunov $V(x)$ candidata que atende a equação 2.2 proposta por Ames et al. (2017) [5] é mostrada na equação 2.11.

$$V(x) := (v_h - v_d)^2 \quad (2.11)$$

A Figura 5 mostra a projeção do gráfico da função $V(x)$ definida na equação 2.11. O gráfico dessa função é uma figura no \mathbb{R}^5 (desprezando-se a dependência do tempo), porém aqui mostra-se a projeção dessa figura 5-dimensional no subespaço tridimensional. Essa representação torna a figura visível sem perda de informações, pois $V(x)$ depende somente de $x = [v_h, v_d]' \in \mathbb{R}^2$ ainda que o espaço de estados completo seja, considerando-se um sistema em malha fechada e com referência v_d , da seguinte forma $x = [D, v_h, v_l, v_d]' \in \mathbb{R}^4$.

A linha amarela representa todos os possíveis pontos de equilíbrio quando $V(x)$ é interpretada na forma de função de energia do sistema. Ou seja, sempre que a velocidade do veículo *host* v_h for igual à velocidade desejada, v_d o sistema estará na sua região de equilíbrio estável, isto é, em caso de perturbação o sistema tenderá a voltar para essa condição. Porém, note que somente a região $v_h \geq 0$, $v_d \geq 0$ deve ser considerada, pois o problema de ACC não engloba velocidades negativas.

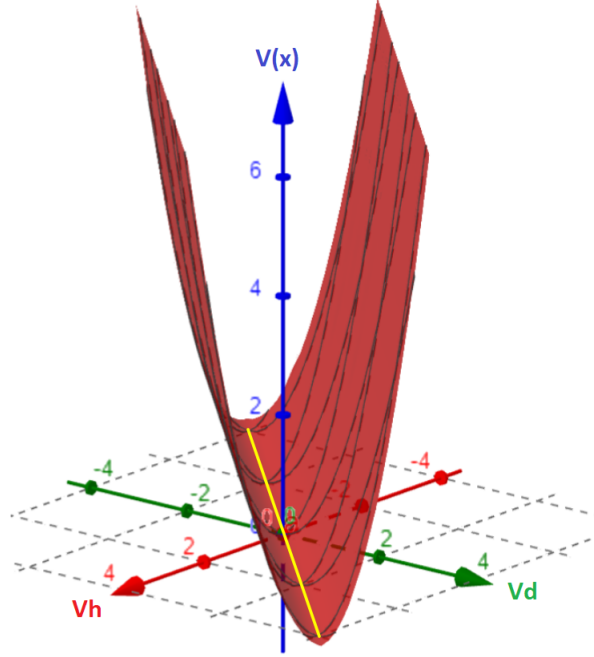


Figura 5: Gráfico de $V(x) := (v_h - v_d)^2$ gerado no software Geogebra Online com linha amarela inserida manualmente. Fonte: autores

Outra decisão de projeto importante é considerar um fator de relaxação δ na equação 2.2 para que posteriormente a restrição de segurança tenha maior prioridade que a restrição de desempenho. A relaxação δ é calculada dinamicamente na estrutura de programação quadrática da seção 2.4. Com a adição do termo de relaxação a expressão fica na forma da equação 2.12.

$$\dot{V}(x) = L_f V(x) + L_g V(x)u + c_V V(x) - \delta \leq 0 \quad (2.12)$$

2.2.4 Ajuste do parâmetro c_V

O parâmetro c_V é a taxa de convergência exponencial da Função de Lyapunov de Controle. Sendo assim, para que o sistema funcione, é necessário que ela seja ajustada a um valor adequado.

Essa seção tem por objetivo mostrar o efeito de diversos valores para esse parâmetro e discutir os resultados obtidos.

Para ilustrar a influência da escolha do parâmetro, a seguir são mostradas três simulações utilizando o diagrama de simulação em MATLAB/Simulink mostrado na Figura 25. Os parâmetros adotados para malha ULC (vide capítulo 2) são os da tabela 3 exceto pelo γ alterado em cada simulação conforme as legendas das Figuras 6, 7 e 8. Os demais parâmetros relacionados à malha LLC (vide capítulo 3) utilizados para as simulações são agrupados na tabela 4.

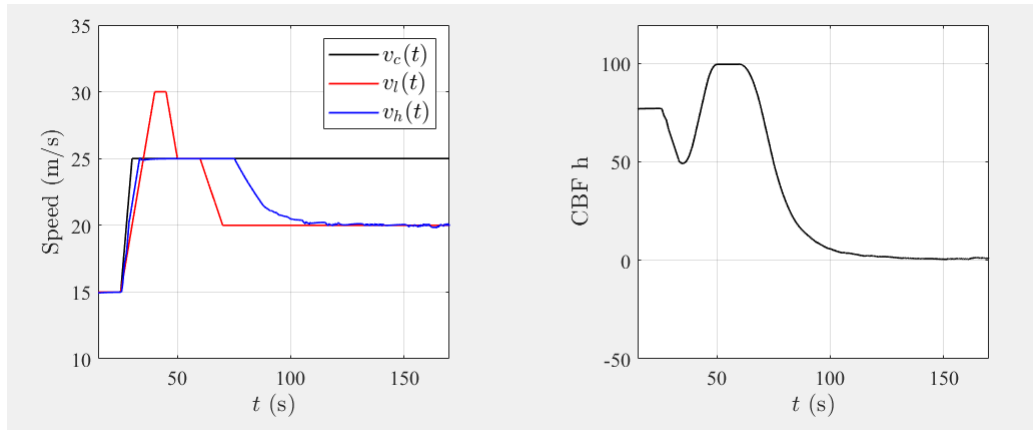


Figura 6: Simulação com $c_V = 5$ e demais parâmetros fixados

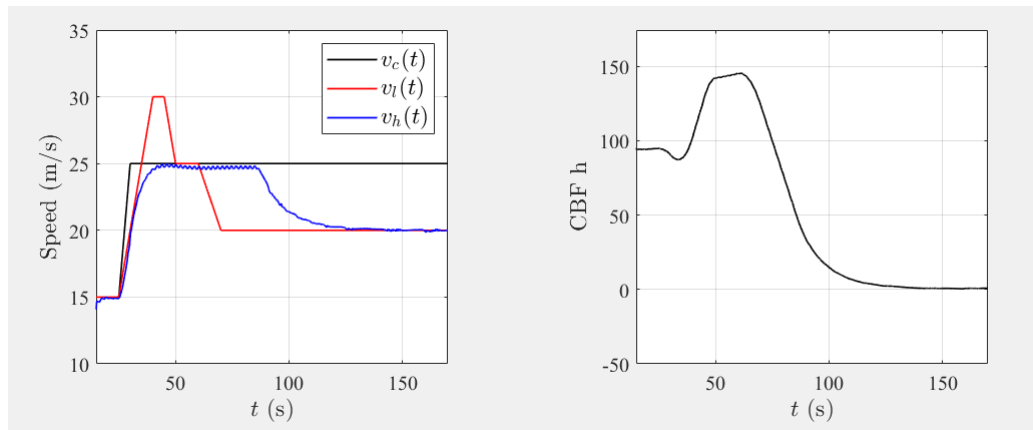


Figura 7: Simulação com $c_V = 0.5$ e demais parâmetros fixados

Analisando as Figuras 6, 7 e 8, conclui-se que a escolha do c_V muito pequeno implica

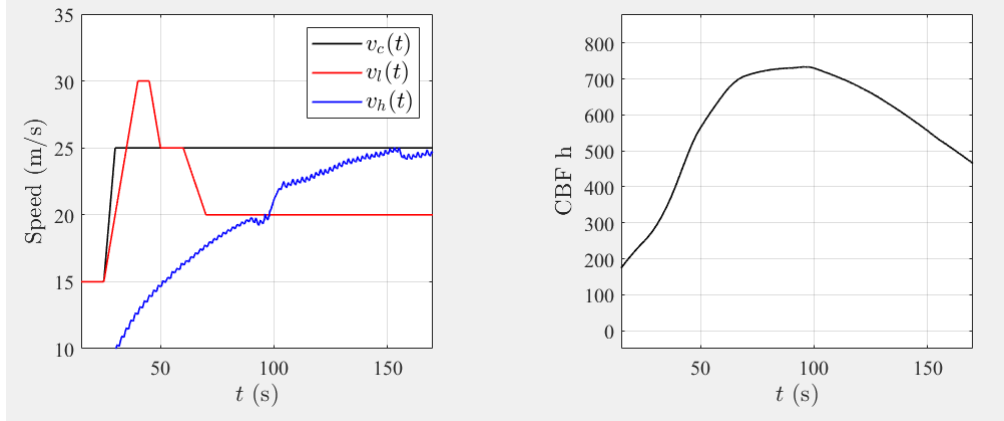


Figura 8: Simulação com $c_V = 0.05$ e demais parâmetros fixados

que a convergência do sistema para o objetivo é muito lenta. Note que no gráfico da Figura 8, o sistema somente alcança o objetivo em $t = 150s$, enquanto um ajuste mais adequado desse parâmetro permite que o sistema alcance a velocidade de cruzeiro em $t = 33s$ como mostrado na figura 6. A escolha de c_V muito grande não contribui para a agilidade do sistema. Nesse caso, impor $c_V = 50$ implica no mesmo resultado quando $c_V = 5$, pois esse é o limite imposto pela dinâmica da planta, isto é, do veículo com ACC.

- Regra geral: quanto maior o c_V mais rapidamente a planta alcançará o *setpoint* desejado.

Em suma, se fazem necessários alguns testes para encontrar um valor de c_V adequado, e por esse motivo, a utilização de simulações mais realistas se justifica como parte importante da sintonia do controlador.

2.3 Função de Barreira de Controle

2.3.1 Conceito

O conceito da função de barreira de controle é definir um subespaço \mathcal{C} tal que sua regra de formação defina os requisitos de segurança de um sistema dinâmico, e a partir disso estabelecer um esforço de controle u tal que u torne os estados do sistema invariantes ao subespaço seguro \mathcal{C} .

2.3.2 Detalhamento Teórico

2.3.2.1 Princípio de invariância de Nagumo

A ideia aqui é avaliar se um sistema fica invariante a um subespaço \mathcal{C} considerando que ele evolua no tempo a partir de um estado inicial $x(0) = x_0 \in \mathcal{C}$.

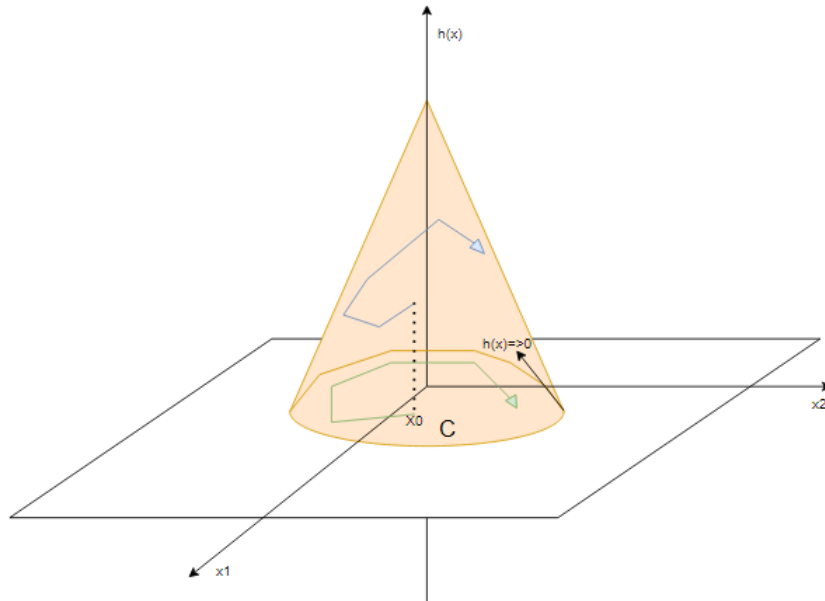


Figura 9: Figura didática para explicação do princípio de Nagumo e CBF. Fonte: autores

Na Figura 9, a curva verde é a trajetória dos estados do vetor de estados $x \in \mathbb{R}^n$ partindo do estado inicial x_0 , a curva azul é a função $h(x)$ avaliada em todos os pontos da trajetória. A circunferência amarela formada pela projeção da função $h(x) \forall \{x \mid h(x) > 0\}$ no hiperplano do espaço de estados delimita uma área interna a ela que se traduz no subespaço $\mathcal{C} \subset \mathbb{R}^n$.

Segundo a teoria de Nagumo, sabe-se que é possível avaliar se o vetor de estados x está ou não contido no subespaço seguro através de uma função de Barreira. Para ilustrar o conceito a explicação será feita utilizando a função ZBF $h(x)$ (*Zeroing Barrier Function*). Essa função é análoga à função de Lyapunov, mas utilizando uma função de concavidade oposta àquela utilizada na função de Lyapunov.

Pelo princípio de Nagumo, se for possível definir uma função de barreira $h(x)$ que verifique as condições mostradas na equação 2.13, então o sistema dinâmico é invariante ao subespaço \mathcal{C} . Com isso, é possível fazer a análise desejada sem resolver as equações não lineares do sistema cujas soluções são difíceis de se obter.

$$\begin{aligned}
& h(x) \\
& s.t \ \dot{h}(x) \geq 0 \ \forall x \in \partial\mathcal{C} \\
& \mathcal{C} = \{x|h(x) \geq 0\}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Apesar dessa ser a maneira mais intuitiva de definir a $h(x)$ tal que o sistema 2.4 seja invariante ao subespaço \mathcal{C} , essa formulação é excessivamente restritiva, pois impõe $\dot{h}(x) \geq 0$ para todos os níveis de $h(x)$. Dessa maneira, as soluções ficam restritas a um subespaço menor que o subespaço seguro \mathcal{C} sempre que $h(x_0) > 0$.

Para contornar esse problema, a condição da equação 2.13 é relaxada para

$$\begin{aligned}
& h(x) \\
& s.t \ \dot{h}(x) \geq -\gamma h(x) \ \forall x \in \partial\mathcal{C} \\
& \mathcal{C} = \{x|h(x) \geq 0\}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Graficamente pode-se ver esse fato através da Figura 10 em que a trajetória verde é parte de x_0 e está limitada pela barreira condicionada por $\dot{h}(x) \geq 0$. Essa barreira representada pela região roxa é menor do que a região da circunferência do subespaço seguro \mathcal{C} . Com isso, a trajetória verde tem menos liberdade, o que implica em uma menor probabilidade de atender as condições de desempenho do sistema. Por outro lado, a trajetória vermelha é uma trajetória análoga à verde quando se considera o princípio de Nagumo relaxado em termos de $\gamma > 0 \in \mathbb{R}$ como na equação 2.14. Note que a trajetória vermelha está relacionada a regiões de $\dot{h}(x) < 0$ mas ainda dentro do subespaço seguro \mathcal{C} , ou seja, a relaxação considerada não implica na quebra da invariância do subespaço seguro \mathcal{C} , mas com a vantagem da trajetória estar mais livre, o que na aplicação em controle significará que os estados poderão atender melhor as restrições de desempenho. A condição da derivada é relevante somente nas proximidades da fronteira do subespaço seguro \mathcal{C} . Nesse sentido, a constante γ define o quão próximo o estado do sistema dinâmico deve estar da fronteira $\partial\mathcal{C}$ para que o efeito dessa condição de derivada seja não desprezível.

Observação importante: note que os conceitos geométricos utilizados para as explicações das Figuras 9 e 4 se aplicam no caso $\mathbb{R}^n = \mathbb{R}^2$. Se $n > 2$, extensões desses conceitos são aplicáveis, mas não é mais possível representar o problema por meio de figuras tridimensionais.

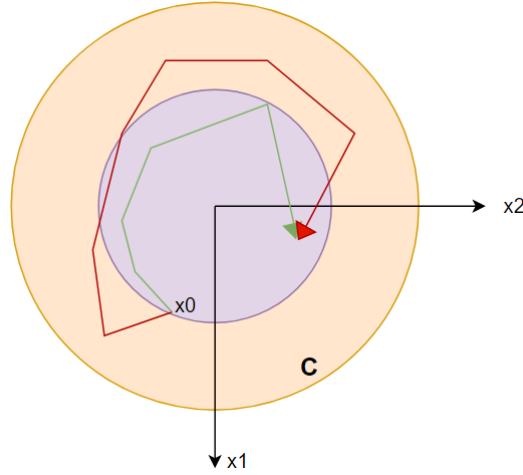


Figura 10: Figura didática para explicação da relaxação do princípio de Nagumo. Fonte: autores

2.3.2.2 Função de Barreira de Controle

Considere agora o sistema controlado por um vetor de esforço de controle u . O sistema dinâmico é descrito na equação 2.7.

A função de barreira ZBF $h(x)$ passa a depender do esforço de controle u . A nova formulação da função de barreira $h(x, u)$ para garantir a invariância do sistema ao subespaço seguro \mathcal{C} é apresentada a seguir.

$$\begin{aligned}
 &h(x) \\
 &\exists u, \text{ s.t } \dot{h}(x, u) \geq -\gamma h(x) \quad \forall x \in \partial\mathcal{C} \\
 &\mathcal{C} = \{x | h(x) \geq 0\}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Essa nova condição para derivada expandida em termos da derivada de Lie resulta em:

$$\begin{aligned}
 \dot{h}(x, u) &= \nabla h(x) \dot{x} \\
 &= \nabla h(x) (f(x) + g(x)u) \\
 &= \nabla h(x) f(x) + \nabla h(x) g(x)u \\
 &= L_f h(x) + L_g h(x)u + \gamma h(x) \geq 0
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Com isso, define-se agora ZCBF (*Zeroing Control Barrier Function*) como:

$$L_f h(x) + L_g h(x)u + \gamma h(x) \geq 0$$

2.3.3 Subespaço Seguro

$$\mathcal{C} = \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) \geq 0\} \quad (2.17)$$

$$\partial\mathcal{C} = \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) = 0\} \quad (2.18)$$

$$\text{Int}(\mathcal{C}) = \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) > 0\} \quad (2.19)$$

A equação 2.17 formaliza o subespaço em termos da ZBF, sendo uma função $h(x) \geq 0$ que define a barreira de segurança. O que se faz, é descrever o problema segurança em termos das variáveis do problema construindo-se a função $h(x)$.

Além disso, define-se o $\partial\mathcal{C}$ como a fronteira do subespaço definido na equação 2.17. Define-se também a região interna ao subespaço seguro $\text{Int}(\mathcal{C})$, isto é, a região em que os estados não estão no limite das condições de segurança impostas pela função de barreira ZBF $h(x)$.

2.3.4 Zeroing Barrier Function (ZBF)

Na literatura existem trabalhos publicados em termos da ZBF $h(x)$ e/ou da RBF (*Reciprocal Barrier Function*) $B(x)$. Em Ames et al. (2017) [5] é demonstrado que ambas as funções de barreira descrevem o problema de maneira equivalente. Ilustram-se as diferenças de cada representação através das propriedades mostradas a seguir:

$$\lim_{x \rightarrow \partial\mathcal{C}} B(x) = \infty$$

$$\lim_{x \rightarrow \partial\mathcal{C}} h(x) = 0$$

A função $B(x)$ é inconveniente para aplicações em hardware, pois tende ao infinito na fronteira $\partial\mathcal{C}$ o que implica em *overflow*. Nesse sentido, a função $h(x)$ é adotada como padrão nesse projeto devido à conveniência para aplicações em hardware na medida em que seu valor limite é o zero, o que não causa *overflow*. Na seção de 2.3.6 será ilustrado o procedimento de definição da função $h(x)$ para um problema específico, no caso o ACC.

2.3.5 A lei de controle

Uma vez definida a ZBF $h(x)$, pode-se formalizar uma restrição do esforço de controle u de tal maneira que u garanta a invariância do subespaço definido na equação 2.17.

Para que u garanta a invariância dos estados do sistema dinâmico ao subespaço seguro \mathcal{C} deve se ter u no subespaço $K_{\text{zcbf}}(x)$. Para que isso seja realizado, define-se a ZCBF que é a lei de controle, baseada nas ideias Lyapunov e no teorema de Nagumo, que impõe $u \in K_{\text{zcbf}}(x)$.

$$K_{\text{zcbf}}(x) := \{u \in U : L_f h(x) + L_g h(x)u + \alpha_h(h(x)) \geq 0\}, \quad (2.20)$$

Para fins práticos é suficiente considerar o caso linear da função $\alpha_h(\cdot)$ como descrito em Ames et al. (2017) [5] e apresentado na equação 2.21.

$$\alpha_h(h(x)) = \gamma h(x) \quad (2.21)$$

Note que γ será um parâmetro de projeto a ser definido. O significado dessa constante foi devidamente explicado na seção 2.3.2.1.

A CBF é expressa então como discutido na seção de teoria como

$$\dot{h}(x) = L_f h(x) + L_g h(x)u + \gamma h(x) \geq 0 \quad (2.22)$$

2.3.6 Projeto

No projeto da CBF, deve-se determinar uma função $h(x)$ para o problema. Como a ZBF endereça os requisitos de segurança e é forçada a ser positiva pela ZCBF, isto é, $h(x) \geq 0$, então manter a distância entre os veículos sempre maior do que zero se traduz matematicamente na definição da ZBF mostrada na equação 2.23.

$$h(x) = D \quad (2.23)$$

Pela definição da equação 2.23, o limite é quando $h(x) = D = 0$, ou seja, situação em que os carros colidem. Para se ter uma folga considera-se a distância segura em virtude do *time-to-collision* $\tau_d = 1.8s$ conforme explicado na seção 1.4. Deste modo, tem-se que:

Pela definição da equação 2.23, o limite é quando $h(x) = D = 0$, ou seja, situação

em que os carros colidem. Isso funciona bem se o carro possuísse dinâmica de freio nula e pudesse parar instantaneamente. Porém, como na prática isso não ocorre, é preciso considerar o tempo *time-to-collision* $\tau_d = 1.8s$ conforme explicado na seção 1.4. Como τ_d é um tempo pequeno, pode-se assumir que nesse intervalo a velocidade do veículo *host* é constante de tal maneira que a distância percorrida em τ_d segundos é $\tau_d \cdot v_h$. Descontando-se esse deslocamento decorrente do tempo de reação do motorista chega-se a nova definição da ZBF mostrada na equação 2.24.

$$h(x) = D - \tau_d \cdot v_h \quad (2.24)$$

A Figura 11 mostra a projeção do gráfico da função $h(x)$ definida na equação 2.24. O gráfico dessa função é uma figura no \mathbb{R}^4 (desprezando-se a dependência do tempo), porém aqui mostra-se a projeção dessa figura 4-dimensional no subespaço tridimensional. Essa representação torna a figura visível sem perda de informações, pois $h(x)$ depende somente de $x = [D, v_h]' \in \mathbb{R}^2$ ainda que o espaço de estados completo seja, na verdade, $x = [D, v_h, v_l]' \in \mathbb{R}^3$.

A região sombreada em preto é a projeção de $h(x) \geq 0$ no plano de estados o que nada mais é do que o subespaço seguro \mathcal{C} a ser mantido como invariante por meio da lei de controle CZBF. O subespaço seguro então é definido na equação 2.25.

$$\mathcal{C} = \{x \in \mathbb{R}^3 : h(x) \geq 0, D \geq 0, v_h \geq 0\} \quad (2.25)$$

As condições $D \geq 0$ e $v_h \geq 0$ não fazem parte da formulação original de \mathcal{C} . Porém, são aqui consideradas, pois $D \geq 0$ é a descrição formal de que veículos atrás do veículo *host* não são considerados e $v_h \geq 0$ é a descrição formal de que o sistema de ACC não se destina a andar para trás.

2.3.7 Ajuste do parâmetro γ

Como ilustrado na Figura 10, o parâmetro γ define uma relaxação da condição $\dot{h}(x) \geq 0$, dada pelo princípio de Nagumo.

Uma maneira mais direta de entender isso é que a escolha de $\gamma = \gamma_b$ grande implica que somente trajetórias de estados muito próximos da condição limite $\partial\mathcal{C}$ levarão a condição da barreira se sobrepôr a condição de desempenho no *framework* proposto na seção 2.4, o que se traduz na manutenção da invariância do subespaço seguro \mathcal{C} . Na

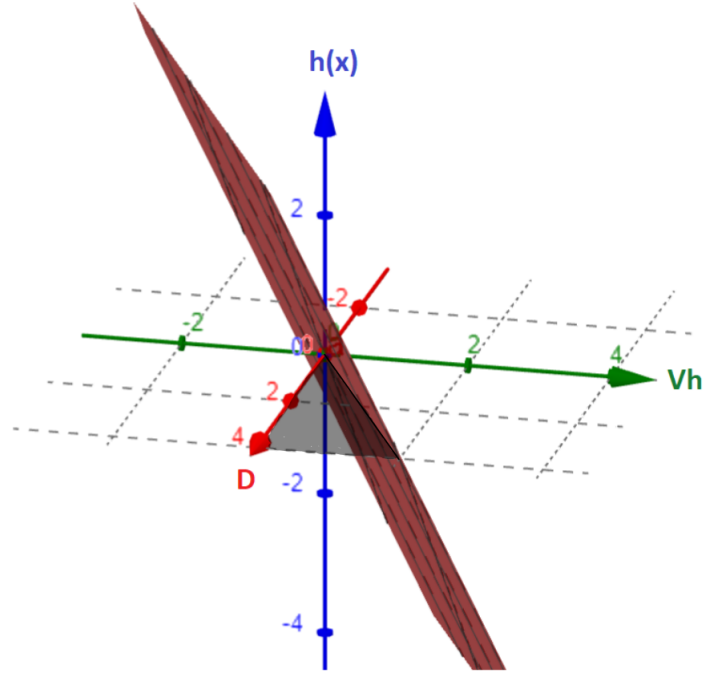


Figura 11: Gráfico da barreira $h(x) = D - \tau_d \cdot v_h$ gerado no software Geogebra Online com sombreado em preto pintado manualmente. Fonte: autores

Figura 12 isso se verifica no ponto em que a trajetória de estados vermelha tangencia a circunferência vermelha e retorna para dentro da região vermelha. Note que como $\gamma \neq 0$ a trajetória vermelha está limitada pela circunferência vermelha que possui um raio maior se comparado aquele formado pelo seguimento que parte da origem e termina no estado x_0 , diferentemente do que ocorre na Figura 10 para o caso em que $\gamma = 0$, representado na Figura 10 pela trajetória verde daquela figura.

Se $\gamma = \gamma_s$ for pequeno, então a condição de barreira será ainda mais severa no *framework* de tal maneira que as trajetórias de estados mais afastadas do limite $\partial\mathcal{C}$ serão afetadas por essa condição. Na Figura 12 isso se verifica no ponto em que a trajetória de estados verde tangencia a circunferência verde e retorna para dentro da região verde.

É preciso salientar, no entanto, que o modelo matemático adotado não prevê que um veículo da via possa tomar uma ação demasiadamente brusca de tal maneira que a condição de barreira seja violada. Porém, no trânsito uma situação como essa é normal, basta que o veículo *target* realize uma frenagem severa na estrada.

Para ilustrar a influência da escolha do parâmetro, a seguir são mostradas três simulações utilizando o diagrama de simulação em MATLAB/Simulink mostrado na Figura 25. Os parâmetros adotados para malha ULC (vide capítulo 2) são os da tabela 3 exceto pelo γ alterado em cada simulação conforme as legendas das Figuras 13, 14 e 15. Os demais parâmetros relacionados a malha LLC (vide capítulo 3) utilizados para as

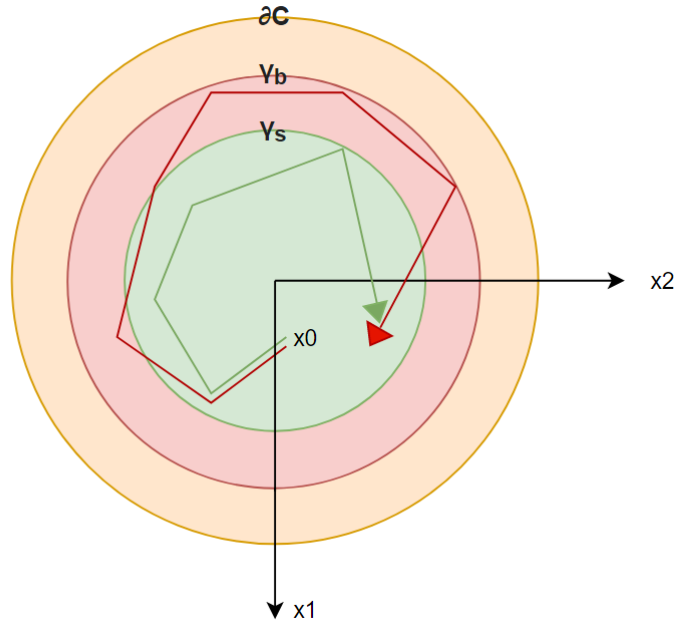


Figura 12: Efeito da escolha de γ : γ_b (grande) e γ_s (pequeno). Fonte: autores

simulações são agrupados na tabela 4.

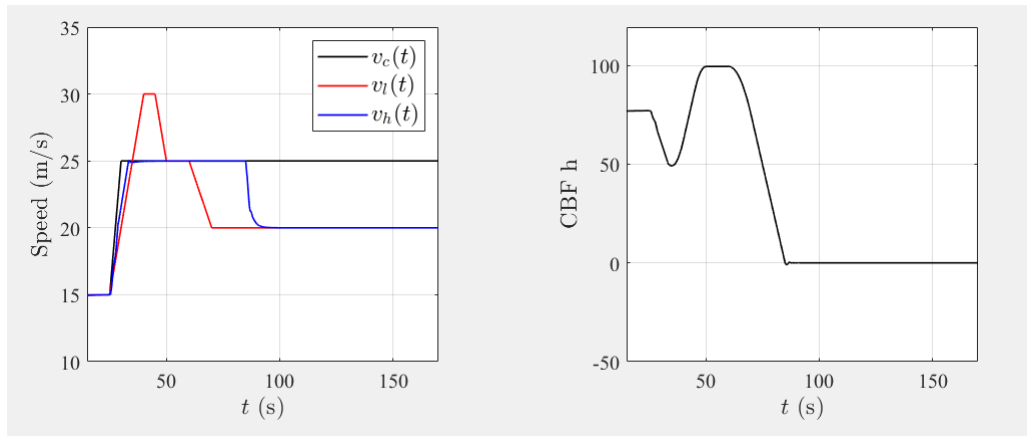


Figura 13: Simulação com $\gamma = 10$ e demais parâmetros fixados

Analisando as Figuras 13, 14 e 15, conclui-se que existe um *trade-off* na escolha do valor do parâmetro γ entre segurança e desempenho do rastreamento da velocidade de cruzeiro. Se γ é pequeno, então situações adversas do tráfego são menos propícias a causar uma situação de $h < 0$, isto é, desrespeitar a condição de segurança descrita pela barreira. Todavia, a quantidade de tempo em que o sistema segue a referência de velocidade de cruzeiro diminui por conta da severidade da restrição de segurança. Se γ é grande, então o inverso ocorre.

Note que para $\gamma = 10$ a condição da barreira é desrespeitada por alguns segundos. Isso ocorre, pois o modelo do sistema adotado não prevê frenagens bruscas do veículo *target*.

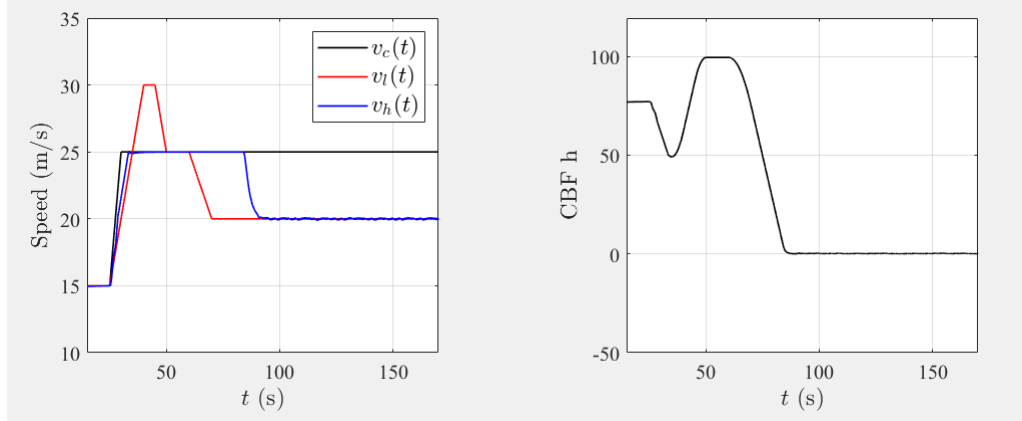


Figura 14: Simulação com $\gamma = 1$ e demais parâmetros fixados

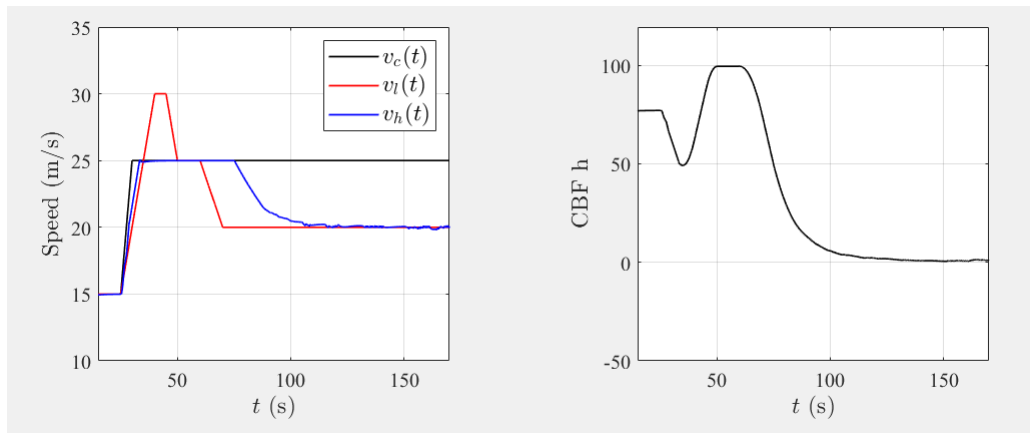


Figura 15: Simulação com $\gamma = 0.1$ e demais parâmetros fixados

Melhorar o modelo adotado não é viável e nem suficiente, pois as possibilidades do que pode ocorrer na prática são infinitas, ou seja, é impossível modelar todas as possibilidades. E mais do que isso, é preciso enfatizar que sistemas de engenharia são desenhados para um dado escopo de aplicação. No caso de uma frenagem excessivamente brusca, o ACC não mais se aplica e é necessário que outro sistema ADAS, no caso um freio de emergência, assuma o comando do veículo. É importante também frisar que o ACC é um sistema ADAS de nível 1, isto é, que requer atenção e intervenção do motorista sempre que ele julgar necessário em situações adversas.

- Regra geral: quanto menor o γ maiores são as chances do sistema respeitar a condição de segurança sem sair do ACC ou exigir intervenções humanas e provavelmente menor será o tempo em que o sistema se mantém no *setpoint* desejado, isto é, na velocidade de cruzeiro.

Em suma, se fazem necessários alguns testes para encontrar um valor de γ adequado e por esse motivo, a utilização de simulações mais realistas se justifica como parte impor-

tante da sintonia do controlador. Uma alternativa para os testes é considerar o protocolo de testes Euro NCAP introduzido no capítulo

2.4 Controlador CLF-CBF

Nessa seção serão apresentados o equacionamento, projeto e simulações em MATLAB.

2.4.1 Equacionamento

A partir da CLF e CBF descritas nas seções 2.2 e 2.3 respectivamente, a QP é utilizada para unir os dois objetivos de controle e realizar a arbitragem entre os requisitos de desempenho e segurança. Baseado no *framework* proposto por Ames et al. [5], a QP busca minimizar o seguinte esforço de controle:

$$u^*(x) = \min_{\mathbf{u}=(u,\delta) \in \mathbb{R}^{m+1} \times \mathbb{R}} = \frac{1}{2}u^T H(x)u + F(x)^T u \quad (2.26)$$

$$\begin{cases} s.a. \\ L_f V(x) + L_g V(x)u + c_V V(x) - \delta \leq 0 \\ L_f h(x) + L_g h(x)u + \alpha_h(h(x)) \geq 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

sendo

- $H(x) \in \mathbb{R}^{(m+1) \times (m+1)}$
- $F(x) \in \mathbb{R}^{m+1}$
- $\alpha_h(h(x)) = \gamma h(x)$

Matricialmente, as restrições podem ser expressas por:

$$\begin{cases} s.t. \\ A_{clf}u \leq b_{clf} \\ A_{cbf}u \leq b_{cbf} \end{cases} \quad (2.28)$$

sendo

- $A_{clf} = [L_g V(x), -1]$
- $b_{clf} = -L_f V(x) - c_V V(x)$
- $A_{cbf} = [-L_g h(x), 0]$
- $b_{cbf} = L_f h(x) + \gamma h(x)$

A partir de $f(x)$ e $g(x)$ definidos na equação 1.3, além de $V(x)$ em 2.11 e $h(x)$ em 2.24, tem-se que:

- $A_{clf} = [2(v_h - v_d), -1]$
- $b_{clf} = \frac{-2F_r(v_d - v_h)}{M} - c_V(v_h - v_d)^2$
- $A_{cbf} = [-Td, 0]$
- $b_{cbf} = (v_l - v_h + \frac{F_r \cdot Td}{M}) + \gamma(D - Td \cdot v_h)$

Um possível incremento neste equacionamento é considerar que a aceleração/desaceleração é limitada a uma dada fração da gravidade g , pois um dos requisitos é a questão do conforto como descrito na seção 1.3.3. Deste modo, o esforço de controle u ficará limitado na seguinte região $U_{acc} := [-a_f \times g, a'_f \times g]$. Matricialmente, tem-se que:

$$A_{ac-lim} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, b_{ac-lim} = \begin{bmatrix} a'_f \cdot g \\ a_f \cdot g \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Assim, as restrições da programação quadrática na equação 2.28 passa a ser:

$$\left\{ \begin{array}{l} s.t. \\ A_{clf}u \leq b_{clf} \\ A_{cbf}u \leq b_{cbf} \\ A_{ac-lim}u \leq b_{ac-lim} \end{array} \right. \quad (2.30)$$

As matrizes H e F podem ser expressas, conforme o modelo matemático descrito na seção 1.5, segundo a equação 2.31, considerando p_{sc} o peso da relaxação δ como descrito em Ames et al. (2017) [5].

$$H = 2 \begin{bmatrix} \frac{1}{M^2} & 0 \\ 0 & p_{sc} \end{bmatrix}, F = -2 \begin{bmatrix} \frac{F_r}{M^2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

2.4.2 Projeto

Definido o equacionamento na seção 2.4.1, nesta seção são apresentados parâmetros iniciais do problema e do controle proposto em Ames et al. (2017) [5], resumidos na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros Iniciais do Problema e do Projeto

| | |
|----------|--------------------------------------|
| M | 1650 kg |
| f_0 | 0.1 N |
| f_1 | 5 Ns/m |
| f_2 | 0.25 Ns ² /m ² |
| v_0 | 18 m/s |
| v_d | 22 m/s |
| g | 9.81 m/s ² |
| p_{sc} | 10 ² |
| a_f' | 0.25 |
| a_f | 0.25 |
| c_V | 10 |
| γ | 1 |

Para resolver a QP é possível fazê-la via função `quadprog` do MATLAB, no entanto, C. Hildreth (1957) [11] propôs um algoritmo que apresenta boa performance e interessante tempo de execução para aplicações embarcadas. Neste trabalho a opção pelo algoritmo de Hildreth será escolhida em virtude do ganho no tempo de execução.

2.4.3 Simulações

A partir dos equacionamentos propostos e os parâmetros iniciais de projeto, tendo como base o trabalho de Ames et al. [5], gerou-se uma simulação no software MATLAB para avaliar o desempenho do sistema ACC, tanto em termos de rastreabilidade da velocidade de cruzeiro quanto em segurança/conforto do motorista.

A primeira simulação a se analisar tem como foco o gráfico de velocidades, tanto do veículo controlado (v_f - *host*), quanto do veículo à frente (v_l - *lead/target*), que se encontra na Figura 16.

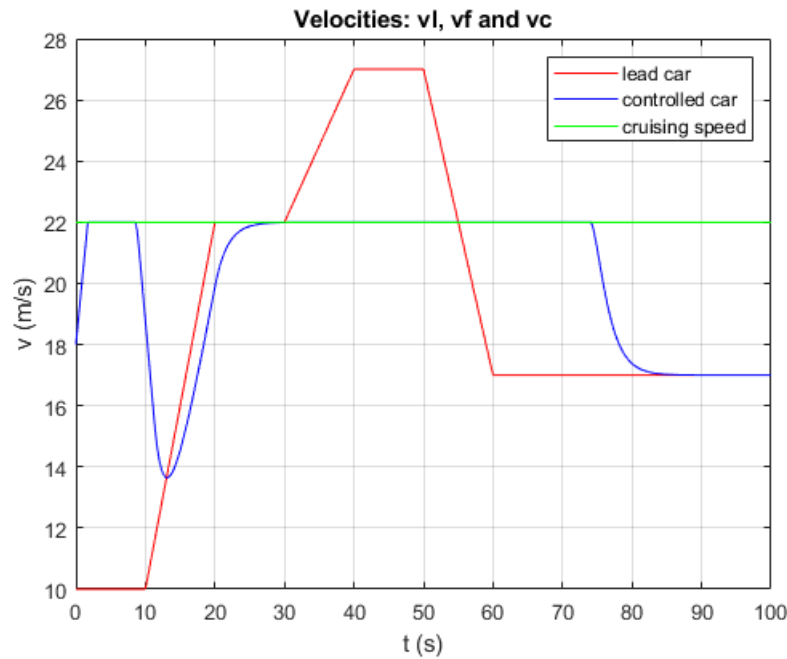


Figura 16: Simulação do laço ULC - Velocidades

Do gráfico nota-se que a velocidade de cruzeiro está configurada em 22 m/s (≈ 80 km/h), a distância inicial entre os veículos é de 150 metros, com o veículo *host* inicialmente com 18 m/s e o *lead* com 10 m/s. Como é possível observar, no começo da simulação o veículo *host* rapidamente atinge o *setpoint* desejado, mas por se aproximar do veículo *lead* precisa reduzir sua velocidade em torno de 10s para garantir a segurança do motorista. Entre 30 e 50 segundos, o veículo *lead* está com uma velocidade bem superior ao do veículo *host*, logo, este consegue rastrear o *setpoint* por um intervalo de tempo considerável, passando a reduzir novamente só em torno de 75s, pois o veículo *lead* reduziu em 50s e, assim, a distância relativa entre ambos também diminuiu, representando um estado de alerta para evitar a colisão.

Como descrito na seção 2.3, a função de barreira definida na equação 2.24 envolve tanto a distância relativa entre os veículos (D), quanto um desconto de segurança envolvendo a distância percorrida atrelada ao tempo de resposta humana e da dinâmica de freio τ_d . O gráfico dessa função de barreira é indicado na Figura 17 e com ela é possível visualizar os instantes em que o sistema de ACC agiu para evitar colisão.

Do gráfico acima, nota-se que de 10 a 30 segundos, $h(x)$ é aproximadamente 0, o que indica que os veículos estão próximos e, assim, a ação de reduzir a velocidade do veículo *host* como ilustrado na Figura 16. De 30 a 75 segundos, a função de barreira está positiva e bem longe do zero, então o sistema de ACC prioriza a rastreabilidade do *setpoint* de velocidade de cruzeiro, visto que é um contexto seguro. A partir de 75 s, os veículos

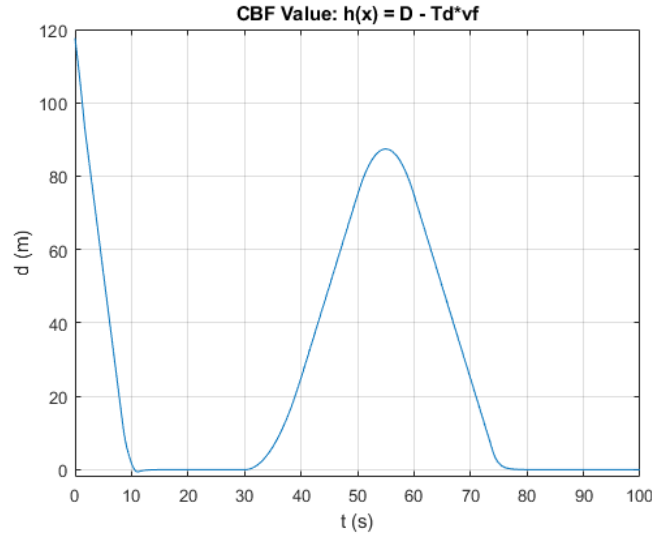


Figura 17: Simulação do laço ULC - CBF

voltam a ficar próximos, logo, o ACC prioriza a segurança para evitar colisão.

Diante desse contexto de aceleração e desaceleração, uma das restrições da programação quadrática é justamente propiciar o conforto do motorista, como explicado na seção 1.3.3. Deste modo, o esforço de controle u fica limitado em uma região $U_{acc} := [-a_f \times g, a'_f \times g]$, que se traduz em aceleração máxima de $2.5m/s^2$ e desaceleração máxima de $-2.5m/s^2$, conforme ilustrado na Figura 18:

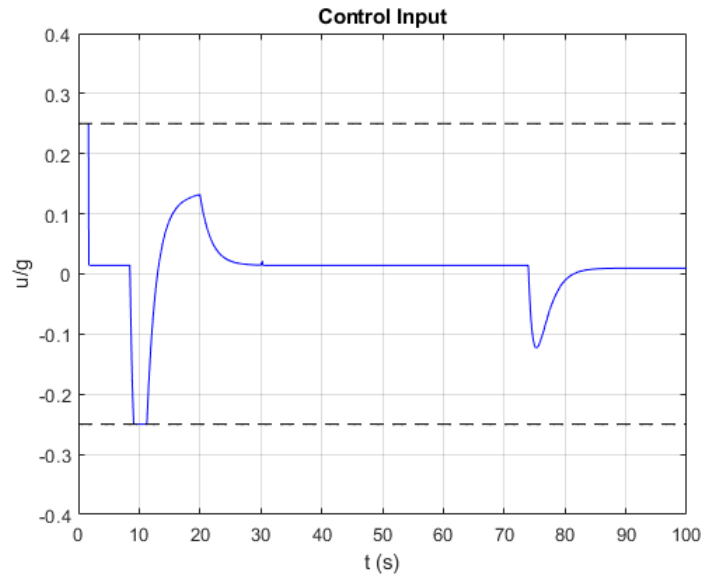


Figura 18: Simulação do laço ULC - Esforço de Controle

Como é possível observar, através da malha externa projetada atingiram-se os requisitos de projeto desejados, isto é, estabilidade, desempenho, segurança e conforto.

3 LAÇO LLC - MALHA INTERNA

3.1 Ponto de vista de projeto

Conforme explicado na seção 2.1, o problema do ACC foi dividido em duas vertentes, uma focada em atender os requisitos de projeto (estabilidade, desempenho, segurança e conforto) e outra focada em lidar com a complexidade da planta, sendo essa última vertente associada à Malha Interna (laço LLC) do controle em cascata proposto.

Tendo como referência a Figura 2, o laço ULC envia uma aceleração de referência para o laço LLC, enquanto esse compara a referência com a aceleração real do veículo, de tal forma a imprimir o esforço de controle necessário para atender os requisitos.

Neste momento de projeto será utilizado um modelo mais sofisticado para o veículo, ou seja, a planta não é mais o modelo apresentado na seção 1.5, mas sim um modelo mais complexo. Na biblioteca do MATLAB/Simulink encontram-se as funcionalidades para se construir um modelo mais completo para o veículo e seu diagrama é apresentado na Figura 19:

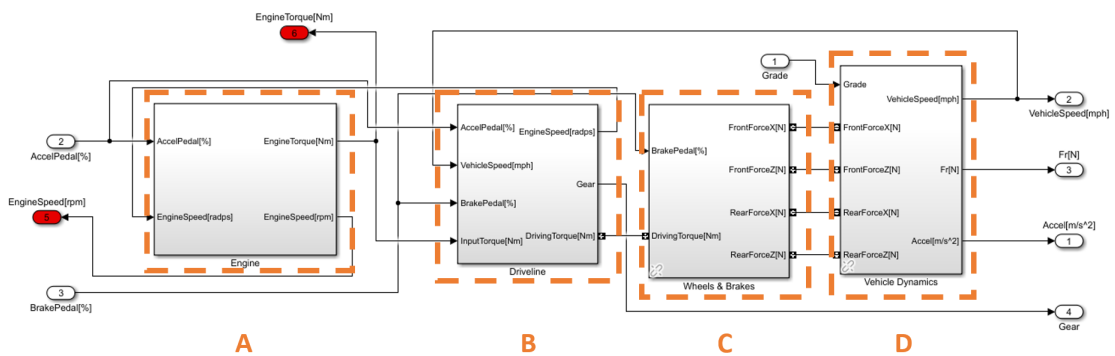


Figura 19: Diagrama de Simulação - modelo mais realista para o veículo. Fonte: LCA.

O modelo apresentado na Figura 19 conta com blocos para o motor, sistema de transmissão, rodas/freio, marchas, dinâmicas não modeladas, entre outras características, cujo maior detalhamento dos blocos será mostrado posteriormente.

O bloco **A** consiste no modelo do motor de combustão, cuja versão expandida é mostrada na Figura 20:

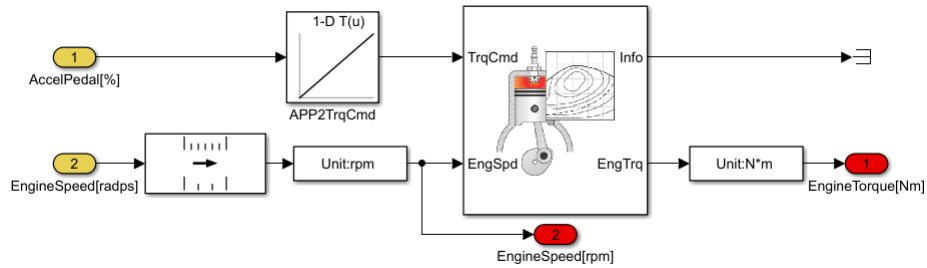


Figura 20: Diagrama de Simulação - motor de combustão. Fonte: LCA

O bloco **B** consiste no modelo do sistema de transmissão, cuja versão expandida é mostrada na Figura 21:

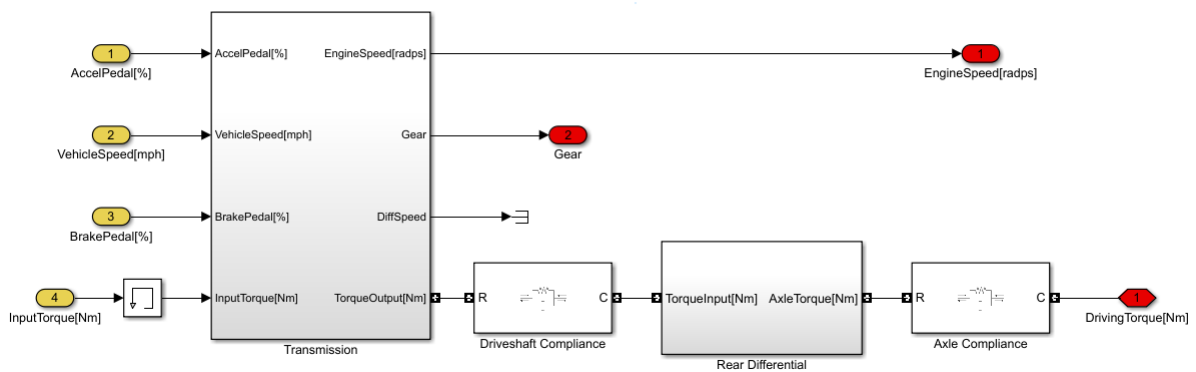


Figura 21: Diagrama de Simulação - sistema de transmissão. Fonte: LCA

O bloco **C** consiste no modelo das rodas e freios, cuja versão expandida é mostrada na Figura 22:

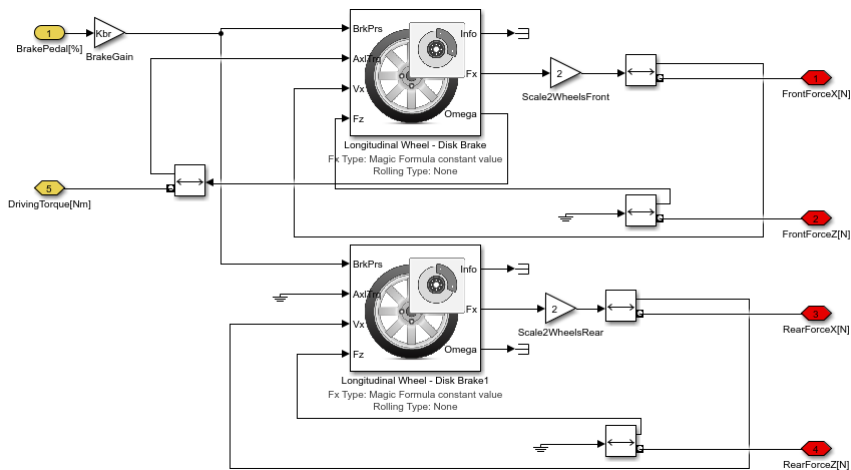


Figura 22: Diagrama de Simulação - modelo das rodas e freios. Fonte: LCA

O bloco **D** consiste em um modelo para a dinâmica externa do veículo, cuja versão expandida é mostrada na Figura 23:

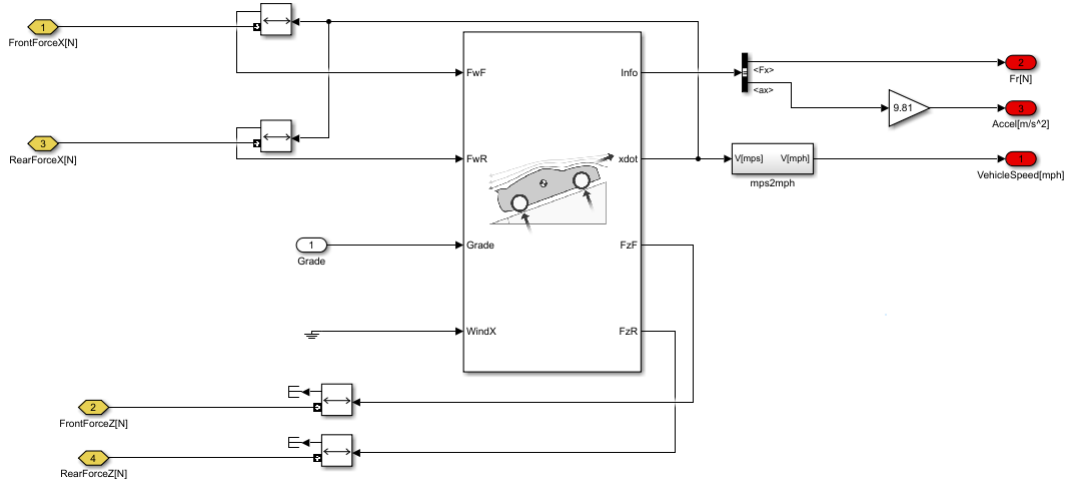


Figura 23: Diagrama de Simulação - modelo da dinâmica externa do veículo. Fonte: LCA

Dada essa planta mais realista para o problema de ACC, optou-se por utilizar no laço LLC uma técnica denominada *Model-Free Control*, cuja fundamentação e justificativa serão apresentadas na seção 3.2.

3.2 *Model-Free Control*

O *Model-Free Control* é um controle sem modelo, isto é, uma lei de controle capaz de controlar uma planta sem que se conheça seu modelo matemático detalhado.

Conforme M.Files e C. Join [14], o *Model-Free* é um esquema de controle que estabelece um modelo ultra-local da planta, isto é, válido para um pequeno instante de tempo, de tal forma que é possível criar um sinal de controle u que cancele a dinâmica da planta nesse instante e imponha uma dinâmica desejada para o erro de rastreamento de referência. Esse processo de estimação ultra-local é repetido instante a instante de modo que o controle seja válido para todos os instantes de tempo.

A estrutura do controle *Model-Free* pode ser aplicada com qualquer compensador $\mathfrak{C}(e)$ causal. Porém, considerando-se o grande volume de conhecimento existente a respeito de controladores PID e pelo fato dele permitir um rastreamento assintótico da referência, nesse trabalho será considerado um compensador $\mathfrak{C}(e)$ da família PID. Na literatura isso também tem sido referenciado como iPID (*intelligent Proportional Integral and Derivative*) como descrito em M.Files e C. Join [14].

3.2.1 Formulação

Um modelo ultra-local do modelo matemático “real” pode ser escrito como

$$y^{(\nu)} = \Phi + \alpha u \quad (3.1)$$

Em que

- $y^{(\nu)}$ é ν – ésima derivada da saída y do sistema SISO que se deseja controlar. $\nu \in \mathbb{Z}, \nu \geq 1$ é um parâmetro empírico que deve ser escolhido pelo projetista.
- $\alpha \in \mathbb{R}$ é um parâmetro de que deve ser ajustado pelo projetista. Conforme discutido em M.Files e C. Join [14] é recomendado que $y^{(\nu)}$ e αu tenham a mesma magnitude.
- Φ é uma função constante por partes que modela não linearidades, variância no tempo e perturbações do sistema real em um dado instante de tempo.

Essa função Φ é o que torna o *Model-Free* vantajoso para aplicações práticas, pois qualquer efeito não linear e/ou variante no tempo é modelado em uma constante de tal maneira que um controle LIT (Linear Invariante no Tempo) é capaz de impor uma dinâmica desejada para o erro de rastreamento mesmo sob circunstâncias bastantes adversas à hipótese LIT. Além disso, o Φ modela inclusive o erro que se pode cometer na escolha do parâmetro α , de tal maneira que o *Model-Free* é pouco sensível a uma escolha “não ótima” de α .

O sinal de controle u na estrutura *Model-Free* é calculado da seguinte maneira

$$u = -\frac{\Phi - y^{(\nu)*} - \mathfrak{C}(e)}{\alpha} \quad (3.2)$$

em que

- y^* é a referência que se deseja rastrear
- $e = y^* - y$ é o erro de rastreamento

E dessa maneira, aplicando-se o controle 3.2 no modelo ultra-local 3.1, tem-se que

$$\begin{aligned}
y^{(\nu)} &= \Phi + \alpha u \\
y^{(\nu)} &= \Phi + \alpha \left(-\frac{\Phi - y^{(\nu)*} - \mathfrak{C}(e)}{\alpha} \right) \\
y^{(\nu)} &= \Phi + (-\Phi + y^{(\nu)*} + \mathfrak{C}(e)) \\
y^{(\nu)} &= +y^{(\nu)*} + \mathfrak{C}(e) \\
-\mathfrak{C}(e) &= y^{(\nu)*} - y^{(\nu)}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Em que a última equação pode ser reescrita considerando-se $\mathfrak{C}(e)$ pertencente a família PID como:

$$K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} = -y^{(\nu)*} + y^{(\nu)} \tag{3.4}$$

Note que a vantagem do *Model-Free* é que foi possível eliminar da equação 3.4 as não-linearidades e qualquer variância no tempo considerada na função Φ e impor um PID que dita a dinâmica do erro. Ou seja, o PID ocupa-se somente de reger o comportamento do erro mesmo a planta não satisfazendo as hipóteses clássicas de controle LIT.

3.2.2 Dedução do estimador da função Φ

Considerando-se o método de dedução do estimador $\hat{\Phi}$ de Φ baseado em polinômios de Laurent e Cálculo Operacional mostrado em M.Files e C. Join [14], para um modelo ultra-local da forma 3.1 tem-se a seguinte dedução. Pelo princípio da equivalência a certeza, utiliza-se doravante a função Φ no lugar de seu estimador. E, como sugerido na subsecção 3.2.3 considera-se $\nu = 1$.

Seja $\Phi + \alpha u(t)$ um estimador algébrico de $\dot{y}(t)$, em que α é constante, u é um funcional de $y(t)$ e Φ é uma função constante por partes. Note que $\dot{y}(t)$ é a derivada de y , mas está sendo calculado por uma função afim de u , por isso a denominação “algébrico”. Transformando em Laplace a equação 3.1 tem-se (considerando-se $\Phi = \Phi \times \text{heaviside}(t)$) e $y(0^-) = y_{0-}$ a equação 3.5.

$$\begin{aligned}
\dot{y}(t) &= \Phi + \alpha u(t) \\
sY(s) + y_{0-} &= \frac{\Phi}{s} + \alpha U(s)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Aplicando-se o operador $\frac{d}{ds}$ para eliminar y_{0-} resulta na equação 3.6.

$$Y(s) + s \frac{dY(s)}{ds} = -s^{-2}\Phi + \alpha \frac{dU(s)}{ds} \quad (3.6)$$

Para que o estimador seja robusto aos ruídos mencionados na subsecção 3.2.5 é necessário eliminar os termos em s que implicam em derivadas que são muito sensíveis a ruídos. Nesse caso, para conseguir isso, basta multiplicar ambos os lados da equação 3.6 por $\frac{1}{s^2}$ resultando em 3.7.

$$\underbrace{\frac{1}{s^2}Y(s)}_{p_1} + \underbrace{\frac{1}{s} \frac{d}{ds}Y(s)}_{p_2} = \underbrace{-\Phi \frac{1}{s^4}}_{p_3} + \underbrace{\alpha \frac{1}{s^2} \frac{d}{ds}U(s)}_{p_4} \quad (3.7)$$

Considerando-se as seguintes relações de anti-transformadas de Laplace

$$A : \frac{c}{s^\alpha}, \alpha \geq 1, c \in \mathbb{C} \leftrightarrow C \frac{t^{\alpha-1}}{(\alpha-1)!}$$

$$B : \frac{1}{s^\alpha} \frac{d^n Y(s)}{ds^n} \leftrightarrow \frac{(-1)^n}{(\alpha-1)!} \int_0^t (t-\tau)^{\alpha-1} \tau^n y(\tau) d\tau$$

E aplicando-se na equação 3.7 a relação “A” na parcela (p3) e a relação “B” nas parcelas (p1,p2,p4) chega-se finalmente a seguinte formulação para Φ mostrada na equação 3.8

$$\Phi = -\frac{6}{t^3} \int_0^t (t-2\tau)y(\tau) d\tau - \frac{6\alpha}{t^3} \int_0^t (t\tau - \tau^2)u(\tau) d\tau \quad (3.8)$$

que é facilmente implementável em controladores digitais se Φ for calculado com t variando em $t \in [0, T]$ em que $T = N \times T_s$ é a janela de tempo necessária para se obter um valor ultra-local de Φ sendo T_s o período de amostragem do controle discreto e N o número de períodos considerados. Note que como Φ é calculado por integrais, é fácil ver que o estimador também é um filtro para ruídos que possam estar contidos na medida do sinal $y(t)$.

No computador, as integrais da equação 3.8 podem ser calculadas de maneira satisfatória conforme a equação 3.9.

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{T_s}{2} (f(t_0) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} f(t_i) + f(t_N)) \quad (3.9)$$

3.2.3 Parâmetros do Projeto de Controle

O projeto consiste em escolher os parâmetros ν , α , N e a lei de controle $\mathfrak{C}(e)$. A escolha desses parâmetros e da lei de controle é empírica, porém pela experiência de projeto adquirida até o momento e considerando-se as referências [7, 14, 15], apresenta-se a seguir algumas sugestões para essas escolhas.

3.2.3.1 Parâmetro ν

A experiência prática adquirida no LCA, citada formalmente em [15], indica que para sistemas mecânicos considerar $\nu = 2$ é uma boa escolha quando se deseja rastrear uma posição. Porém, no caso do ACC em que se deseja rastrear uma velocidade, a escolha $\nu = 1$ é mais adequada.

3.2.3.2 Parâmetro α

Esse parâmetro deve ser empiricamente escolhido. Porém, uma dica inicial de escolha é citada na subseção 3.2.1. Para escolha desse parâmetro é recomendado um simulador de alta fidelidade ou um protótipo físico para a realização de testes. Se o parâmetro α escolhido é muito menor do que α^* , o cancelamento entre o α do controle e o α^* da planta é imperfeito e sobra um resíduo $\frac{\alpha^*}{\alpha} > 1$ e os ganhos da lei de controle $\mathfrak{C}(e)$ são aumentados, tornando o controle mais agressivo do que o desejado. Caso α seja escolhido muito maior do que α^* , então $\frac{\alpha^*}{\alpha} < 1$ e a dinâmica projetada em $\mathfrak{C}(e)$ será atenuada, resultando em um controle com uma dinâmica mais lenta do que a desejada.

3.2.4 Parâmetro N

Como o Φ é estimado em função de uma integral que depende de N amostras do sinal de saída $y(t)$ como mostrado na equação 3.8 deve-se escolher também um N para o projeto do *Model-Free*. Se N é muito pequeno, o filtro integrativo da equação 3.8 é pouco efetivo. Porém, se N é demasiadamente grande, então a hipótese de modelo ultra local pode ser perdida e o valor real de Φ se alterar enquanto o controle está tentando gerar uma estimativa de Φ .

3.2.4.1 Lei de controle $\mathfrak{C}(e)$

Essa lei de controle deve ser causal, isto é, ser não antecipatória. E deve anular o erro de rastreamento assintoticamente. Considerando-se o equacionamento 3.3

$$e^{(\nu)} - \mathfrak{C}(e) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$$

3.2.5 Vantagens do controle *Model-Free* segundo a literatura

Consoante os argumentos apresentados em M.Files e C. Join [14], esse esquema de controle é robusto em relação a ruídos que possam interferir na identificação ultra-local de Φ , dado α , e é implementável de maneira simples.

Além disso, também de acordo com M.Files e C. Join [14], o *Model-Free* com a lei de controle $\mathfrak{C}(e)$ pertencendo à família PID é capaz de apresentar bons resultados mesmo para sistemas que apresentem características desafiadoras para um controlador dessa família, desenvolvido para plantas supostas LIT. São apresentados também em M.Files e C. Join [14] alguns resultados de simulação para sistemas variantes no tempo, sistemas não-lineares, sistemas apenas parcialmente conhecidos, sistemas com *delay* variante no tempo e sistemas com um zero de fase não mínima. Para todos esses exemplos, o controle *Model-Free* consegue controlar bem os sistemas propostos.

Na literatura também são encontrados outros exemplos de aplicações bem sucedidas. Polack et al. (2019) [7] utilizou controle *Model-Free* para lidar com os pedais de acelerador e freio de um veículo real. Neves and Angélico (2022) [15] usaram controle *Model-Free* em um pêndulo invertido com roda de reação e em um helicóptero com dois graus de liberdade.

Deve-se adicionar uma ressalva e considerar que a utilização do controle *Model-Free* implica na necessidade de se estimar o Φ em um curto período, mas com um número razoável de amostras. Sendo assim, se há uma limitação na frequência de amostragem do hardware utilizado, então talvez não seja possível utilizar esse controle. No caso da dinâmica veicular, o emprego do *Model-Free* não é um problema, pois essa dinâmica não é considerada excessivamente rápida em face do *clock* das ECUs (*Electronic Control Unit*) normalmente utilizadas.

3.2.6 Implementação do controle *Model-Free* no laço LLC

Conforme apresentado em 3.1, a planta mais realista apresenta tanto acelerador quanto freio. O laço ULC envia uma referência de aceleração ao laço LLC e dependendo do sinal da referência será acionado o pedal do acelerador ou freio. Em síntese, a referência $a_{h,d}$ (ou **Ref_accel** na Figura 24) corresponde aos acionamentos do acelerador (caso $a_{h,d} > 0$) e do freio (caso $a_{h,d} < 0$).

Deste modo, foram criados dois controles *Model-Free* Proporcional, um para o acelerador e outro para o freio, cuja diagrama de Simulink é mostrado na Figura 24.

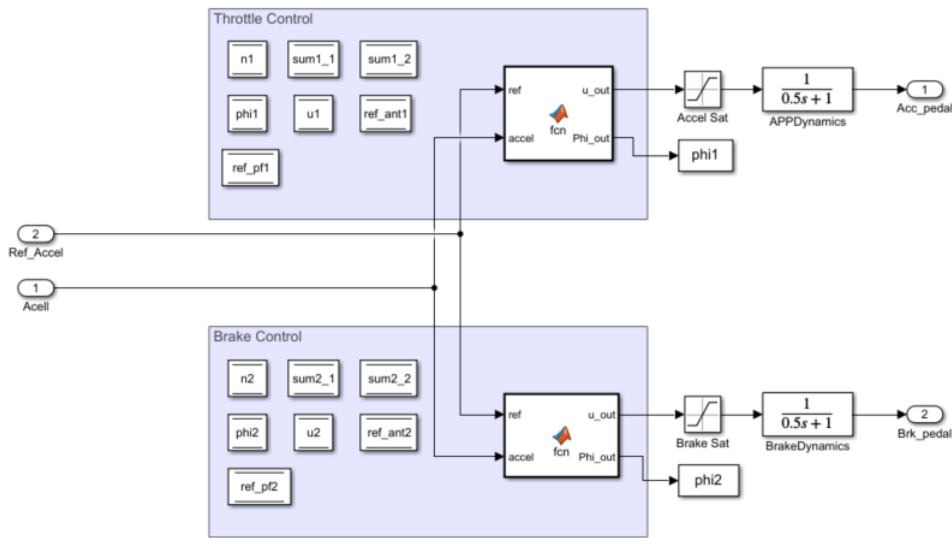


Figura 24: Simulink do controle iP (*Model-Free*) Proporcional. Fonte: LCA

As “*MATLAB Functions*” indicadas na Figura 24 implementam todo o equacionamento expresso nas seções 3.2.1 e 3.2.2, tendo destaque principal para as equações 3.1, 3.2 e 3.8.

3.2.7 Projeto

Apresenta-se na tabela 4 de parâmetros e valores ajustados inicialmente para as simulações que envolvem a malha interna LCC.

3.2.8 Ajuste do parâmetro α

O parâmetro α como mostrado estabelece a relação entre o esforço de controle e a ν -ésima derivada da variável controlada.

Tabela 4: Parâmetros Iniciais do Problema e do Projeto

| | |
|------------------|--------|
| T_s | 0.02 s |
| $k_{p_{accel}}$ | 0.6 |
| α_{accel} | 0.005 |
| N_{accel} | 50 |
| $k_{p_{break}}$ | 10 |
| α_{break} | 0.1 |
| N_{break} | 50 |

Retomando a equação 3.1

$$y^{(\nu)} = \Phi + \alpha u \quad (3.10)$$

repetida em 3.10 por facilidade de leitura, observa-se que a unidade de *alpha* é

$$[\alpha] = \frac{[y^{(\nu)}]}{[u]}$$

A título de exemplo, aplicação automotiva pretendida nesse relatório tem-se para o freio implica nas seguintes unidades de α do controle *Model-Free*:

$$[\alpha] = \frac{[y^{(\nu)}]}{[u]} = \frac{[\text{m/s}^2]}{[\text{MPa}]}$$

O esforço de controle é uma pressão do freio em MPa e a variável controlada é a aceleração do centro de massa do veículo em m/s^2 . Utilizando-se esse exemplo, ilustra-se a seguir um procedimento recomendado para se ajustar um $\hat{\alpha} \approx \alpha$.

Como não é necessário acertar o α com grande precisão, basta introduzir um degrau no esforço de controle em MPa e observar o valor de regime estacionário da aceleração do centro de massa do veículo. A relação a seguir obtida com essa excitação degrau resultam o ganho $\hat{\alpha}$ a ser utilizado no controle *Model-Free* do freio.

$$\alpha = \frac{y^{(\nu)} [\text{m/s}^2]}{u [\text{MPa}]}$$

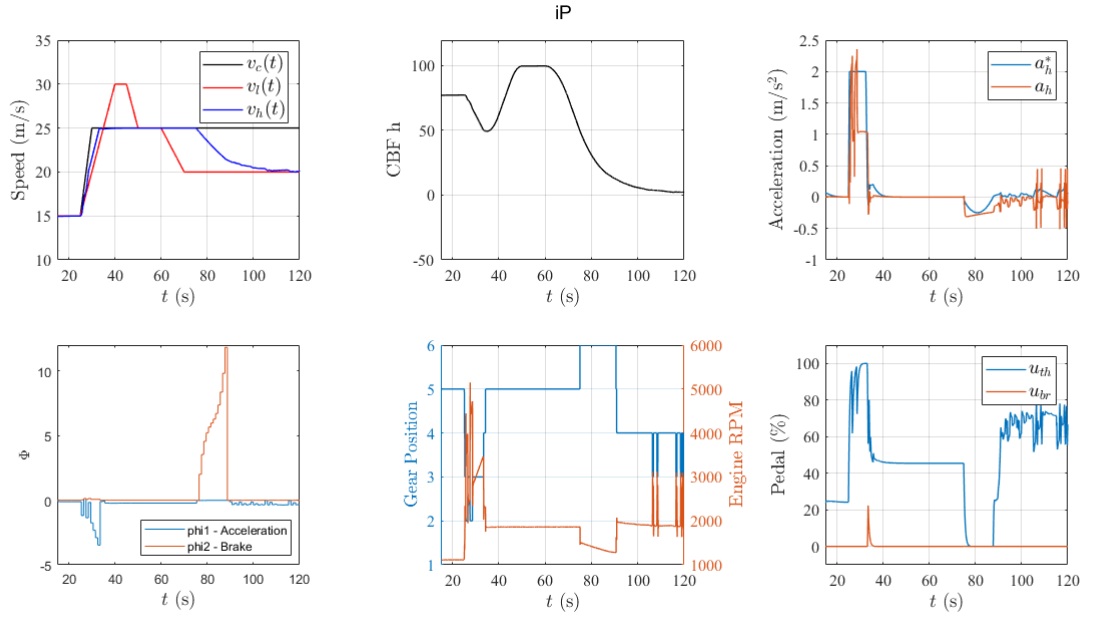


Figura 26: Simulação dos controles ULC e LLC considerando controle iP

Na Figura 26 é mostrado um *dashboard* contendo os sinais adquiridos com a simulação do sistema com controle iP. Da esquerda para a direita, de cima para baixo, têm-se os seguintes gráficos:

- **1) velocidade:** resultado semelhante àquele obtido na seção 2, ou seja, cumprimento dos requisitos de rastreabilidade e segurança;
- **2) função de barreira:** sempre positiva, indicando que a distância entre os veículos é sempre segura;
- **3) acelerações de referência e performada:** para garantir conforto ao motorista, a aceleração e desaceleração máximas foram definidas no intervalo $[-2.0; 2.0]$, no entanto, no gráfico da aceleração propriamente dita há **spikes** em virtude da mudança de marcha e sobressinal;
- **4) Parâmetro Φ do *Model-Free* (acelerador e freio):** destaque para a diferença de magnitude dos parâmetros quando se trata de acelerador e freio;
- **5) marcha do câmbio e rotação do motor:** os instantes onde ocorre mudança de marcha representa mudança da planta;
- **6) atuação dos pedais de aceleração e freio:** maior utilização do pedal acelerador.

3.3 *Model-Free* Modificado (iP modificado)

A partir dos resultados obtidos na seção 3.2.9, é importante destacar o gráfico da estimação do parâmetro Φ , que será retomado na Figura 27.

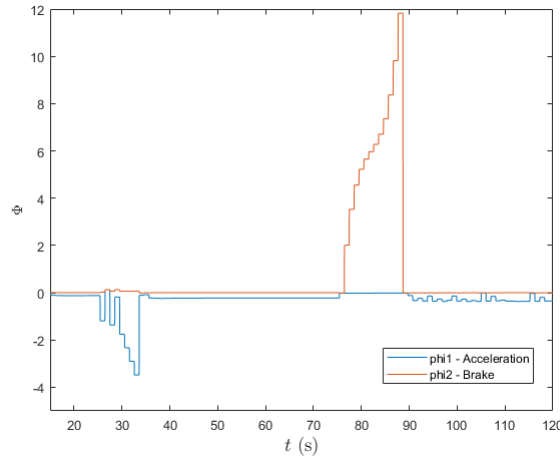


Figura 27: Controle iP - gráfico de estimação do Φ

É possível notar que a estimação e atualização do parâmetro Φ apresenta descontinuidades, pois o cálculo partir da equação 3.8 foi realizada com uma janela fixa de $N = 50$ amostras. Em outras palavras, para cada Φ são consideradas janelas distintas de $N = 50$ amostras, logo, devido à mudança brusca das amostras selecionadas, a curva do gráfico do parâmetro apresenta descontinuidades. A Figura 28 ilustra tal cenário.

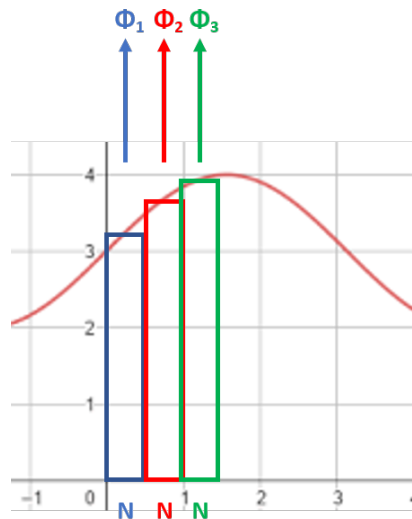


Figura 28: Cálculo de Φ através de janela fixa. Fonte: autores

Pensou-se então na possibilidade de tornar a estimação do parâmetro Φ mais contínua, isto é, sem as descontinuidades oriundas do janelamento anteriormente adotado e observar

se o desempenho de controle tende a melhorar. Para isso, utilizou-se uma estrutura FIR (*Finite Impulse Response*) para calcular o parâmetro Φ , de tal modo que a janela de amostras não é mais fixa, mas sim móvel. A Figura 29 ilustra esse novo cenário.

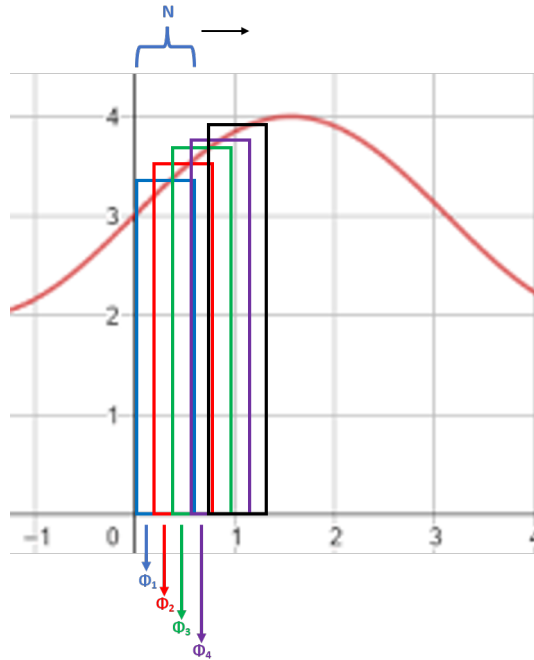


Figura 29: Cálculo de Φ através de janela móvel. Fonte: autores

Como é possível ver da Figura 29 são feitas mais estimações de Φ para a mesma janela de tamanho N , logo, a curva de estimação tende a ser mais contínua e o controle mais adaptado às mudanças de comportamento da função de interesse.

A partir das mesmas condições de simulação apresentadas na seção 3.2.9, mas agora considerando janela de tamanho $N = 250$ para o cálculo de Φ , os resultados são ilustrados na Figura 30:

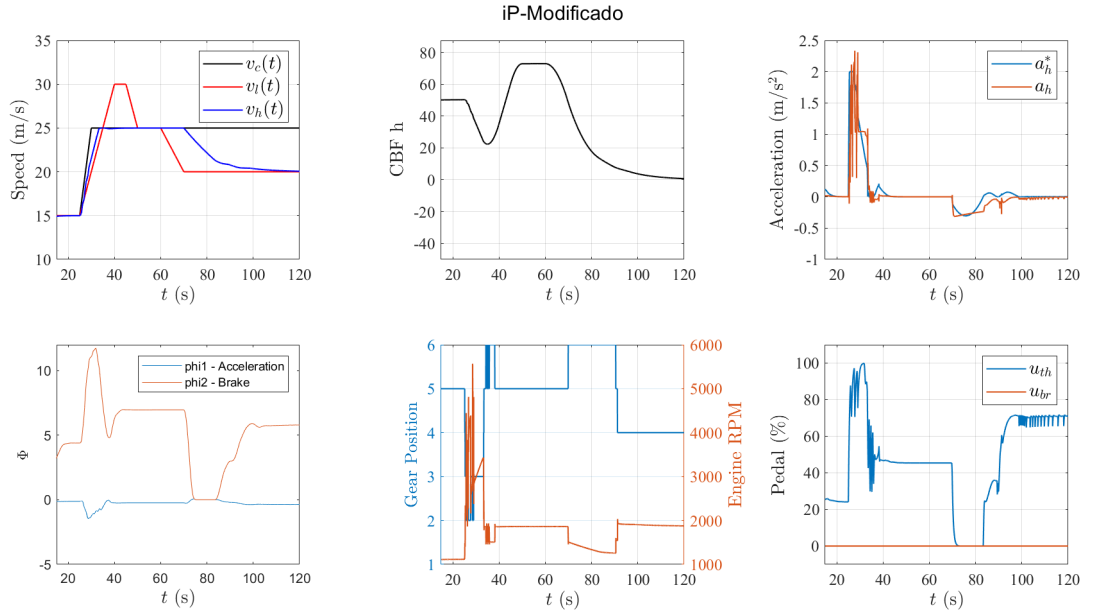


Figura 30: Simulação dos controles ULC e LLC considerando controle iP modificado

A partir dos gráficos é possível notar que a estimação de Φ se tornou mais contínua, deixando menos brusca a ação nos pedais do acelerador e freio. No entanto, percebeu-se que a mudança de marcha ficou mais brusca próximo dos 40s.

3.4 Controle PI

O controlador PI é um controlador cujo ajuste não necessita de modelo. O que se faz é escolher os valores de K_p do ganho proporcional e de K_i do ganho integral com base em métodos empíricos como aqueles ilustrados no capítulo 8 do livro Garcia C. (2017) [16].

Aqui, entretanto, será adotado um critério diferente de sintonia. Conforme mostrado em M.Files e C. Join [14] existe uma equivalência direta entre o controlador PI e iP com $\mathfrak{C}(e) = K_p e$ (outro nome para o *Model-Free* utilizando-se controle proporcional). Será utilizada então essa tabela intitulada “Table 1. Correspondence between the gains of sampled classic and intelligent controllers.” da referência M.Files e C. Join [14]. Com isso garante-se que a comparação entre esses controladores possa ser justa e significativa.

Com relação à estrutura apresentada na Figura 31, além dos controladores PI para o acelerador (*throttle*) e freio (*brake*), tem-se a aplicação de um ganho negativo na malha do freio e os saturadores estão limitados no intervalo $[0, 100]$ em %. Sendo assim, se o sinal

que entra no bloco *throttle control* estiver nesse intervalo, o sinal que entra no bloco *brake control* certamente não estará e assim o carro acelera. Caso contrário somente o sinal que entra no *brake control* estará nesse intervalo e nesse caso o carro realiza a frenagem. É importante mencionar que o simulador em MATLAB utilizado modela o efeito do freio motor, isto é, o veículo perde velocidade caso o sinal de aceleração esteja abaixo de um certo patamar.

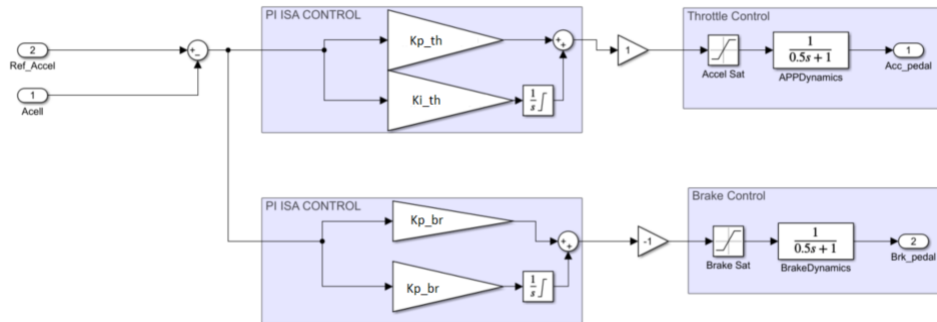


Figura 31: Simulink do controle PI. Fonte: autores

3.5 Comparação dos Controles

Nessa seção são apresentadas diversas comparações de compensadores da família PID com e sem a estrutura *Model-Free* e considerando-se também o *Model-Free* Modificado. A justeza da comparação se dará pelo fato de que existe uma equivalência matemática entre controladores iP e controle PI a ser deduzida na secção 3.5.1. Utilizando-se então os ganhos dos controladores tais que eles sejam equivalentes, tem-se então uma comparação justa entre as diferentes estratégias de controle propostas.

3.5.1 Equivalência entre controladores iP e PI Clássico

Nessa secção a demonstração da equivalência dos controles iP e PI proposta por M.Files e C. Join [14] será refeita e analisada. É importante enfatizar que a comparação é feita considerando-se as componentes lineares de cada controle, isto é, algoritmos de *anti-windup* não são considerados nessa comparação.

3.5.1.1 Controle PI

Considere um controle PI da família PID descrito em tempo contínuo mostrado na equação ??.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(\tau) d\tau \quad (3.11)$$

Em que $e(t)$ é o erro entre o sinal controlado e a referência de controle. E $u(t)$ é o esforço de controle.

Para um sistema em tempo discreto com período de amostragem T_s e considerando-se simplesmente a integral de Riemann como método numérico de integração, tem-se a equação 3.12.

$$I(t) = I(t - T_s) + T_s e(t) \approx \int e(\tau) d\tau \quad (3.12)$$

Considerando-se a equação 3.12, a equação 3.11 de tempo contínuo pode ser discretizada levando a ??.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i I(t - T_s) + k_i T_s e(t) \quad (3.13)$$

que atrasada de um período de amostragem resulta em 3.14

$$u(t - T_s) = k_p e(t - T_s) + k_i I(t - T_s) \quad (3.14)$$

que combinada com a equação 3.13 resulta em ??.

$$u(t) = u(t - T_s) + k_p (e(t) - e(t - T_s)) + k_i T_s e(t) \quad (3.15)$$

3.5.1.2 Controle iP

Reproduzindo a lei de controle *Model-Free* em tempo contínuo mostrada na equação 3.2

$$u(t) = -\frac{-\dot{y}^*(t) + \Phi + K_p e(t)}{\alpha}$$

Definindo-se Φ como

$$\Phi = \dot{y}(t) - \alpha u(t - T_s)$$

Discretizando-se a equação por meio da derivada *backward*

$$\Phi = \frac{y(t) - y(t - T_s)}{T_s} - \alpha u(t - T_s)$$

Substituindo essa definição de Φ na equação 3.2 tem-se, dado que $e(t) = \dot{y}^*(t) - \dot{y}(t)$

$$u(t) = u(t - T_s) + \frac{e(t) - e(t - T_s)}{T_s \alpha} + \frac{K_p}{\alpha} e(t) \quad (3.16)$$

3.5.1.3 Equivalência

Evidenciando-se a equação 3.15 do controle PI e a equação 3.16 lado a lado

$$\begin{cases} PI : & u(t) = u(t - T_s) + k_p(e(t) - e(t - T_s)) + k_i T_s e(t) \\ iP : & u(t) = u(t - T_s) + \frac{e(t) - e(t - T_s)}{T_s \alpha} + \frac{K_p}{\alpha} e(t) \end{cases}$$

é evidente que a escolha (note a diferenciação entre letras maiúsculas e minúsculas nos nomes dos ganhos)

$$\begin{cases} k_p = \frac{1}{T_s \alpha} \\ k_i = \frac{K_p}{T_s \alpha} \end{cases} \quad (3.17)$$

torna ambas as equações equivalentes. Sendo assim, se essa relação de ganhos é obedecida, então a comparação entre o desempenho do controle clássico PI com o controle iP é justa.

E considere também que apesar de as equações serem equivalentes, seus comportamentos dinâmicos diferem dado o caráter adaptativo do controle iP em tempo de execução. Sendo assim, apesar de equivalentes, serão observados comportamentos diferentes para cada lei de controle.

3.5.2 PI, iP, iP Modificado

Os parâmetros considerados para simulação são os apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros para simulação dos controladores

| | |
|---------------|-----------------------|
| M | $1500kg$ |
| v_0 | 15 m/s |
| v_d | variável m/s |
| p_{sc} | 10^2 |
| c_V | 5 |
| γ | 0.1 |
| α_{th} | 0.005 |
| α_{br} | 0.1 |
| $K_{p,th}$ | 0.6 |
| $K_{p,br}$ | 10 |
| N | 250 |
| T_s | 0.02 s |
| $K_{p,th,PI}$ | 10000 |
| $K_{p,br,PI}$ | 500 |
| $K_{i,th,PI}$ | 6000 |
| $K_{i,br,PI}$ | 5000 |

Na Figura 32 são apresentados os resultados obtidos após a simulação do diagrama de Simulink da Figura 25 para os diferentes tipos de controle projetado.

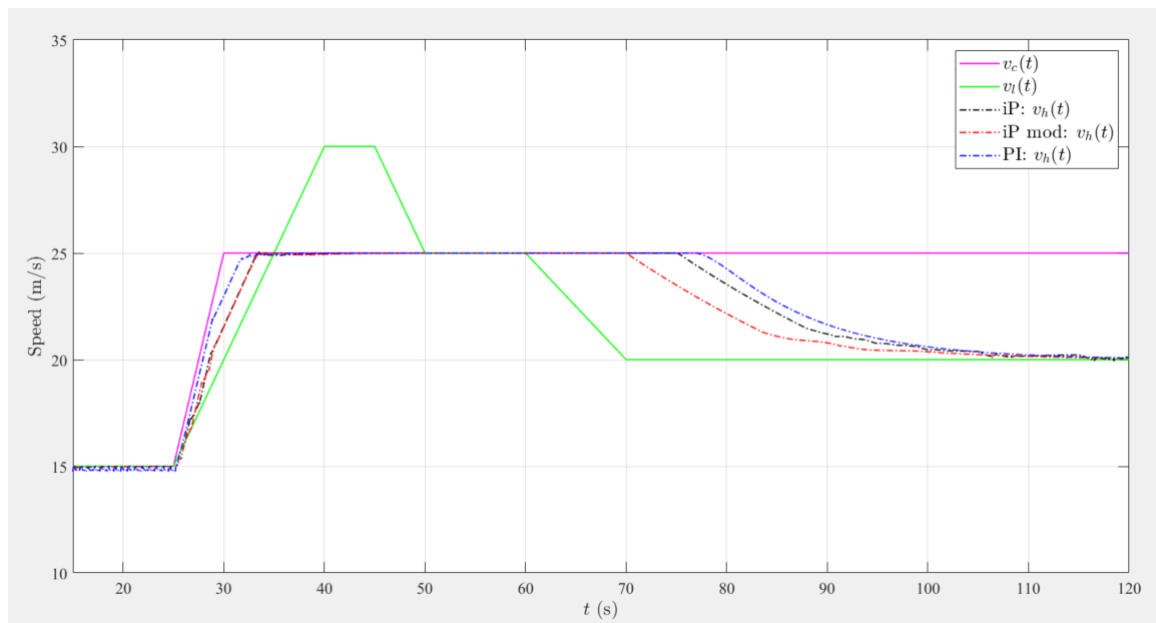


Figura 32: Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - Velocidade

Na Figura 32, observando-se o instante a partir do qual cada velocidade v_h é igual à referência, para essa sintonia o controle PI se saiu melhor do que os demais controladores, pois atinge o *setpoint* mais rapidamente e permanece mais tempo rastreando-o.

Na Figura 33 é apresentada uma comparação envolvendo a função de barreira. Nessa comparação, quanto ao respeito da barreira, todos os controladores obtiveram desempenho satisfatório, de tal maneira que nenhum deles teve barreira negativa ao longo da simulação. Destaque para o controle PI, uma vez que resultou em uma maior distância de segurança.

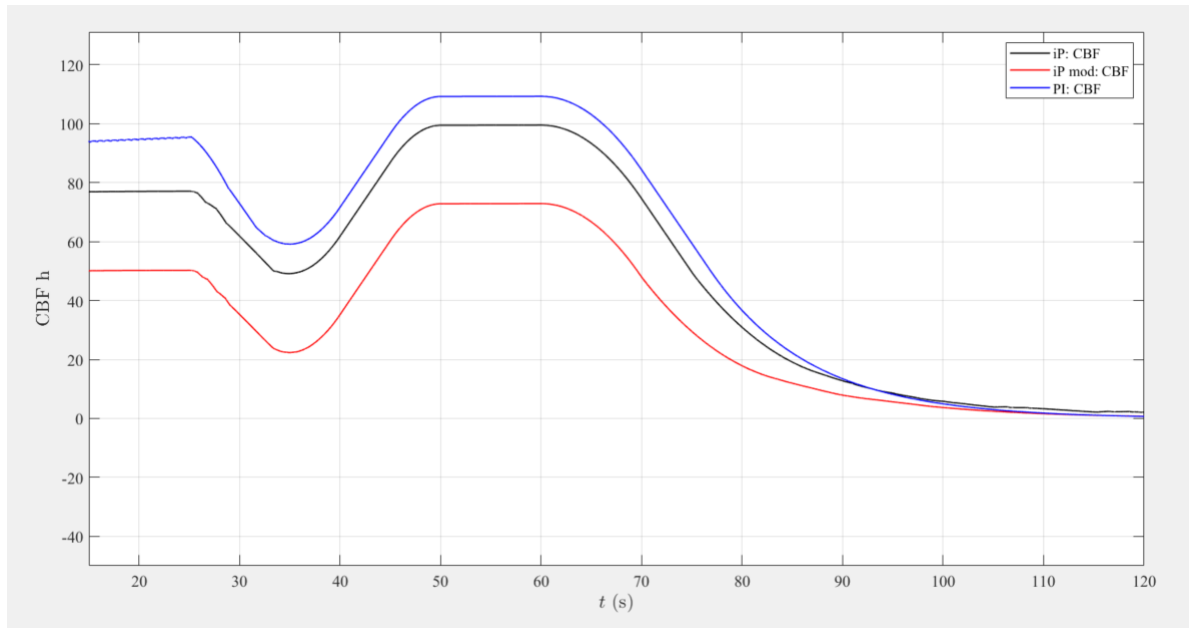


Figura 33: Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - CBF

Analisando a aceleração de referência que a malha externa envia para a malha interna, além da aceleração de fato performada pelo veículo, os resultados são apresentados na Figura 34. Como a malha externa é a mesma para os 3 controladores da Malha Interna, a referência de aceleração é a mesma (curva rosa). Na comparação quanto a aceleração, o controle iP modificado leva vantagem sobre os demais, dado que apresentou um comportamento mais suave, menos oscilatório considerando toda a janela de simulação.

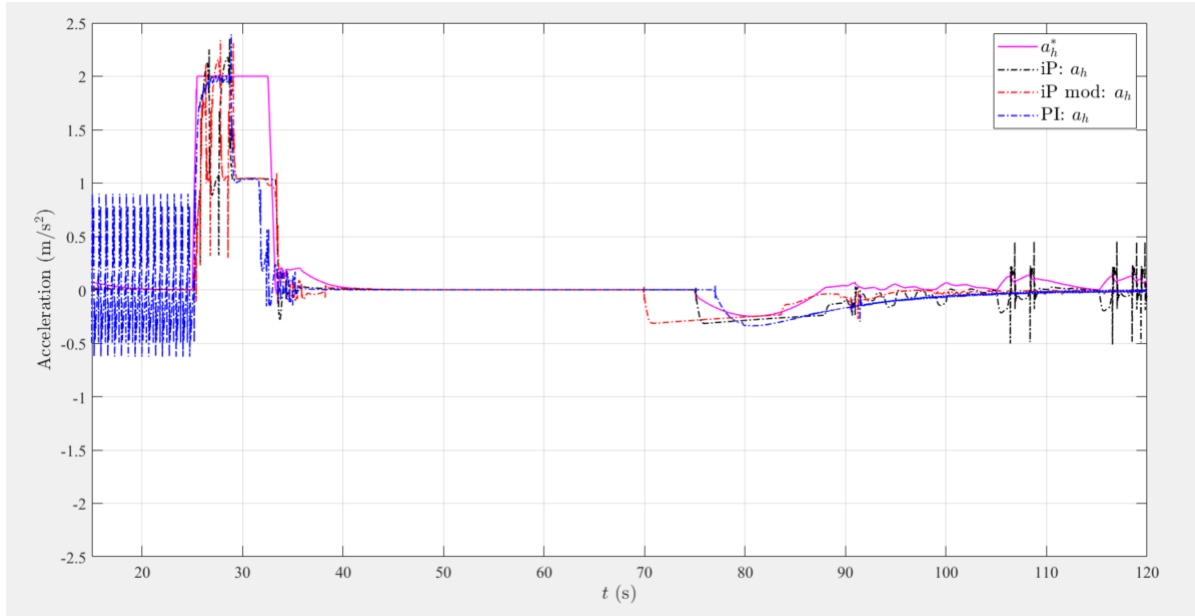


Figura 34: Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - Aceleração

Na Figura 35 é apresentada a atuação dos pedais de aceleração e freio. Na comparação quanto ao acionamento dos pedais, o controle iP modificado novamente leva vantagem sobre os demais, dado que apresentou um acionamento mais suave.

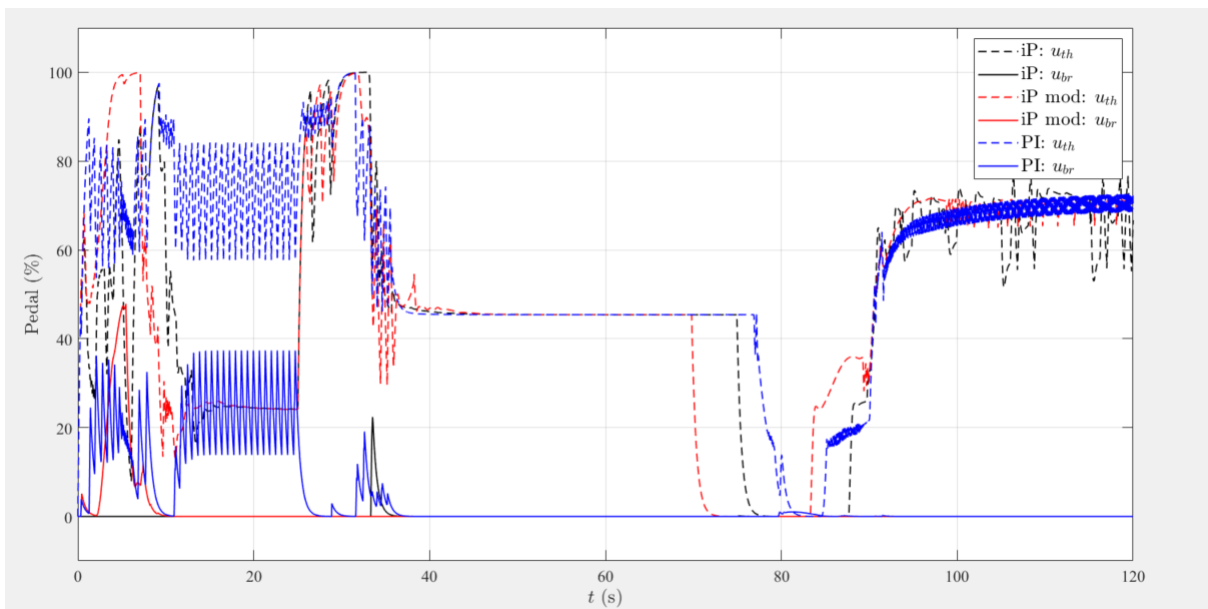


Figura 35: Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - Pedais

Na Figura 36 é apresentada uma comparação quanto ao câmbio e à rotação do motor. Quanto à troca de marcha, o controle PI se mostrou mais agressivo. Nesse sentido,

os controladores iP e iP modificado apresentaram desempenho similar, e se mostraram melhores que o PI, pois essa troca brusca é indesejada.

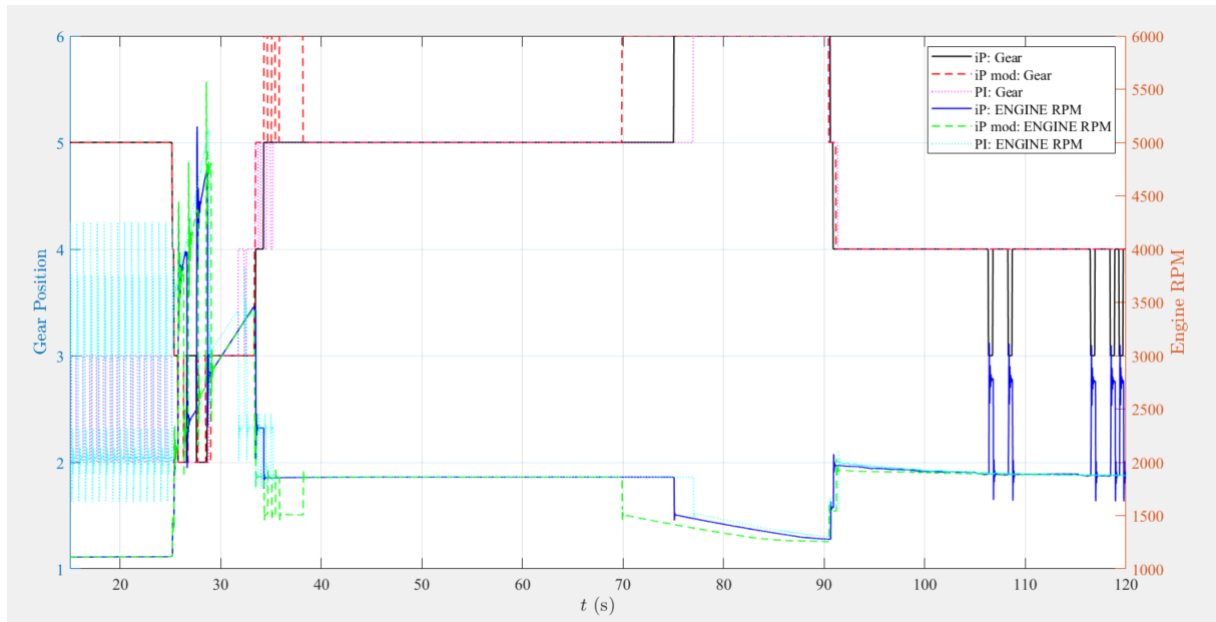


Figura 36: Comparação entre os controles iP e iP Modificado - Marcha e Motor

Por fim, mostra-se na Figura 37 o gráfico do parâmetro Φ do *Model-Free* tanto para o acelerador quanto para o freio. Nessa figura é possível notar porque o controle iP modificado se mostrou vantajoso em alguns dos gráficos mostrados anteriormente. A razão está na função Φ que é suavizada quando amostrada através de uma média móvel.

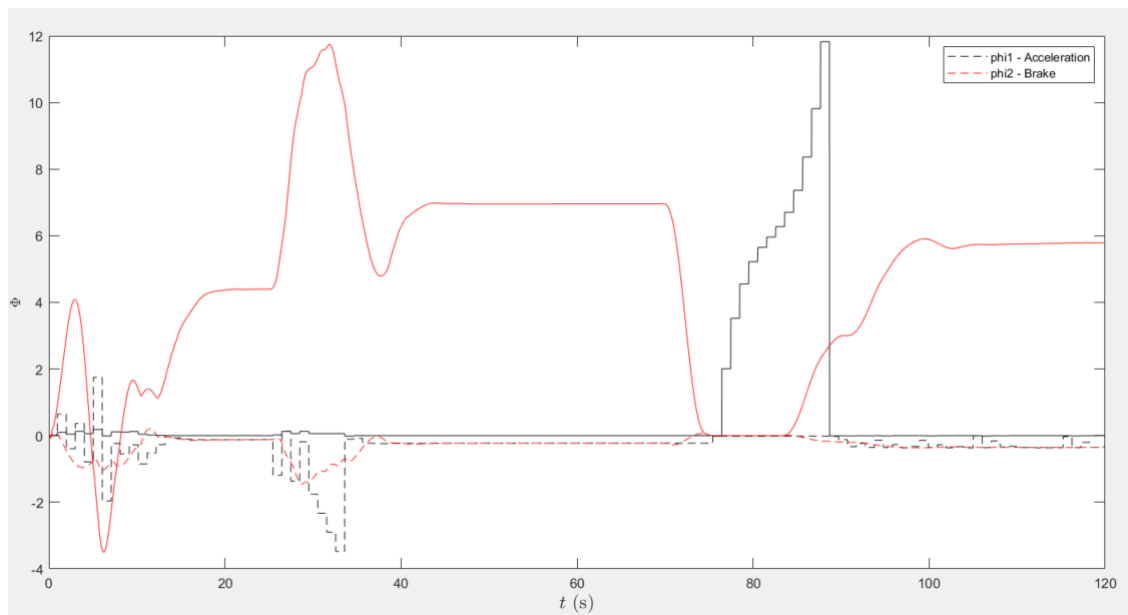


Figura 37: Comparação entre os controles PI, iP e iP Modificado - Phi

4 QUESTÕES A SE CONSIDERAR PARA SIMULAÇÕES REALISTAS

4.1 Condições de ACC

A aplicação de ACC é pensada para o controle de velocidade de cruzeiro, nome dado a velocidades empregadas em estradas. Em geral, as velocidades de cruzeiro estão na faixa $v_{cruzeiro} \geq 40\text{km/h}$, pois do ponto de vista da condução veicular, somente no ambiente de estradas a definição de uma velocidade constante a ser mantida por um longo período faz sentido prático. Em velocidades muito baixas, a definição de ACC não tem sentido prático.

Na zona urbana existe o interesse de trafegar na velocidade máxima de cada rua ou avenida até o destino, mas a dinâmica do trânsito é muito mais rápida e irregular do que no ambiente de estrada e sendo assim exige um controle desenhado para esse outro ODD (*Operational Design Domain*).

4.2 Descrição da tarefa de dirigir

Segundo o curso de especialização em carros autônomos ministrado pela Universidade de Toronto [2], pode-se definir a tarefa de direção de um veículo considerando-se as seguintes atividades listadas a seguir.

E observando-se essa lista é possível compreender a complexidade de se implementar sistemas ADAS, mesmo que de nível 1 como o ACC.

4.2.0.1 Percepção do ambiente

Existem diversas tarefas realizadas por motoristas humanos atreladas a percepção do ambiente que são extremamente difíceis de se implementar computacionalmente de maneira eficiente e com hardwares limitados característicos de sistemas embarcados, também

chamados de ciberfísicos.

Algumas dessas tarefas são listadas a seguir:

- Predizer o movimento de pedestres, bicicletas, motos, carros e demais veículos.
- Perceber a superfície do terreno, buracos, rugosidade da pista, obstáculos.
- Perceber sinais de trânsito na via, fora da via e até mesmo em outros veículos
- Perceber a presença de pedestres e animais

4.2.0.2 Planejamento do movimento

As ações de planejamento envolvem uma escala macro, relacionada à estratégia traçada para se ir do local de origem até um destino, e uma escala micro relacionada decisões tomadas instantaneamente como mudar de faixa. Uma lista de decisões é mostrada a seguir:

- Quais estradas e ruas tomar.
- Quando mudar de faixa.
- Qual caminho escolher dado as condições de tráfego típicas de um determinado horário ou condições climáticas como um dia de chuva intensa.

4.2.0.3 Controle do veículo

As ações de controle do veículo realizadas por um condutor humano envolvem:

- Esterçamento do volante (Controle Lateral)
- Aceleração/Frenagem (Controle Longitudinal)
- Velocidade
- Distâncias em relação a sinais de tráfego, objetos e edifícios, pedestres e outros veículos na via

4.3 Classes de autonomia automotiva (de 1 a 5)

Segundo o curso de especialização em carros autônomos ministrado pela Universidade de Toronto [2], pode-se definir a autonomia de um veículo segundo o sistema de classificação apresentado nessa seção.

Esse sistema de classificação é amplamente utilizado no meio automotivo, porém é preciso considerar que veículos de um mesmo nível de automação segundo esse critério podem ter limites de atuação muito distintos, dado que o sistema de classificação não faz distinção quanto ao ODD. Ou seja, um veículo que seja completamente autônomo, mas que possa operar somente dentro da cidade universitária de são paulo será classificado como nível 5 da mesma forma que um veículo completamente autônomo que possa rodar no Brasil inteiro, o que é uma limitação desse sistema de classificação, uma vez que o segundo veículo apresenta uma capacidade rodar autonomamente muito mais elevada.

4.3.1 Nível 0: Sistemas manuais e/ou de alerta

Nesse nível o motorista realiza toda função de dirigir. Em carros mais modernos, o motorista pode ter auxílio de algum sensor. O mais comum é o sensor de ré ou câmera de ré. Note que o sistema de troca automática de marchas ainda é classificado nesse nível de autonomia.

4.3.2 Nível 1: ADAS

O motorista utiliza um sistema de assistência ADAS por vez. Em geral, utiliza um sistema de controle longitudinal ou lateral.

Em suma, nessa categoria o motorista utiliza um recurso automatizado enquanto lida manualmente com as outras tarefas relacionadas a direção.

Exemplos de funcionalidades:

- ACC (Adaptive Cruise Control): (Controle Longitudinal)
- LK (*Lane Keeping*): (Controle Lateral)

4.3.3 Nível 2: Automação Parcial

O motorista é assistido por dois ou mais sistemas ADAS simultaneamente, porém ainda é o responsável pleno pela condução do veículo.

Exemplos de sistemas são GM Super Cruise e Nissan ProPilot Assist. Além desses, a Mercedes, Audi, Tesla e Hyundai possuem sistemas desse tipo.

4.3.4 Nível 3: Automação Condicional

O veículo consegue dirigir autonomamente em alguma condição muito específica, mas o motorista deve prestar atenção em tempo integral aos movimentos realizados pelo veículo e estar apto para assumir o comando. Alguns exemplos dessas condições específicas são congestionamentos ou estradas sem chuva.

Um exemplo de Carro com esse nível de automação é o Audi A8 Sedan. Outro exemplo são os modelos da Tesla.

4.3.5 Nível 4: Alta Automação

Ações do motorista não são demandadas em uma zona geográfica específica ou tipo de região e/ou clima. O motorista não precisa focar na tarefa de dirigir, podendo prestar atenção em outras atividades, dado que no ODD para o qual ele foi projetado o veículo consegue lidar autonomamente com emergências.

Atualmente, o único veículo nesse estágio é o da Waymo.

4.3.6 Nível 5: Automação Completa

O veículo é completamente autônomo e não demanda nenhuma ação do motorista. Um veículo nessa categoria não precisaria contar com qualquer equipamento destinado a sua condução manual, como o volante ou os pedais.

Atualmente (2022) não existem veículos com esse nível de automação.

4.3.7 Entraves da Automação Plena

Alguns dos grandes entraves da automação plena são implementar em sistemas embarcados todas as capacidades humanas relacionadas ao ato de dirigir que incluem interpretar

sinais, prever a movimentação de todos os objetos ao redor em tempo real, estabelecer rotas, lidar com terrenos e ambientes inéditos e nunca vistos ou tentados e se adaptar a condições adversas como ruas apertadas com manifestantes nas ruas, por exemplo.

Essa implementação é complicada, pois os sistemas de inteligência artificial existentes hoje conseguem realizar essas tarefas, mas de forma limitada e pouco eficiente, considerando-se as limitações de hardware típicas desse tipo de sistema.

4.3.8 Limitações desse sistema de classificação

Essa classificação é limitada, pois dois carros com ODD muito diferentes podem estar no mesmo nível de automação, ainda que tenham habilidades de lidar com a direção autônoma muito diferentes entre si. Por exemplo, é possível que um veículo nessa classificação seja projetado para andar somente na Cidade Universitária da USP como seu ODD, ao passo que outro veículo tenha as “áreas urbanas” como seu ODD, sendo assim muito mais autônomo em um conjunto maior de situações em relação ao primeiro veículo.

4.4 ACC e a integração com outras tarefas relacionadas a condução veicular

O ACC é um sistema que funciona como uma automatização de uma das ações necessárias à direção. Sendo assim, como explicado por S. Moon et al. (2009) [17], as acelerações e frenagens devem concordar com o que um motorista humano empregaria na prática de direção. Ou seja, com o ACC acionado ocorre uma co-direção algoritmo-humano em que é preciso que o algoritmo dirija o carro de maneira semelhante ao ser humano de modo que o piloto entenda de maneira natural as decisões automáticas tomadas pelo carro.

Mesmo que a princípio o sistema pudesse, utilizando acelerações acentuadas, ser melhor que o motorista na tarefa de seguir uma velocidade de cruzeiro, o ACC por princípio deve se limitar a acelerações normais utilizadas na condução humana.

Todavia, deve-se considerar uma exceção a situação em que o veículo encontra-se fora do escopo ACC e precisa realizar uma frenagem de emergência. Nesse caso, um sistema automatizado pode e deve empregar frenagens mais acentuadas do que as normalmente empregadas pelos motoristas a fim de garantir a vida dos ocupantes do veículo.

4.5 Acelerações comuns

Um estudo desenvolvido por S. Moon et al. (2009) [17] divide as situações de condução nos modos de conforto, grande desaceleração e frenagem severa, cujas acelerações associadas são as seguintes:

- **Conforto:** $a > -2m/s^2$
- **Grande Desaceleração:** $-2m/s^2 \geq a > -4m/s^2$
- **Frenagem Severa:** $-4m/s^2 \geq a$

No mesmo estudo é citada uma análise da direção manual de 125 pessoas, e 98% das acelerações estiveram entre -2.17 a $1.77 m/s^2$, representando uma amostragem considerável e que serviu de alicerce para o desenvolvimento e análise do sistema ACC.

5 SIMULAÇÃO REALISTA

5.1 Sinais necessários para controle

Para realizar a simulação realista é preciso primeiramente definir os sinais a serem utilizados.

Conforme o modelo de controle deduzido nas seções anteriores deve-se ter a disposição:

Veículo *Target*:

- Velocidade (medido via RADAR)
- Distância em relação ao veículo *host* (medido via RADAR)

Veículo *Host*:

- Atuador: Acionamento pedal do acelerador
- Atuador: Acionamento pedal do freio
- Sensor: Velocidade
- Sensor: Aceleração

Demais sinais obtidos do simulador e mostrados nos gráficos desse capítulo são utilizados para análises de desempenho do sistema e qualidade do controle, porém não integram os sinais necessários ao controle ACC.

5.2 CarSim

Nesta seção será apresentado brevemente o software de simulação realista que será adotado como *benchmark* - CarSim. Após toda a validação do controle desenvolvido no

ambiente MATLAB/Simulink, o CarSim representa um passo acima na hierarquia de validação de um sistema de controle automotivo por ser um simulador realista e bem-conceituado no setor automotivo. O software permite uma simulação mais realista do contexto automobilístico, considerando as características físicas do veículo (modelo mais fidedigno), da pista, dos sensores e do RADAR. Dada essa validação mais robusta do sistema de controle ACC desenvolvido, é possível refinar o controle para contextos até então não contemplados, melhorar o ajuste de parâmetros e encaminhar com mais segurança para uma aplicação prática, seja ela em HIL (*Hardware-In-the-Loop*) ou mesmo em um veículo comercialmente vendido.

Na Figura 38 é apresentada uma imagem da interface do software CarSim.

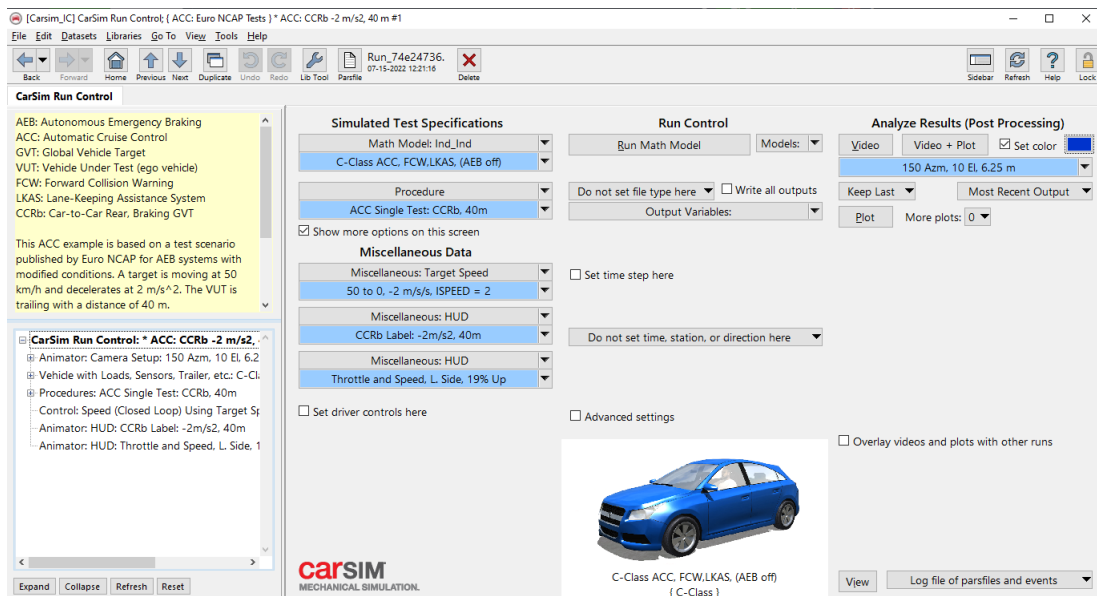


Figura 38: CarSim Interface

Como é possível observar, trata-se de uma interface relativamente intuitiva que reúne desde a possibilidade de alterar o veículo *host* (opção *Math Mode*), o procedimento/trajetória de teste, aspectos externos como pista, além de visualização gráfica dos sinais de interesse durante a simulação.

O software conta também com um padrão europeu de validação de sistemas ACC denominado Euro NCAP ACC. A partir desse teste via simulação computacional é possível validar o ACC desenvolvido obtendo um *score* reconhecido internacionalmente, o que traz mais credibilidade ao sistema e, conseqüentemente, mais segurança para a sua implementação em hardware.

Na Figura 39 é apresentada uma tela ilustrando a simulação computacional do Euro NCAP ACC, teste este realizado na Europa nos veículos reais que possuem sistemas ACC.



Figura 39: CarSim - Euro NCAP ACC

5.3 ConFigurações do veículo *host* com ACC

O veículo *host* preliminar escolhido foi uma *Pick Up* azul mostrada na Figura 40. A principal característica desse veículo é sua massa $m_{pickup} = 1500$ kg, massa essa adotada em todas as simulações.

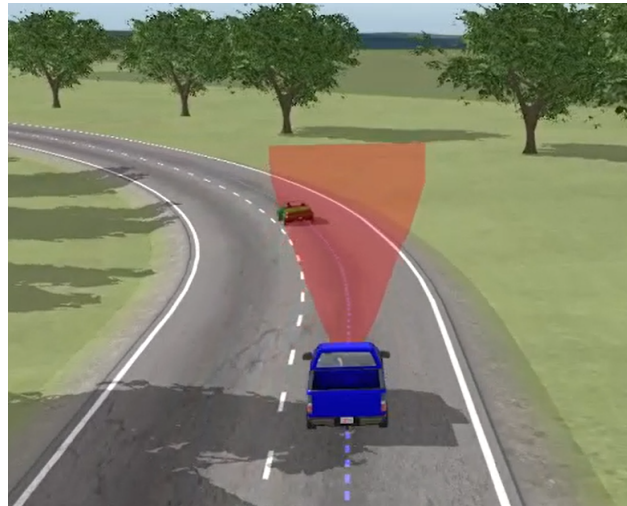


Figura 40: CarSim - Veículo *host* (*Pick Up* azul) e faixa vermelha (mostrando área considerada para o RADAR).

O RADAR utilizado no esquema de simulação é um algoritmo genérico de simulação implementado pelo próprio CarSim no Simulink. O range considerado para o RADAR foi $D_{max} = 70$ m e o fov (*field of view*) adotado foi de $fov = [-10^\circ, +10^\circ]$.

5.4 Freio de Emergência e limitações do controle de Barreira

A vantagem de se realizar a simulação computacional do ACC em um software como o CarSim é observar o comportamento do sistema de controle diante das mais variadas situações que podem acontecer na prática.

Um exemplo é quando há duas vias/faixas no mesmo sentido na estrada, em que o veículo *host* está em uma, e um segundo veículo está em outra. Por estar sozinho na faixa, o RADAR do veículo *host* não observa objetos a frente, fazendo com o que o sistema ACC priorize o requisito de rastreabilidade da velocidade de cruzeiro, uma vez que tecnicamente a função de barreira tende a $+\infty$. Em programação embarcada é suficiente programar o RADAR para medir distâncias $d \in [0, D_{max}]$ e impor que $d = D_{max}$, $\forall d > D_{max}$ e com isso a barreira fica limitada em função de D_{max} e não em $+\infty$, o que resolve o problema de *overflow* relacionado a barreira tender a $+\infty$. Voltando ao exemplo, o segundo veículo presente na outra faixa pode subitamente ir para a faixa do veículo *host*, fazendo com que o RADAR perceba um objeto inesperado. Dependendo da distância dos veículos, a função de barreira pode instantaneamente cair para próximo de zero e até exigir um controle de freio de emergência para tratar tal contexto.

Na situação em que o freio de emergência seria necessário, isto é, com $h(x) < 0$, observa-se uma limitação do controle via função de barreira. Essa situação parece invalidar o conceito de invariância do subespaço seguro \mathcal{C} . Porém, a situação em que um veículo entra subitamente na frente do veículo *host*, não foi modelada na concepção da função $h(x)$ conforme discutido na seção 2.3 e por isso, do ponto de vista da função $h(x)$, o evento descrito seria equivalente a um evento com dinâmica instantânea e por isso o controle via função de barreira não é capaz de evitar que $h(x)$ fique negativa, ou seja, que o veículo encontre-se em um estado não-seguro.

Observando situações como essas que nesse projeto também foram feitas alterações no sistema ACC de tal modo que ele propicie um desempenho satisfatório nos mais variados cenários, como, por exemplo, adicionando a funcionalidade de freio de emergência para situações inesperadas, embora não seja uma característica presente nos atuais sistemas ACC desenvolvidos na indústria.

Observação: Nos testes do protocolo Euro NCAP do capítulo 6 o sistema de freio de emergência não foi utilizado como manda o protocolo.

5.5 Ajuste proposto dos controladores

Os parâmetros utilizados nos controladores dos testes dessa seção são listados na tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros dos controles ULC e LLC

| Controle | Parâmetro | Valor |
|-----------------------|---------------|-------------------------------------|
| Período de Amostragem | T_s | 0.02 s |
| ULC: CLF-CBF | τ_d | 1, 5 |
| | γ | 0, 01 |
| | c_v | 0, 8 |
| | p_{sc} | 100 |
| | M | 1500 Kg |
| LLC: iP | $K_{P_{th}}$ | 5 |
| | α_{th} | 4 |
| | N_{th} | 50 |
| | $K_{P_{br}}$ | 8 |
| | α_{br} | 6 |
| | N_{br} | 50 |
| LLC: PI Clássico | $k_{p_{th}}$ | $\frac{1}{\alpha_{th}T_s}$ |
| | $k_{i_{th}}$ | $\frac{K_{P_{th}}}{\alpha_{th}T_s}$ |
| | $k_{p_{br}}$ | $\frac{1}{\alpha_{br}T_s}$ |
| | $k_{i_{br}}$ | $\frac{K_{P_{th}}}{\alpha_{th}T_s}$ |

A seguir são apresentados os métodos de ajuste de cada parâmetro do controlador bem como as respectivas justificativas desses métodos.

5.5.1 Ajuste ULC - Upper Level Control

Apesar da técnica CLF-CBF ser baseada em modelo, o ajuste do parâmetro γ relacionado ao funcionamento da CBF, e do parâmetro c_v relacionado a taxa de convergência da CLF devem ser ajustados empiricamente por meio de simulações.

No caso do controle de barreira, isso se dá em razão das limitações desse controle discutidas nesse capítulo.

No caso do controle via função de Lyapunov, a dinâmica veicular é muito simplificada e não fornece uma descrição dinâmica suficientemente boa para que se possa determinar um valor limite de c_v analiticamente. E ainda que o modelo considerado no projeto fosse mais completo, a complexidade cresceria exponencialmente de tal maneira que somente soluções numéricas seriam viáveis para a determinação de um valor limite de referência para esse parâmetro.

5.5.2 Ajuste LLC - Lower Level Control

Como discutido na seção 3.2 é preciso ajustar empiricamente os parâmetros α relacionado a influência do esforço de controle na ν -ésima derivada da saída controlada e ajustar N sendo o número de amostras consideradas para a estimativa de Φ via integração numérica.

Além disso, é preciso escolher uma lei de controle $\mathfrak{C}(e)$. Considerando-se a complexidade do problema e diversos testes realizados, concluiu-se que a escolha $\mathfrak{C}(e) = K_p e$ é a melhor escolha. Isso porque essa escolha permite um controle de fácil compreensão e ajuste e resulta em desempenho satisfatório, sendo que a introdução de parcelas integrativas ou derivativas não melhoraram os resultados dos testes realizados.

5.5.3 Testes empíricos de sintonização

Para se chegar nos valores apresentados a seguir foram considerados 4 cenários de testes. Três deles foram simulados pela equipe do laboratório LCA (o que inclui os autores do presente trabalho) mas não serão apresentados nesse trabalho e o quarto cenário é o apresentado nesse trabalho. Considerando-se todos esses cenários por meio de ajustes empíricos, chegou-se a relação de valores apresentados na tabela 7 que permitiram a lei de controle CLF-CBF com *Model-Free* atender satisfatoriamente os requisitos de ACC em todos os cenários, isto é, velocidade de cruzeiro, segurança, conforto e estabilidade.

Sendo assim, essa sintonia dos parâmetros não ocorre no clássico problema de *overfitting* ou sobre-ajuste em português.

Vale destacar que os outros três cenários foram simulados no simulador DYNA-4, outro simulador *benchmark* no setor automotivo. E por isso, dado que os resultados aqui apresentados foram simulados em um simulador diferente, o CarSim, os resultados

dessa simulação realista apresentam inclusive uma “robustez qualitativa” enquanto os parâmetros foram ajustados utilizando-se mais de um software de simulação. Ou seja, possíveis *bias*, ou em português vieses, causados pelo simulador são atenuados nesse caso.

5.5.4 Conclusão do ajuste dos parâmetros

Como todos os parâmetros da lei de controle são ajustados empiricamente, destaca-se imediatamente a importância da utilização de simuladores *benchmark* para validação de controles ACC baseados no framework de controle aqui analisado.

5.6 Cenário de Teste - Pista Curvilínea

A Figura 41 ilustra a trajetória do veículo na pista considerada para o teste em estrada curvilínea. Esse teste é interessante, pois se mostra bastante exigente quanto ao teste do ACC.

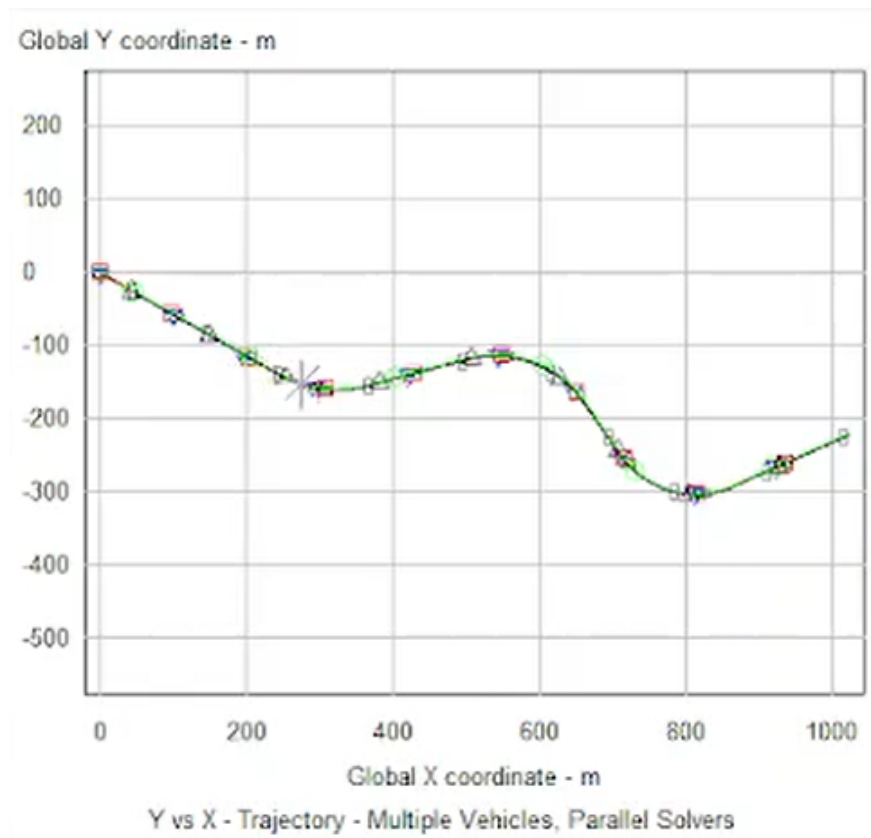


Figura 41: Cenário de teste: Estrada Curviínea

O veículo *host* com ACC percorre o trecho com um veículo a sua frente que realiza diversas frenagens em função das curvas do cenário, obrigando o algoritmo de controle a

realizar inúmeras vezes o *trade-off* entre os requisitos de desempenho, isto é, se manter na velocidade de cruzeiro desejada pelo motorista e, simultaneamente, manter uma distância segura em relação ao veículo da frente considerando também requisitos de conforto sempre que o ACC não opera em condições de emergência.

Uma característica interessante desse circuito é que ele explora muito bem os limites do fov do RADAR do veículo com ACC, ajustado de tal maneira a apresentar um ângulo de abertura pequeno, porém com um longo alcance de sensoriamento. Dessa maneira, durante a curva, o RADAR deixa de detectar a presença do veículo a frente, mesmo que ele não tenha se distanciado efetivamente do veículo *host*. Assim, as curvas da pista permitem testar esse aspecto prático crucial na validação de algoritmos de controle de ACC.

E ainda, ao final do trecho o veículo a frente realiza uma frenagem brusca forçando o veículo *host* sair do conjunto de velocidades do escopo do ACC, em geral, acima de 40km/h, e acionar o freio de emergência. Nesse trecho da pista, os limites da validade da CBF são testados em um teste bastante rigoroso.

5.7 Resultados do teste em estrada curvilínea

As Figuras 42, 43, 44, 45, 46, 47 contendo os resultados serão apresentadas nessa seção e comentadas na seção 5.8

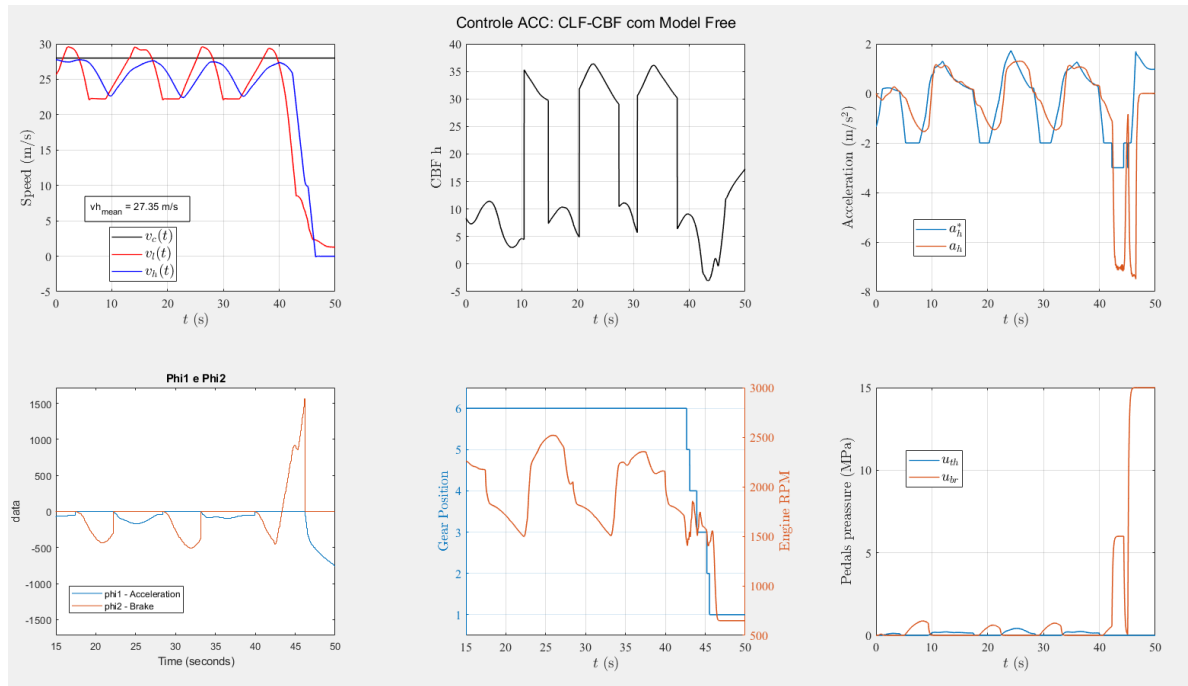


Figura 42: Resultados de simulação de ACC em Estrada Curvilínea com *Model-Free* (iP)

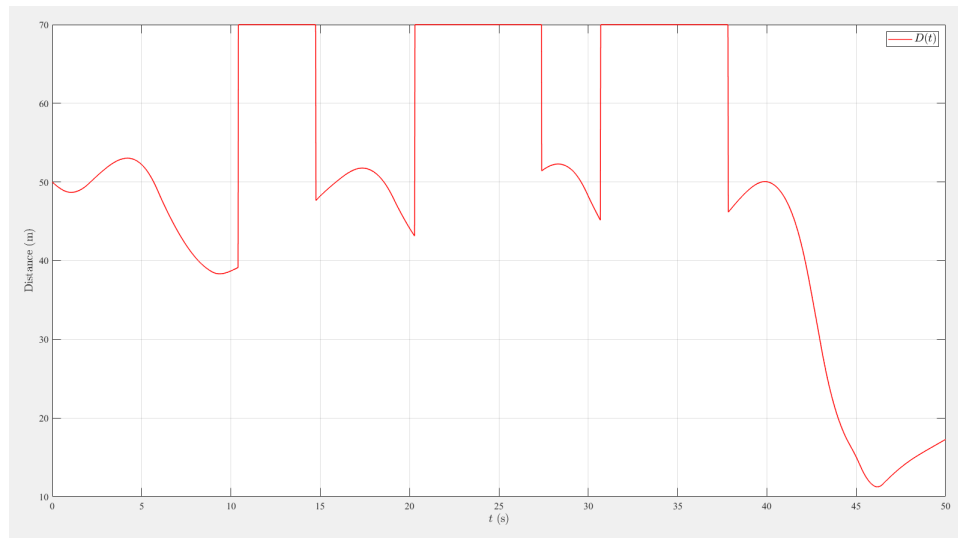


Figura 43: Cenário de teste: Estrada Curvilínea. Distância entre veículo Líder e veículo *host* com ACC utilizando *Model-Free* (iP)

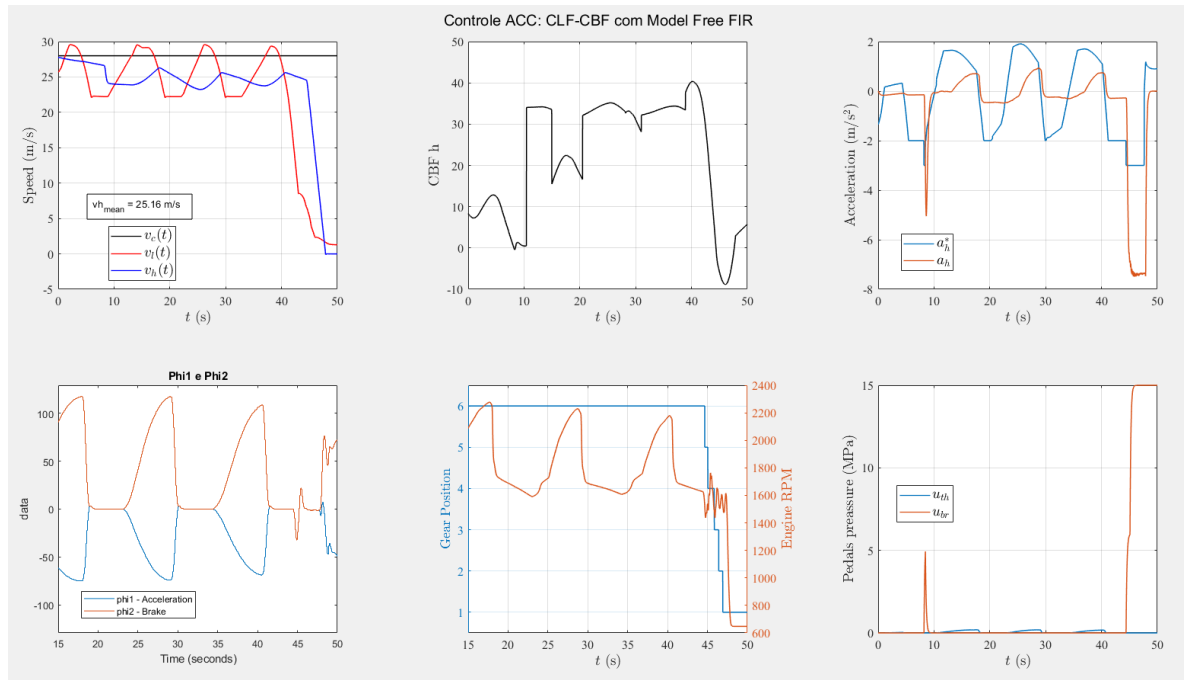


Figura 44: Resultados de simulação de ACC em Estrada Curvilínea com *Model-Free* Modificado (iP modificado)

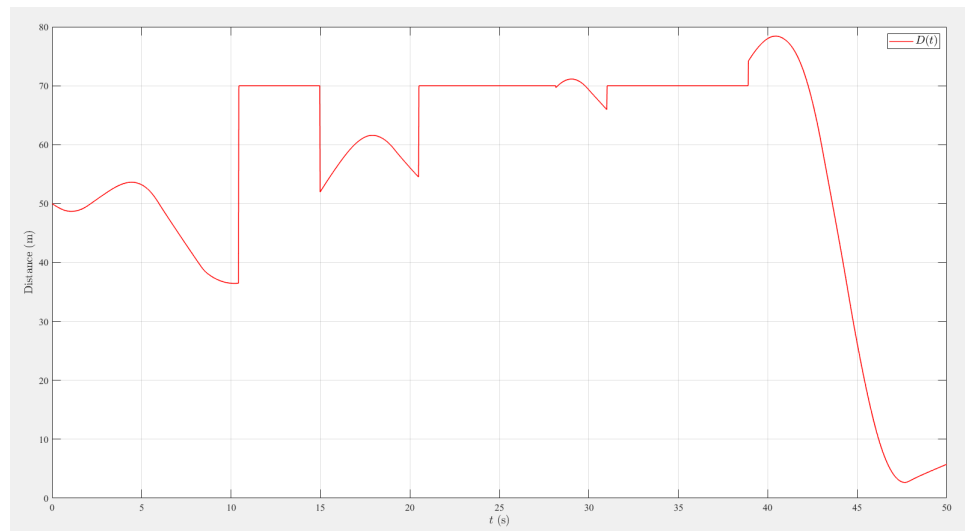


Figura 45: Cenário de teste: Estrada Curvilínea. Distância entre veículo *target* e veículo *host* com ACC utilizando *Model-Free* Modificado (iP modificado)

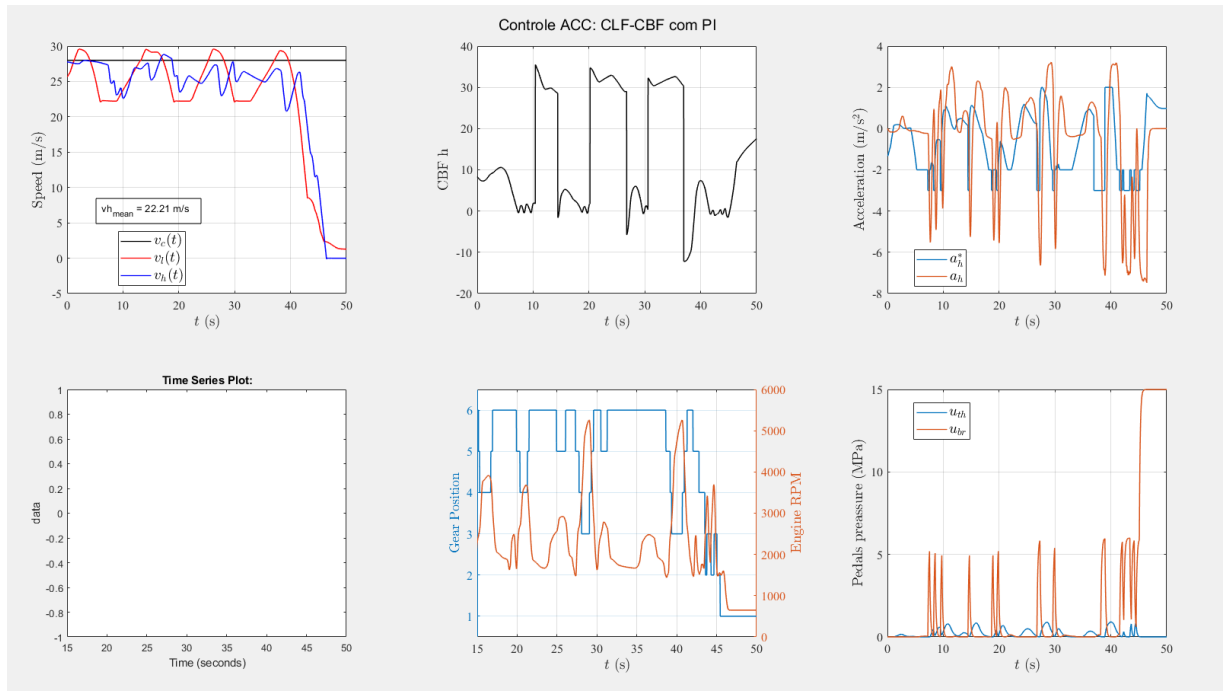


Figura 46: Resultados de simulação de ACC em Estrada Curvilínea com PI clássico

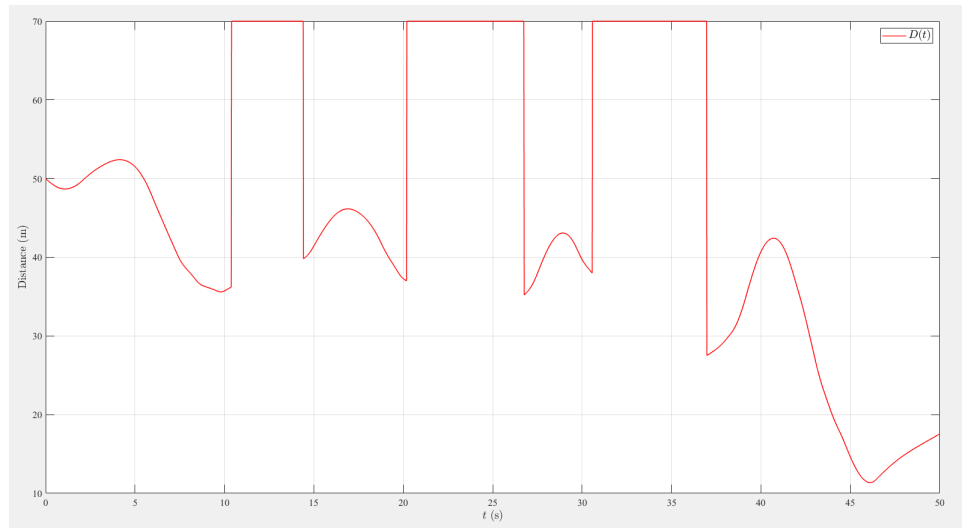


Figura 47: Cenário de teste: Estrada Curvilínea. Distância entre veículo *target* e veículo *host* com ACC utilizando PI clássico

No caso da Figura 46 não existe a variável Φ , por isso seu gráfico não é mostrado no *dashboard* de análise da simulação com o controle PI.

5.8 Comparação entre controladores iP, iP modificado e PI clássico

5.8.1 Velocidades

Compara-se através da tabela 8 as velocidades médias obtidas no intervalo $t \in [0; 40]$ s em que o veículo trafega em condições de ACC. Quanto ao desempenho, para esta sintonia proposta o controle *Model-Free* (iP) foi aquele que manteve a velocidade média do *host* mais próxima em média da velocidade de cruzeiro desejada.

Tabela 8: *Setpoint* do ACC e velocidades médias para cada controle proposto

| Controle | Parâmetro | Valor |
|----------------------------------|---------------------------|-----------|
| Setpoint: Velocidade de Cruzeiro | $\bar{v}_{host} _0^{40s}$ | 28 m/s |
| iP | $\bar{v}_{host} _0^{40s}$ | 27.35 m/s |
| iP modificado | $\bar{v}_{host} _0^{40s}$ | 25.16 m/s |
| PI Clássico | $\bar{v}_{host} _0^{40s}$ | 22.21 m/s |

5.8.2 Distancia entre veículos

Analisando as Figuras 43, 45 e 47 observa-se que a distância mínima entre os veículos ao longo de todo o percurso é praticamente a mesma e sendo assim, nenhum dos três controles obteve vantagem expressiva no quesito segurança.

5.8.3 Barreira

Analisando as Figuras 42, 44 e 46 observa-se que o valor mínimo da barreira h ao longo de todo o percurso é praticamente o mesmo e sendo assim, nenhum dos três controles obteve vantagem expressiva no quesito segurança.

5.8.4 Acelerações

Analisando as Figuras 42, 44 e 46 observa-se que o controle com *Model-Free* (iP) obteve uma vantagem expressiva no que se refere aceleração a_h rastrear adequadamente a aceleração calculada pelo controle ULC $a_{h,d}$. Após 40s para todos os controles o rastreamento não ocorre em função do acionamento do freio de emergência que prevalece sobre o controle ULC.

5.8.5 Marcha e Velocidade do Motor

Analisando as Figuras 42, 44 e 46 observa-se que a troca de marchas é significativamente mais frequente com o controle PI Clássico. Sendo assim, é notório que o esquema iP ou iP modificado leva vantagem na medida que garante uma maior vida útil do sistema de marchas, bem como promove uma viagem mais confortável para os passageiros do veículo *host*.

5.8.6 Acionamento dos pedais

Analisando as Figuras 42, 44 e 46 observa-se que o acionamento dos pedais do controle iP é mais adequado a aplicação automotiva, visto que a frenagem brusca em $t = 10s$ do controle iP modificado é desconfortável para os passageiros do veículo e que o comportamento obtido no controle PI é inviável para um carro real.

6 EURO NCAP

6.1 Introdução

O Programa Europeu de Avaliação de Novos Carros (*European New Car Assessment Programme*) ou simplesmente Euro NCAP [18] é um programa de segurança veicular que criou uma classificação de cinco estrelas para ajudar consumidores e empresas a compararem veículos mais facilmente, principalmente no que se refere a segurança veicular.

A classificação de segurança é determinada através de uma série de testes que representam importantes cenários do cotidiano que podem culminar em acidentes, seja causando ferimentos ou até morte aos envolvidos.

A classificação ou número de estrelas conquistadas refletem o quão bem o veículo performou diante dos testes, classificação esta que vai além dos requisitos legais. Deste modo, um veículo que atende as mínimas exigências legais é elegível a nenhuma estrela, além disso, não necessariamente um veículo com classificação ruim é inseguro, porém não é tão seguro quando comparado à modelos que tiveram melhor desempenho.

Na Tabela 9 é apresentado um resumo do que representa em termos de segurança cada classificação.

Tabela 9: Classificações do Euro NCAP

| Estrelas | Descrição |
|----------|---|
| 0 | Sem tecnologia de segurança moderna crítica |
| 1 | Proteção marginal contra colisões e pouca tecnologia de prevenção de colisões |
| 2 | Proteção nominal contra colisões, mas sem tecnologia de prevenção de colisões |
| 3 | Pelo menos proteção média dos ocupantes, mas nem sempre equipada com os mais recentes recursos de prevenção de colisões |
| 4 | Bom desempenho geral na proteção contra colisões e geral; tecnologia adicional de prevenção de colisões pode estar presente |
| 5 | Excelente desempenho geral na proteção contra colisões, bem equipado com tecnologia abrangente e robusta de prevenção de colisões |

Como se vê na Tabela 9, o *score* obtido resulta de duas subcategorias principais: **Proteção contra colisões** e **Prevenção de colisões**. Sendo o ACC um algoritmo fica claro que ele é um sistema classificado como de **Prevenção de colisões** somente. Siste-

mas de Proteção contra colisões são a carroceria, airbags, cintos de segurança, encostos de cabeça e demais sistemas físicos.

O software CarSim apresenta uma série de testes do Euro NCAP focado em ACC, logo, nesta seção serão explorados tais testes de modo a validar mais robustamente o sistema de controle desenvolvido. Por se tratar de um programa de avaliação de segurança para carros europeus, sua classificação também pode ser interessante para veículos produzidos na América Latina que advêm de montadoras europeias ou que seguem padrões equivalentes. A Figura 48 ilustra o limite de velocidade ao redor do mundo e na Europa, assim como contemplado pelo Euro NCAP, a máxima velocidade permitida é 130 km/h, o que estaria dentro do limite do Brasil (120 km/h), assim como do país latino com o maior limite, Argentina (130 km/h). Desta forma, mesmo o sistema de controle sendo produzido no Brasil e validado com o Euro NCAP via software CarSim, a segurança será garantida na América Latina, onde o sistema pode ser eventualmente comercializado devido à proximidade geográfica.

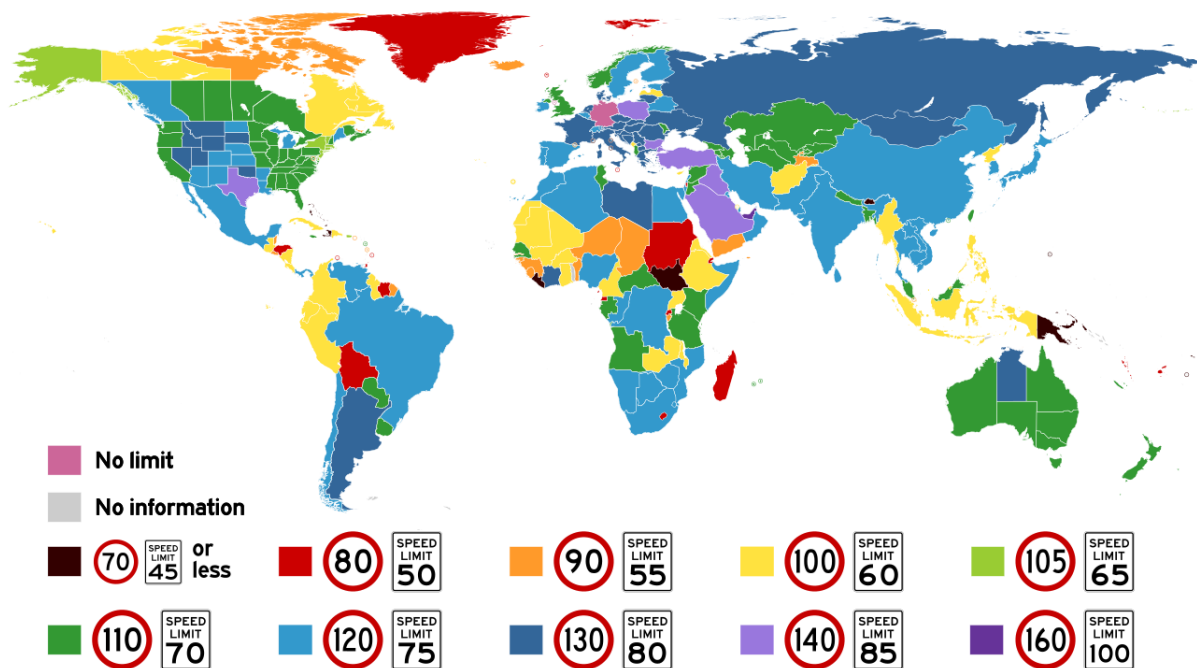


Figura 48: Limite de Velocidade ao redor do mundo: Extraído de [3]

Nas seções seguintes serão apresentados o desempenho do sistema de controle desenvolvido frente aos testes indicados na Tabela 10 que visam avaliar a segurança de veículos com ACC.

Apenas a capacidade do sistema ACC é avaliada, onde os níveis de frenagem permanecem abaixo de aproximadamente 5 m/s^2 e/ou onde é confirmado que o freio de

Tabela 10: Testes de ACC do Euro NCAP no CarSim

| Testes |
|--------------------------|
| CCRs - Alvo Estacionário |
| CCRm - Alvo em Movimento |
| CCRb - Alvo Freando |
| CUT-IN |
| CUT-OUT |

emergência AEB (*Autonomous Emergency Braking*) não interveio. Para cada cenário e velocidade de teste, 1 ponto pode ser alcançado onde o ACC evita totalmente a colisão. Onde o ACC intervém e reduz a velocidade de impacto em mais de 5 km/h antes da intervenção do AEB, são pontuados 0.5 pontos. Onde o ACC não reduz mais de 5 km/h, não são atribuídos pontos.

Um exemplo da representação gráfica do teste no CarSim é mostrado na Figura 49 para o teste CCRm - GVT @ 60 km/h.



Figura 49: Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Representação gráfica do teste no CarSim

Para entender a importância de um software de simulação realista como o CarSim para realização de testes de admissão de tecnologias ADAS como o Euro NCAP conversamos com uma engenheira gerente de uma importante montadora global de veículos de passeio. Ela explicou que a tendência do mercado é utilizar simuladores para validação de tecnologias como o ACC em lugar de testes físicos reais, e que no futuro, quando os simuladores forem ainda melhores, talvez os testes físicos sejam descontinuados e os testes em simulação sejam suficientes para a validação completa dessas tecnologias. A razão principal disso é o custo de realização dos testes.

Nesse sentido, ela também explicou que quando um veículo novo é projetado são montados veículos reais manualmente dado que sua produção ainda não foi serializada. Nesse caso, um veículo que produzido em série custaria na casa de centenas de milhares de reais é produzido dessa maneira a um custo de milhões de reais cada. Além disso, nos testes são utilizados bonecos que simulam o corpo humano para se medir o impacto que um acidente teria na saúde humana, e cada boneco desses é vendido por um valor ainda maior do que os veículos feitos a mão, também na casa de milhões de reais. E os testes contam com mão de obra muito especializada, incluindo médicos, engenheiros e pilotos de teste, o que torna o teste muito caro. E em média, ela contou que são destruídos ao todo, considerando-se todos os teste do protocolo, em torno de 14 carros, ou seja, o custo é extremamente elevado e é dobrado caso o teste precise ser repetido em função de algum erro de projeto.

Dada essa explicação, fica ainda mais evidente a necessidade da validação prévia de algoritmos como o de ACC em simuladores *benchmark*, o que corrobora na justificativa do objetivo (vide seção 1.2) e da realização deste trabalho.

6.2 Factibilidade dos testes Euro NCAP

Os testes do Euro NCAP consistem em frenagens de um veículo com ACC, chamado VUT (*Vehicle Under Test*), que está em uma velocidade inicial V_0 e que precisa atingir uma velocidade final $V < V_0$ com desaceleração máxima permitida $|a| \approx 5\text{m/s}^2$ a fim de evitar a colisão entre dois veículos, ou seja, o VUT e o GVT (*Global Vehicle Target*). Considerando-se que em cada situação a ser testada existe um deslocamento máximo D_{max} possível, seja porque o teste já começa com os veículos a uma certa distância um do outro ou seja porque $D_{max} = D_{RADAR,max}$ para um dado teste, então existe uma condição de factibilidade do teste.

Relembrando a equação de Torricelli válida para movimento uniformemente variado, isto é, à aceleração constante que se escreve como

$$V^2 = V_0^2 + 2a\Delta S \quad (6.1)$$

Então a condição de factibilidade do teste é que

$$\Delta S = \frac{V^2 - V_0^2}{2a} < D_{max} \quad (6.2)$$

Isto é, o deslocamento ΔS deve ser menor do que a distância máxima disponível entre os veículos VUT e GVT D_{max} . Isto em uma frenagem de aceleração constante máxima $|a|$ da velocidade inicial V_0 para velocidade final V .

E para que o teste seja factível, ajusta-se o parâmetro K_p do controle *Model-Free* associado ao freio de tal maneira que a frenagem tenha dinâmica rápida o bastante para que a equação 6.2 seja verdadeira.

Note que K_p deve ser tal que a dinâmica de freio seja mais rápida do que a situação de factibilidade indica, pois devido à primeira lei de Newton, referente a inércia de um corpo com massa, o veículo não pode imprimir instantaneamente uma desaceleração de -5m/s^2 o que implica que uma parcela não desprezível do processo de frenagem ira necessariamente ocorrer com desaceleração em módulo inferior a essa desaceleração limite suposta constante.

6.3 Especificação do RADAR

Considerando-se a discussão da subseção 6.2 sobre factibilidade, tem-se então restrições suficientes para a especificação do RADAR automotivo a ser empregado.

O dimensionamento do RADAR implica em determinar dois parâmetros principais:

- **Alcance Longitudinal:** designado aqui por $D_{RADAR,max}$
- **Campo de Visão:** designado aqui por fov

Pensando no cenário europeu e da América Latina onde a velocidade máxima considerada em termos de teste de validação no Euro NCAP e Latin NCAP é de 130km/h temos da equação 6.2 que

$$\Delta S = \frac{0^2 - \left(\frac{130}{3.6}\right)^2}{2 * (-5)} = 130.4\text{m} < D_{RADAR,max}$$

A escolha mínima possível, forçando uma dinâmica de freio muito rápida, é $D_{RADAR,max} = 140\text{m}$. Caso se deseje uma frenagem mais suave, basta trabalhar com um RADAR de alcance maior. Note que essa escolha considera o veículo trafegando a 130km/h chegara, se necessário, a desaceleração de -5m/s^2 num espaço de 10 m aproximadamente porque $140\text{m} - 130.4\text{m} \approx 10\text{m}$.

O motivo para essa escolha ser minimizada em distância é para que se possa maximizar o fov do RADAR, pois há um *trade-off* entre esses dois parâmetros do RADAR. Isto é, não é possível maximizar excessivamente $D_{RADAR,max}$, fov e, simultaneamente, minimizar o preço do RADAR. Além disso, se o sistema funcionar com o alcance mínimo, logo ele funcionará para qualquer RADAR que possua um alcance superior a este.

Considerando-se o teste “CCRS - Estrada Curva” do Euro NCAP cuja ilustração é reproduzida na Figura 50, calcula-se o fov mínimo que garante a factibilidade do teste considerando-se que o veículo a frente está estacionário na via.

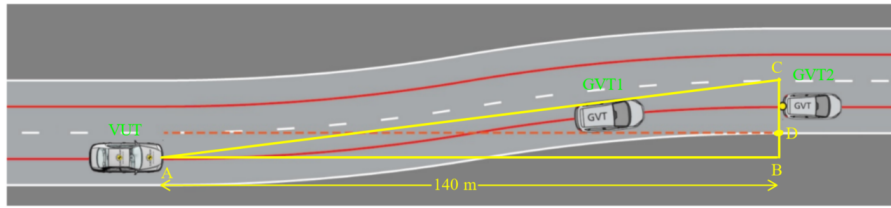


Figura 50: Modelagem do mínimo fov para condições de factibilidade. Adaptado de [4].

No CarSim a pista curvilínea foi construída segundo os detalhes apresentados na Figura 51.

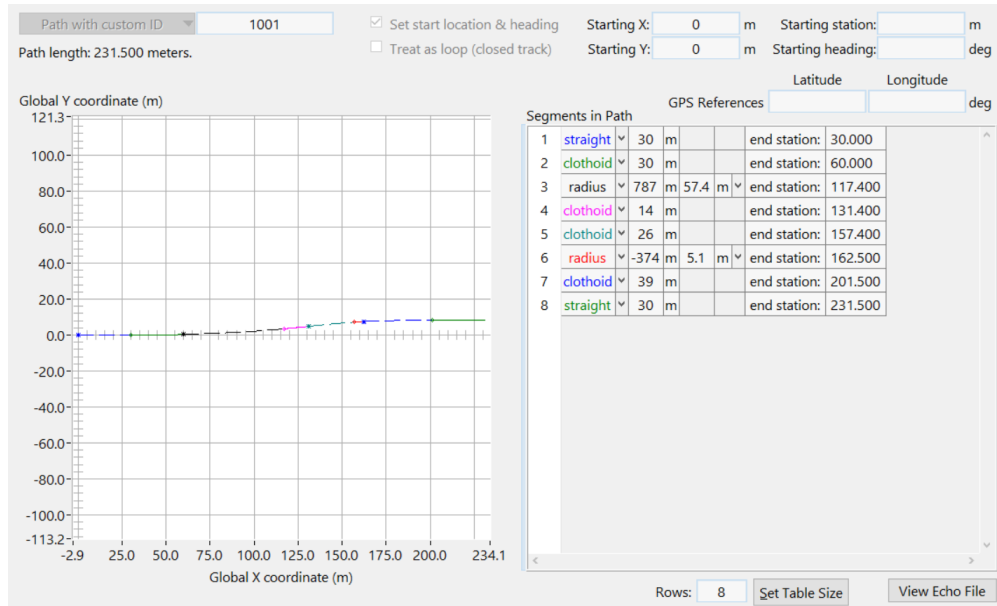


Figura 51: Detalhes da pista curvilínea do Euro NCAP Test no simulador realista CarSim

Assume-se que a largura da faixa de rodagem é aproximadamente de 3.5m conforme as simulações exemplo do CarSim.

Assim $\overline{AB} = 140\text{m}$, $\overline{DC} = 3.5\text{m}$, $\overline{BD} = \frac{3.5}{2} = 1.75\text{m}$. Seja $\text{fov} = \pm\theta^\circ$. Logo,

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\overline{BD} + \overline{DC}}{\overline{AB}}\right) = \arcsin\left(\frac{3.5 + 1.75}{140}\right) = 2.149\% \quad (6.3)$$

E assim um mínimo inteiro é $\text{fov} = \pm\theta = \pm 3^\circ$.

As especificações são sumarizadas na Tabela 11.

Tabela 11: Especificações mínimas do RADAR automotivo

| Parâmetro do RADAR | Valor mínimo | Valor Escolhido |
|-----------------------------|---------------|-----------------|
| Alcance longitudinal máximo | 130.4m | 140m |
| fov | $\pm 3^\circ$ | $\pm 7.5^\circ$ |

Essa escolha é razoável, pois qualquer trajeto retilíneo ou curvilíneo, ilustrado em vermelho, do ponto A até algum ponto da aresta \overline{AB} terá comprimento igual ou superior ao trajeto retilíneo $\overline{AB} = 140\text{m}$ de tal maneira que para todas as possibilidades a factibilidade longitudinal de frenagem está garantida. Resta então que o fov seja amplo o suficiente para que o veículo VUT perceba um veículo GVT que esteja a sua frente segundo o trajeto vermelho no centro da faixa de rodagem.

Na Figura 50, o GVT1 representa o veículo a frente na posição real do teste, enquanto o veículo GVT2 representa a situação mais crítica possível para o teste em termos do fov e é a partir do GVT2 que se escolheu modelar o fov. O fov escolhido $\text{fov} = \pm 7.5^\circ$ é muito superior ao mínimo necessário para que em curtas distâncias o sistema seja capaz de lidar com motocicletas deslocadas em relação ao eixo de simetria da faixa de rodagem.

6.4 Ajuste proposto dos controladores

Em razão do alto rigor dos testes do Euro NCAP, os parâmetros da lei de controle de ACC foram alterados para maximizar a pontuação nos testes. Os novos parâmetros utilizados nos controladores dos testes dessa seção são listados na Tabela 12.

As mudanças nos parâmetros foram todas no sentido de aumentar a segurança. O Model-Free relacionado a aceleração permaneceu inalterado.

O *Model-Free* relacionado ao freio teve seu ganho $K_{p_{br}}$ aumentado de 8 para 15. Já o α_{br} foi alterado de 6 para 100 de tal maneira que o comportamento do pedal de freio fosse menos oscilatório.

Tabela 12: Parâmetros dos controles ULC e LLC

| Controle | Parâmetro | Valor |
|-----------------------|---------------|---------|
| Período de Amostragem | T_s | 0.02 s |
| ULC: CLF-CBF | τ_d | 2 |
| | γ | 0.00005 |
| | c_v | 0,8 |
| | p_{sc} | 100 |
| | M | 1500 Kg |
| LLC: iP | $K_{P_{th}}$ | 5 |
| | α_{th} | 4 |
| | N_{th} | 50 |
| | $K_{P_{br}}$ | 15 |
| | α_{br} | 100 |
| | N_{br} | 50 |

No controle de barreira, alterou-se o γ de 0.01 para 0.00005 para garantir que o sistema de ACC fosse capaz de lidar com as situações de velocidade inicial mais críticas.

O alcance do RADAR considerado foi alterado de 70 m para 140 m.

6.5 CCRs - Alvo Estacionário

O teste CCRs (*Car-to-Car Rear Stationary*) visa avaliar um cenário em que um veículo avança em direção a outro veículo parado e deseja-se evitar a colisão, sendo um teste que contempla tanto pistas retas quanto curvas. Nesse teste o VUT (*Vehicle Under Test*), veículo *host*, passa por 7 subtestes dentro do contexto em pauta, sendo que a sua velocidade começa com 70 km/h no primeiro subteste, e vai sendo incrementada de 10 km/h a cada subteste, apresentando 130 km/h no último.

6.5.1 Estrada Reta

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste ($score = 7$).

Ao todo são realizados 7 testes e é possível identificar um padrão no gráfico da Figura 52 que se repete a essa mesma quantidade de vezes, de tal modo que cada repetição representa um teste desse tipo para cada condição de velocidade de cruzeiro.

É visível que a barreira $h(x)$ é positiva em quase todos os testes, exceto no último que viola a condição $h(x) > 0$ rapidamente, mas volta ao patamar positivo em pouco tempo,

sempre mantendo a distância entre os veículos positiva, mostrando assim que o sistema é seguro para todos os testes apresentados na Figura 52. Note que o gráfico da barreira apresenta uma queda antes da diminuição da distância em cada teste devido à maneira como a barreira é calculada - $h(x) = D - T_d \cdot v_h$. É importante frisar que a quebra da condição da barreira no teste com maior velocidade se dá pelas limitações do controle via barreira consideradas na seção 5.4.

Na Figura 52 a distância entre os veículos começa em 140 m, pois esse é o valor de máximo alcance longitudinal do RADAR considerado. Então, quando o RADAR não identifica nada, ele assume que se houver um veículo próximo ele estará a pelo menos 140 m do veículo *host* (VUT). Em algum momento o veículo *host* alcança um veículo *leader* (GVT) na estrada tal que $v_l = 0$ km/h (velocidade do *leader*). A distância entre eles começa a cair, mas a derivada da distância tende a diminuir, pois o sistema “adaptativ” do ACC realiza a frenagem para evitar a colisão e manter a segurança.

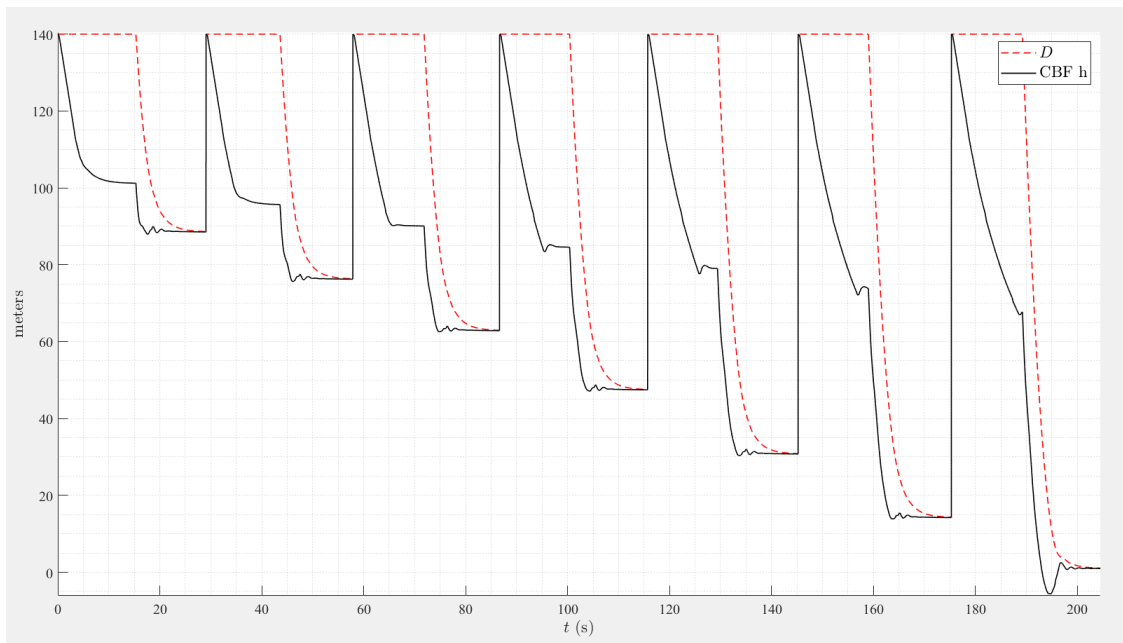


Figura 52: Teste CCRs - Estrada Reta: Distância e Barreira

Na Figura 53 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). Como é possível notar, em cada subteste a velocidade v_h sempre atinge v_c , embora para altas velocidades (últimos testes) isso não aconteça exatamente em virtude da necessidade de frear frente ao veículo *leader* parado, demonstrando de modo geral que o ACC proposto apresenta bom desempenho no rastreamento e principalmente bom compromisso com a segurança.

Vale destacar que para o veículo *host*, a velocidade do *leader* v_l só é 0 km/h no

momento de detecção do RADAR, que no primeiro subteste ocorre em aproximadamente 18s, sendo que antes disso uma boa estimativa para o sistema é adotar $v_l = v_c$.

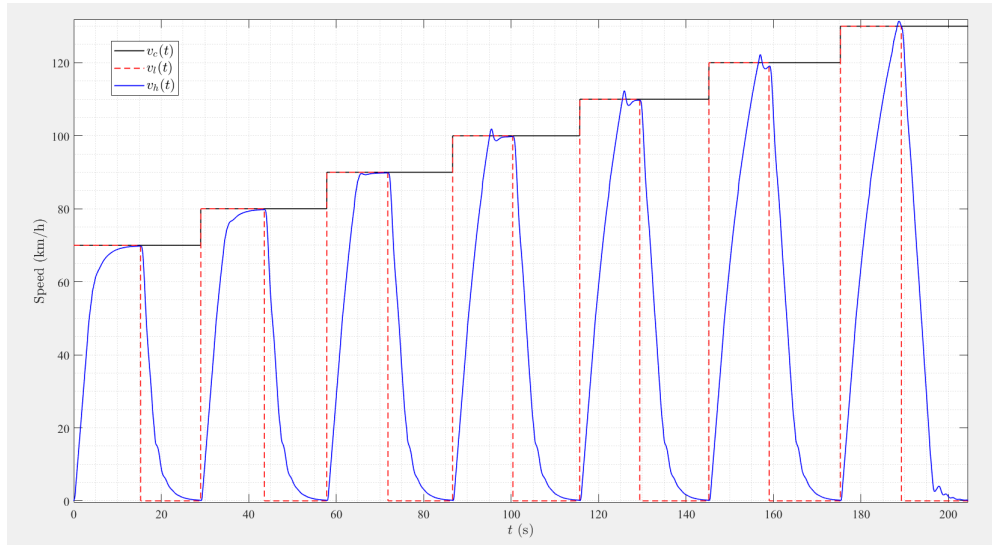


Figura 53: Teste CCRs - Estrada Retta: Velocidades

Na Figura 54 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela Malha Externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). Nota-se que a dinâmica da referência é seguida, mas há um sobressinal nos momentos de frenagem. Isso ocorre devido à necessidade de a dinâmica de frenagem ser rápida o suficiente para que se garanta a factibilidade do teste nas condições mais extremas de velocidade do teste dentre aquelas do Euro NCAP. Essa factibilidade foi analisada segundo a equação 6.1. Ênfase para as regiões de aceleração negativa, indicando o comando de freio em virtude do RADAR detectar o veículo à frente estando a uma distância de potencial colisão.

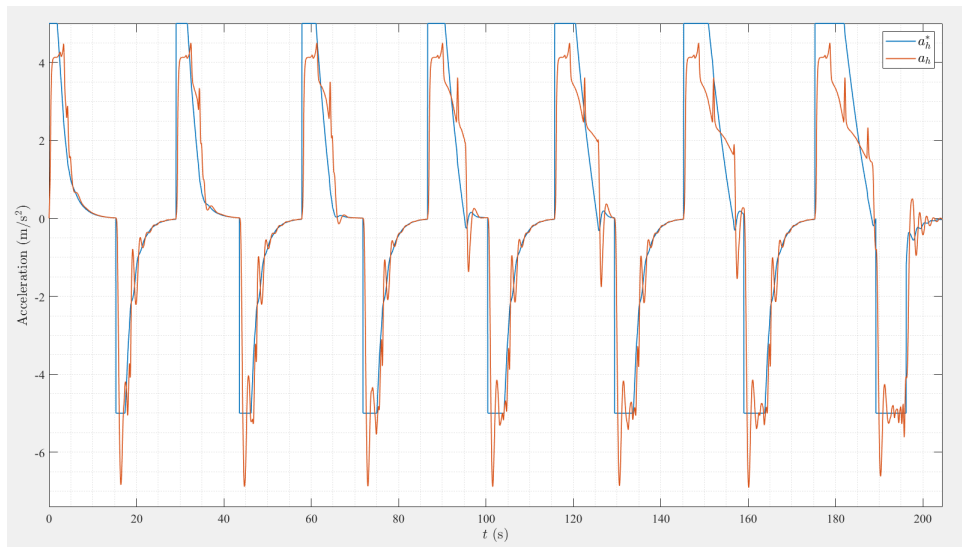


Figura 54: Teste CCRs - Estrada Retta: Acelerações VUT

Na Figura 55 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). Neste gráfico é possível perceber que a dinâmica imposta ao pedal do acelerador é suave, uma vez que o objetivo de atingir a velocidade de cruzeiro ocorre com exatidão, no entanto, a ação do freio é brusca em virtude do sistema solicitar o freio assim que detecta o veículo *leader*.

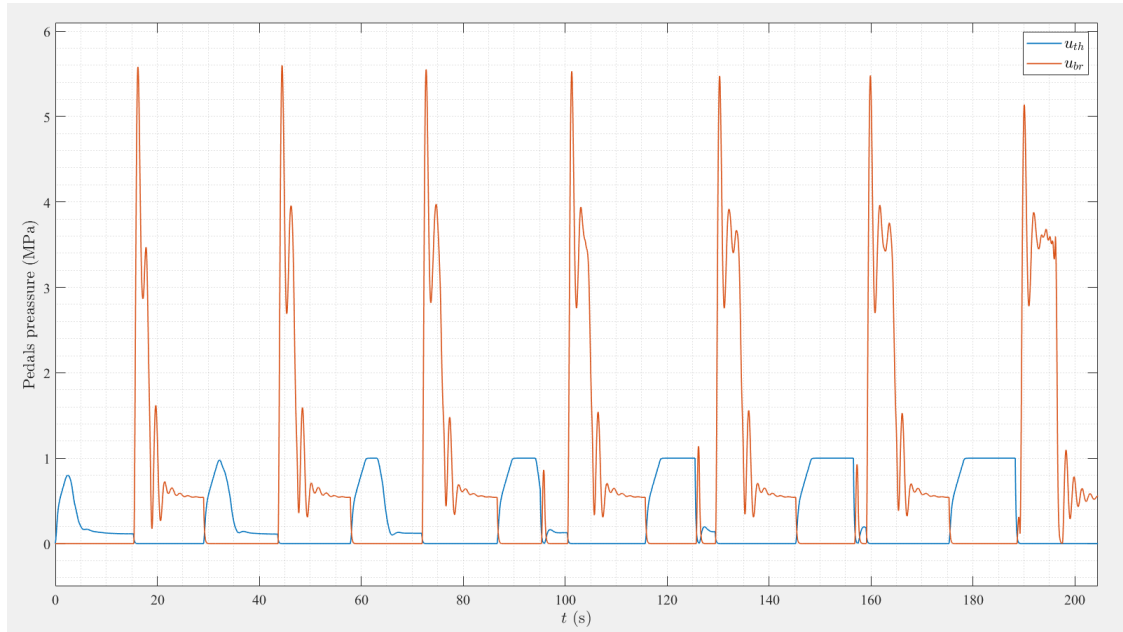


Figura 55: Teste CCRs - Estrada Reta: Pedais VUT

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 56. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto, devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, demonstrando o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa exercer mais torque para vencer a inércia.

6.5.2 Estrada Curva

O teste CCRS - Estrada Curva é o teste mais complexo da série de testes do Euro NCAP Test, pois envolve uma pista curva na qual o sistema de RADAR precisa classificar corretamente se o veículo GVT está ou não na faixa de rodagem do veículo VUT.

Implementar essa solução está fora do escopo desse trabalho, pois o correto funcionamento do RADAR é assumido como hipótese de tal maneira que a solução de ACC aqui proposta é modular e independente de qual RADAR é utilizado, desde que ele devolva a

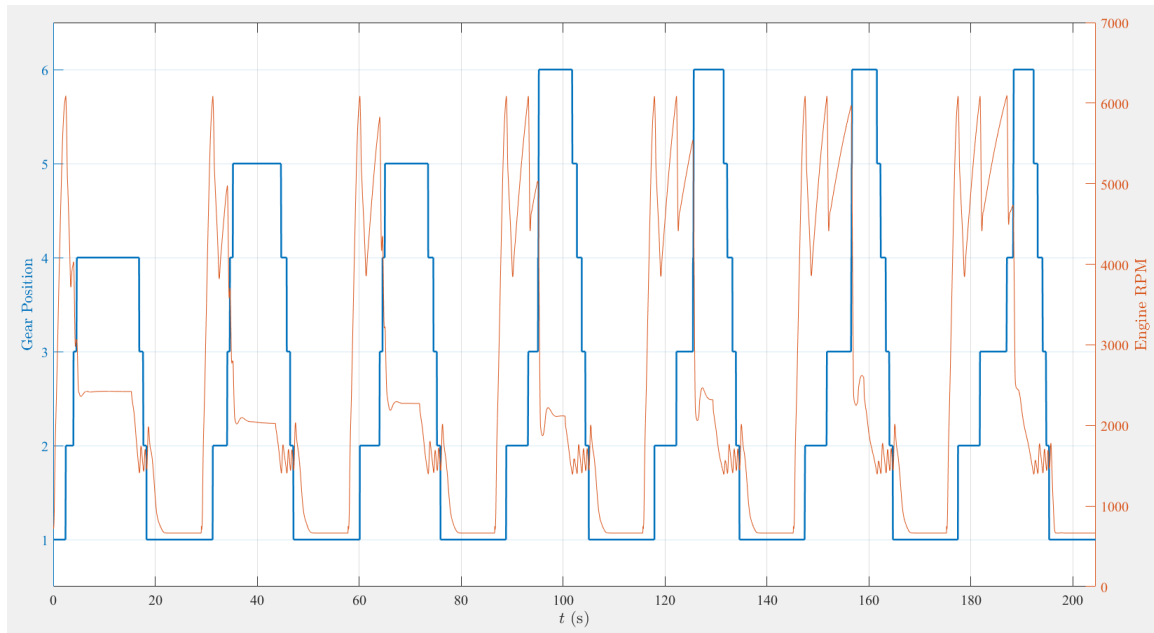


Figura 56: Teste CCRs - Estrada Reta: Marcha e Motor VUT

posição e velocidade de um veículo a frente na mesma faixa de rodagem do veículo VUT. Então por essa razão esse teste não será realizado.

Porém, a seguir será apresentado uma breve discussão de problemas e soluções para essa questão e um indicativo teórico de que o sistema aqui proposto deve funcionar para esse teste, assumindo o correto funcionamento do RADAR a ser utilizado.

6.5.2.1 Discussão do problema do RADAR e possíveis soluções

Um RADAR automotivo é especificado por seu alcance máximo e seu fov como já discutido. Porém, na prática, o RADAR faz a leitura de múltiplos objetos, sendo preciso fazer uma classificação para separar os objetos em veículos e outros. E depois fazer uma segunda classificação para descobrir se o veículo está ou não na faixa de rodagem do veículo com ACC.

Mas, ocorre que pistas curvas introduzem um problema adicional para o sistema, pois o ACC é um sistema pensado para funcionar somente com o RADAR e este não consegue medir os limites da faixa de rodagem. Por isso, classificar se um veículo líder está na sua faixa de rodagem ou não é uma tarefa complexa. Na Figura 57 retirada do protocolo Euro NCAP [4] é evidente que o veículo GVT está na mesma faixa de rodagem do veículo VUT, mas por conta do traçado curvilíneo existe uma ilusão de que o veículo estaria na outra faixa, o que cria uma dificuldade adicional para o problema de classificação do RADAR.

Visando já encaminhar os trabalhos futuros a serem desenvolvidos a partir desse

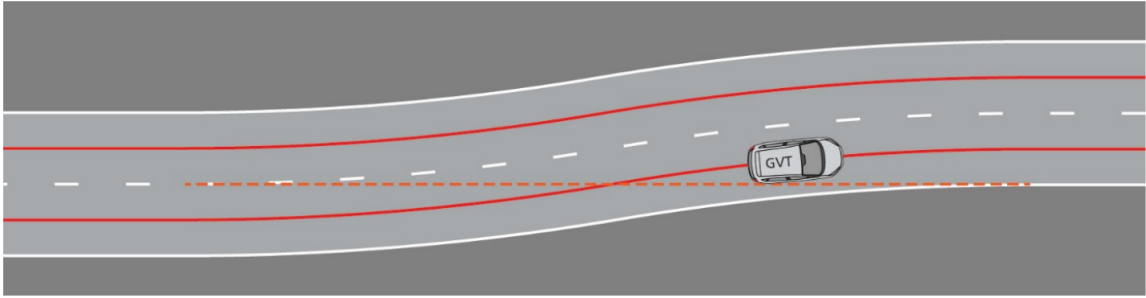


Figura 57: Teste CCRS - Estrada Curva: Protocolo Euro NCAP. Extraído de [4].

trabalho, ilustra-se uma possível solução inicial para o problema.

Vale ressaltar que por conta do Efeito Doppler um RADAR é capaz de fornecer a posição de um objeto bem como seu vetor velocidade e não apenas o módulo dessa velocidade.

- **Veículo na contramão**

Uma solução simples seria medir a velocidade relativa entre o veículo com ACC e o veículo *target* e com base na velocidade máxima da via, se a velocidade relativa resultasse aproximadamente no dobro da velocidade máxima isso indicaria que o veículo a frente é, na verdade, um veículo do outro lado da via trafegando em sentido contrário.

- **Trajeto curvo**

Embora não seja possível medir o desenho no solo dos limites da faixa de rodagem, seria possível medir o vetor velocidade do veículo com ACC e o vetor velocidade do veículo Líder e se os vetores não forem aproximadamente paralelos isso pode ser usado para estimar o raio de curvatura do traçado da pista e estimar, sabendo a largura padrão da faixa de rodagem, se o veículo líder pertence ou não a faixa de rodagem do veículo com ACC.

- **Erros de classificação**

Além de classificar de forma binária, sim ou não, se o veículo líder pertence a mesma faixa de rodagem do veículo com ACC seria possível atribuir uma probabilidade dessa previsão estar errada para cada veículo detectado e caso essa probabilidade fosse mais alta do que uma probabilidade aceitável, então o veículo com ACC poderia realizar uma frenagem suave de maneira preditiva até que fosse possível ter mais certeza sobre a correta classificação desse veículo a frente. Isso aumentaria

a segurança do sistema sem prejudicar muito o desempenho do veículo no que se refere a manter a velocidade de cruzeiro desejada.

- **Veículo e outros objetos**

Essa parte do problema é demasiadamente complexa e demanda uma revisão da literatura existente sobre o tema.

6.5.2.2 Demonstração teórica de que o sistema de ACC apresentado deve funcionar para o teste CCRS - Estrada Curva

Voltando a Figura 50 é possível ver que a trajetória curvilínea vermelha é necessariamente maior do que o lado $\overline{AB} = 140\text{m}$ do triângulo ABC. Logo, o veículo VUT que percorre a trajetória curvilínea dotado de RADAR com fov suficiente para detectar o veículo GVT necessariamente percorrerá um percurso maior que 140m. E como demonstrado na seção 6.3 essa distância é suficiente para frear e manter uma distância segura do veículo VUT.

O resultado da subseção 6.5.1 em que o sistema ACC aqui desenvolvido apresenta resultado favorável na velocidade máxima do teste corrobora essa demonstração teórica que fica condicionada ao correto desenvolvimento do sistema de classificação do RADAR a ser feito em um trabalho futuro.

Observação importante: Na seção 5.6 foi realizado um teste em pista curvilínea. Todavia, naquele cenário de testes a questão da classificação da faixa de rodagem não foi levada em consideração sendo esse o motivo daquele teste ter sido realizado e o teste desta seção não.

6.6 CCRm - Alvo em Movimento

O teste CCRm (*Car-to-Car Rear Moving*) visa avaliar um cenário em que um veículo avança em direção a outro veículo que se desloca com velocidade constante e deseja-se evitar a colisão. Esse teste apresenta dois cenários possíveis, um em que o GVT (**Global Vehicle Target**), veículo *leader*, apresenta velocidade constante de 20 km/h, e outro em que o GVT apresenta 60 km/h. Nos dois cenários há 6 subtestes em que a velocidade do VUT varia, partindo de 80 km/h no primeiro e atingindo 130 km/h no último, incremento de 10 km/h entre subtestes.

6.6.1 GVT 20 km/h

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste ($score = 6$).

Ao todo são realizados 6 testes e é possível identificar um padrão nos gráficos da Figura 58 que se repete a essa mesma quantidade de vezes, de tal modo que cada repetição representa um teste desse tipo para cada condição de velocidade de cruzeiro.

É visível que a barreira $h(x)$ é sempre positiva para todos os testes, mostrando assim que o sistema é seguro para todos os testes apresentados na Figura 58. Note que o gráfico da barreira apresenta uma queda antes da diminuição da distância em cada teste devido à maneira como a barreira é calculada - $h = D - T_d \cdot v_h$.

Na Figura 58 a distância entre os veículos começa em 140 m, pois esse é o valor de máximo alcance longitudinal do RADAR considerado. Então, quando o RADAR não identifica nada, ele assume que se houver um veículo próximo ele estará a pelo menos 140 m do veículo *host* na mesma faixa de rodagem. Em algum momento o veículo *host* alcança um veículo *leader* na estrada tal que $v_l = 20$ km/h. A distância entre eles começa a cair, mas a derivada da distância tende a diminuir, pois o sistema “adaptativo” do ACC realiza a frenagem para evitar a colisão e manter a segurança.

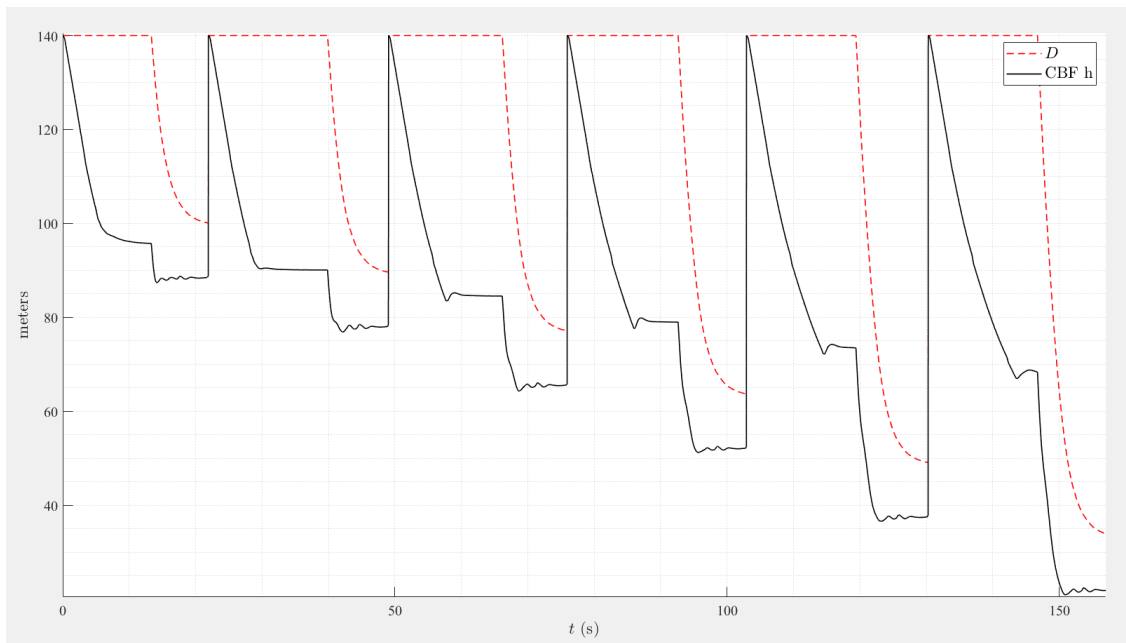


Figura 58: Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Distância e Barreira

Na Figura 59 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). Como é possível notar, em cada subteste a

velocidade v_h sempre atinge v_c , o que demonstra bom desempenho no rastreamento do objetivo. Vale destacar que para o veículo *host*, a velocidade do *leader* v_l só é 20 km/h no momento de detecção do RADAR, que no primeiro subteste ocorre em aproximadamente 12s, sendo que antes disso uma boa estimativa para o sistema é adotar $v_l = v_c$.

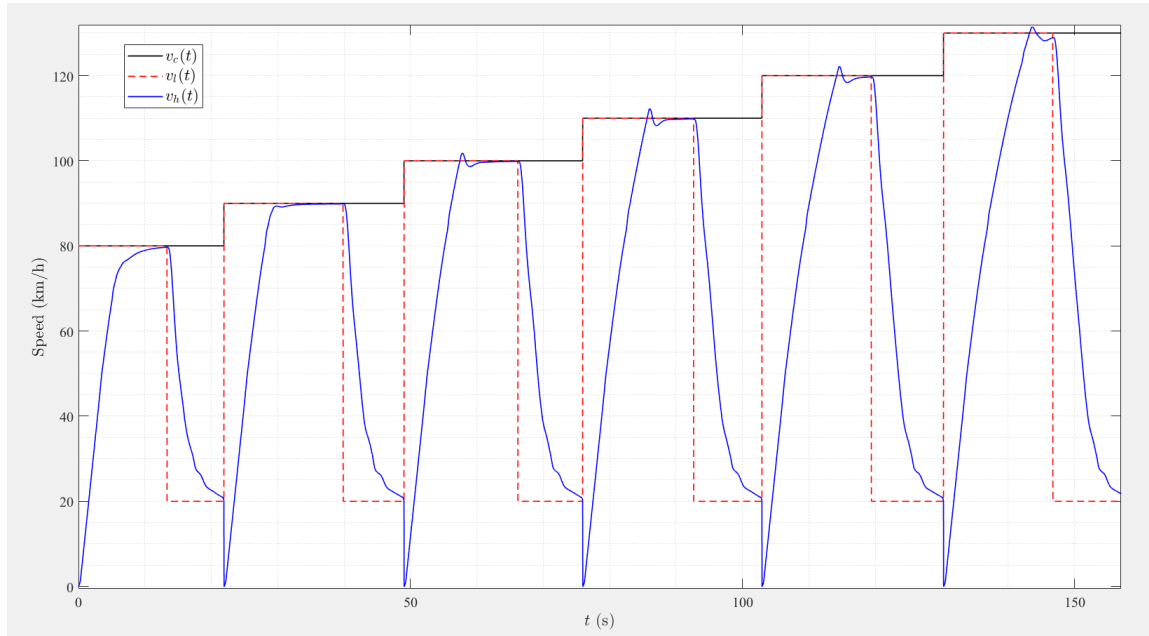


Figura 59: Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Velocidades

Na Figura 60 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela malha externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). Nota-se que a dinâmica da referência é seguida, mas há um sobressinal nos momentos de frenagem. Isso ocorre devido à necessidade de a dinâmica de frenagem ser rápida o suficiente para que se garanta a factibilidade do teste nas condições mais extremas de velocidade do teste mais difícil dentre aqueles do Euro NCAP. Ênfase para as regiões de aceleração negativa, indicando o comando de freio em virtude do RADAR detectar o veículo à frente estando a uma distância de potencial colisão.

Na Figura 61 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). Neste gráfico é possível perceber que a dinâmica imposta ao pedal do acelerador é suave, uma vez que o objetivo de atingir a velocidade de cruzeiro ocorre com exatidão, no entanto, a ação do freio é brusca em virtude do sistema solicitar freio assim que detecta o veículo *leader*.

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 62. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto,

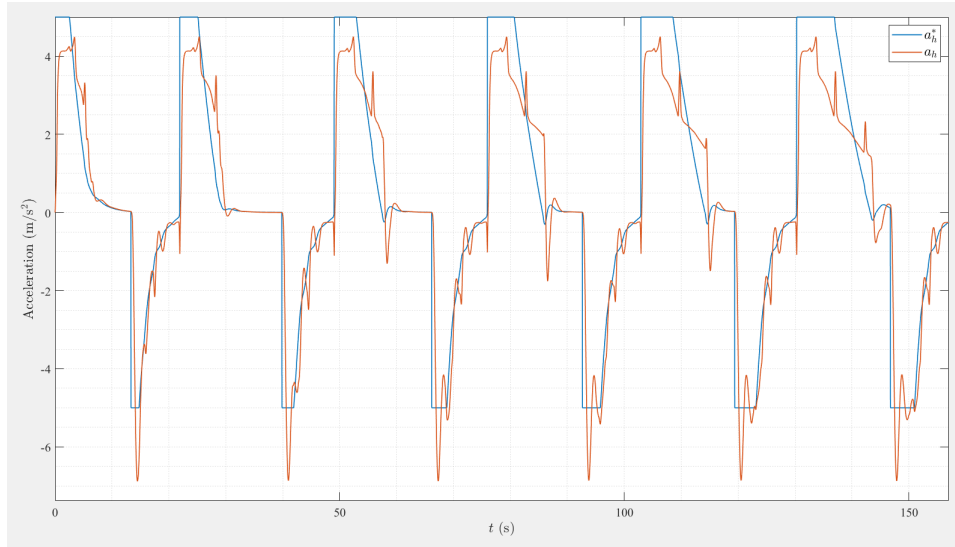


Figura 60: Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Acelerações VUT

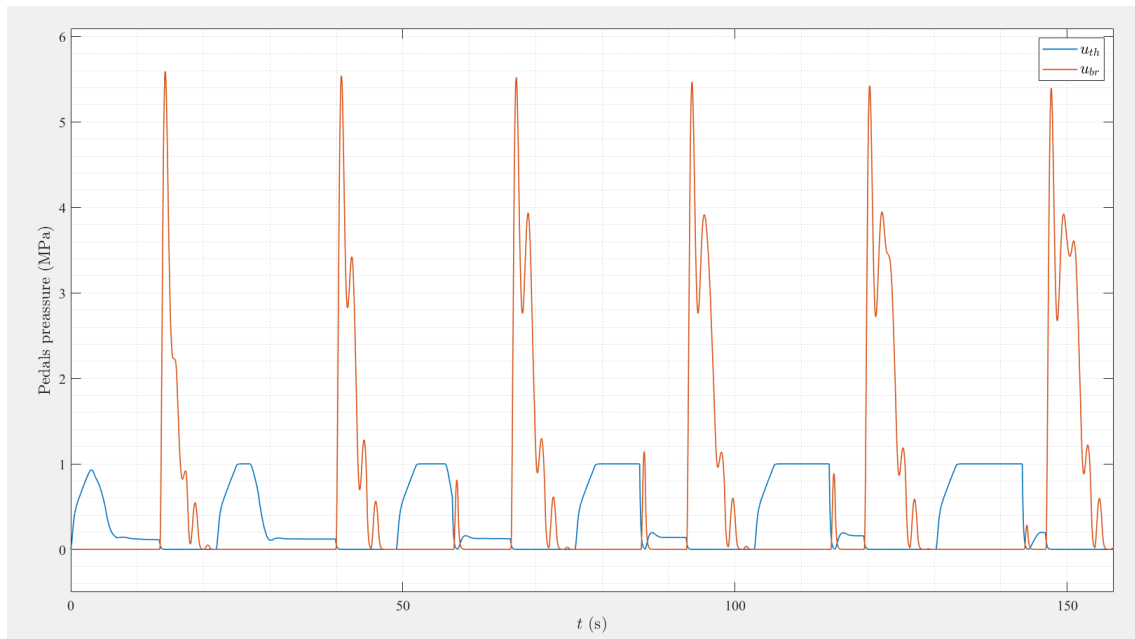


Figura 61: Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Pedais VUT

devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, demonstrando o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa exercer mais torque para vencer a inércia.

6.6.2 GVT 60 km/h

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste ($score = 6$).

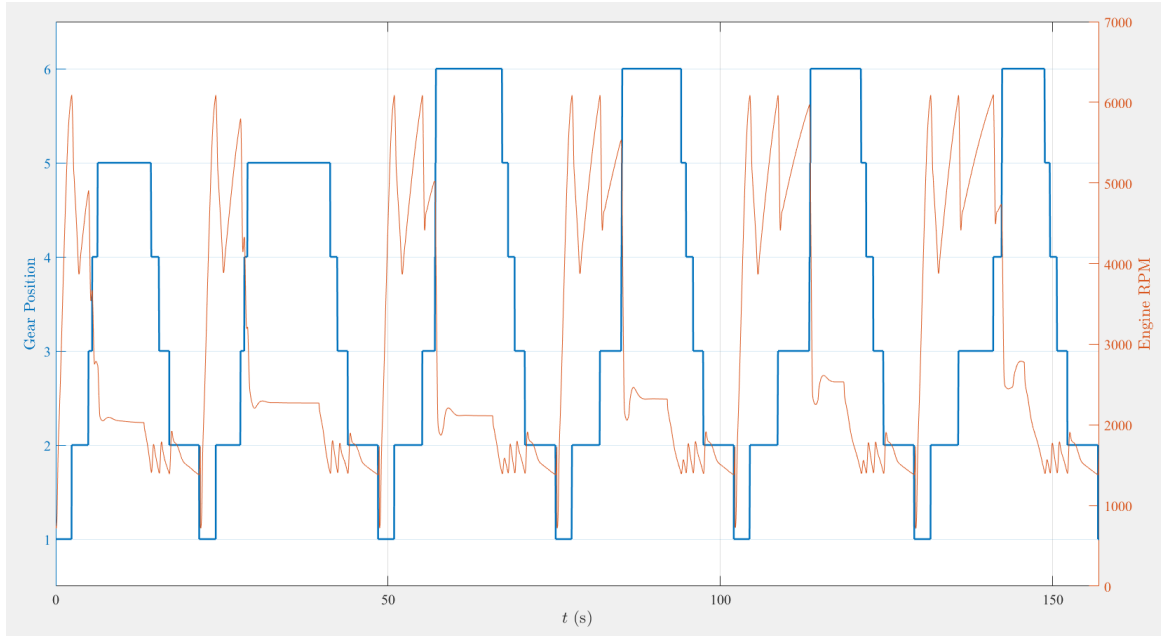


Figura 62: Teste CCRm - GVT @ 20 km/h: Marcha e Motor VUT

Ao todo são realizados 6 testes e é possível identificar um padrão nos gráficos da Figura 63 que se repete essa mesma quantidade de vezes de tal modo que cada repetição representa um teste desse tipo para cada condição de velocidade de cruzeiro.

É visível que a barreira h é sempre positiva para todos os testes, mostrando assim que o sistema é seguro para todos os testes apresentados na Figura 63. Note que o gráfico da barreira apresenta uma queda antes da diminuição da distância em cada teste devido à maneira como a barreira é calculada - $h = D - T_d \cdot v_h$.

Na Figura 63 a distância entre os veículos começa em 140 metros, pois esse é o valor de máximo alcance longitudinal do RADAR considerado. Então, quando o RADAR não identifica nada, ele assume que se houver um veículo próximo ele estará a pelo menos 140 metros do veículo *host*. Em algum momento o veículo *host* alcança um veículo *leader* na estrada tal que $v_l = 60\text{km/h}$. A distância entre eles começa a cair, mas a derivada da distância tende a diminuir, pois o sistema “adaptativo” do ACC realiza a frenagem para evitar a colisão e manter a segurança.

Na Figura 64 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). Como é possível notar, em cada subteste a velocidade v_h sempre atinge v_c , o que demonstra bom desempenho no rastreamento do objetivo. Vale destacar que para o veículo *host*, a velocidade do *leader* v_l só é 60 km/h no momento de detecção do RADAR, que no primeiro subteste ocorre em 40s, sendo que antes disso uma boa estimativa para o sistema é adotar $v_l = v_c$.

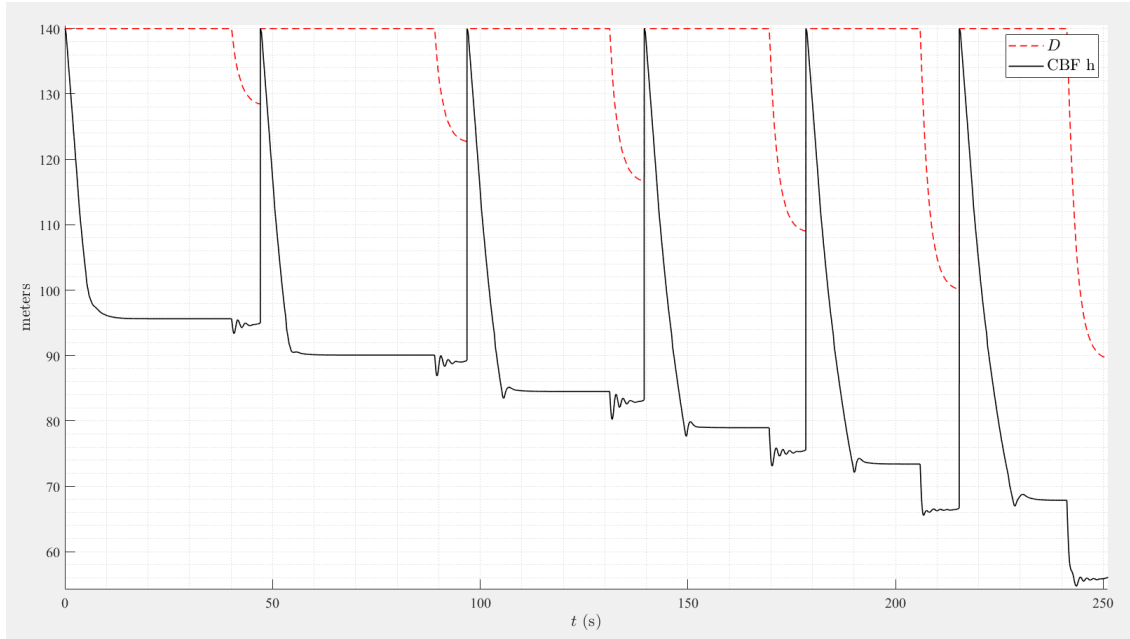


Figura 63: Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Distância e Barreira

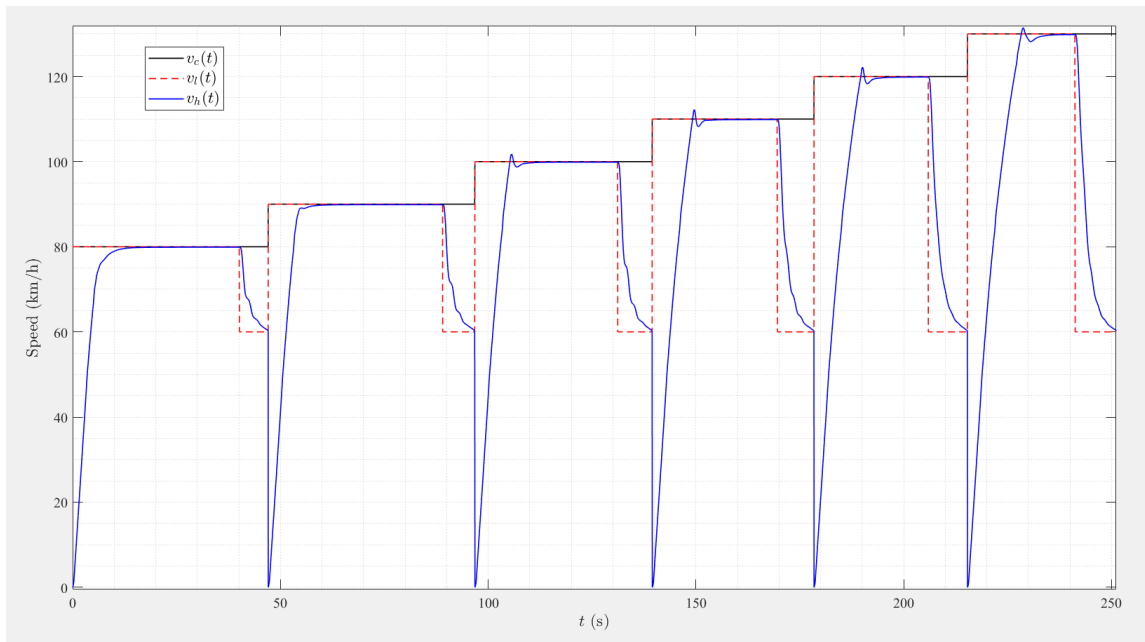


Figura 64: Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Velocidades

Na Figura 65 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela malha externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). Nota-se que a dinâmica da referência é seguida, mas há um sobressinal nos momentos de frenagem. Isso ocorre devido à necessidade de a dinâmica de frenagem ser rápida o suficiente para que se garanta a factibilidade do teste nas condições mais extremas de velocidade do teste mais difícil dentre aqueles do Euro NCAP. Ênfase para as regiões de aceleração negativa, indicando o comando de freio em virtude do RADAR detectar o veículo à frente estando

a uma distância de potencial colisão.

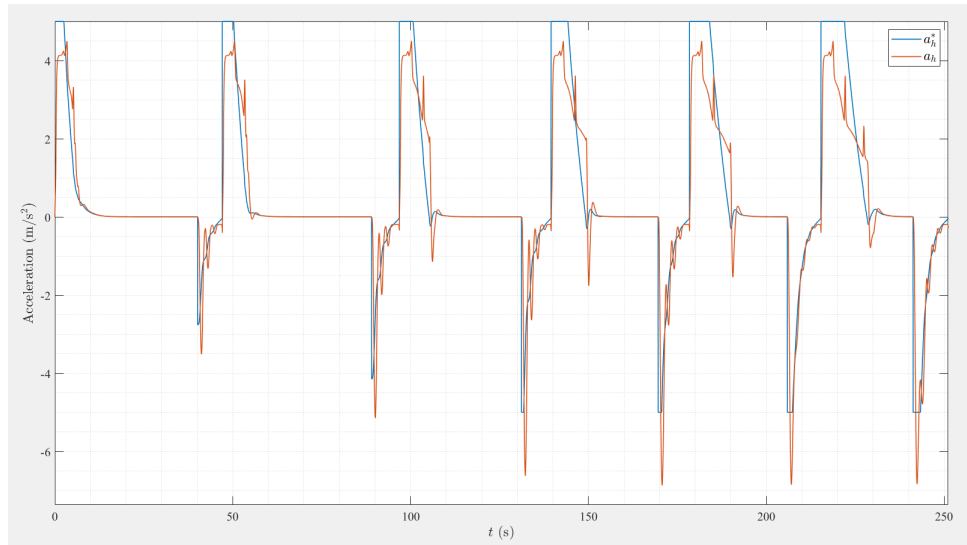


Figura 65: Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Acelerações VUT

Na 66 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). Neste gráfico é possível perceber que a dinâmica imposta ao pedal do acelerador é suave, uma vez que o objetivo de atingir a velocidade de cruzeiro ocorre com exatidão, no entanto, a ação do freio é brusca em virtude do sistema solicitar freio assim que detecta o veículo *target*.

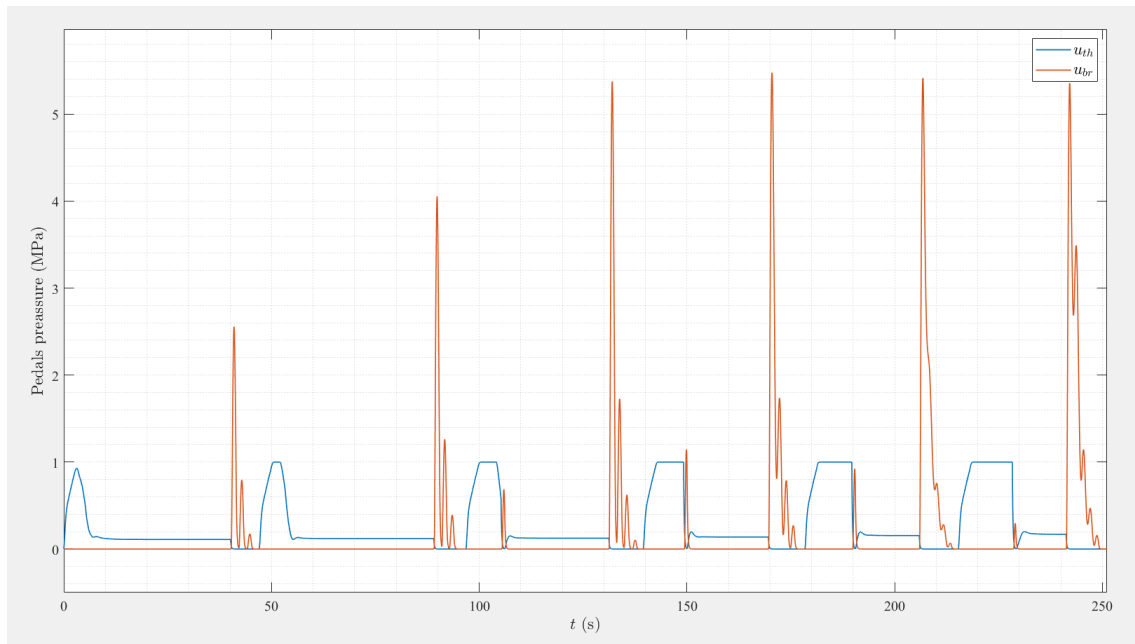


Figura 66: Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Pedais VUT

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 67. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições

de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto, devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, demonstrando o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa exercer mais torque para vencer a inércia.

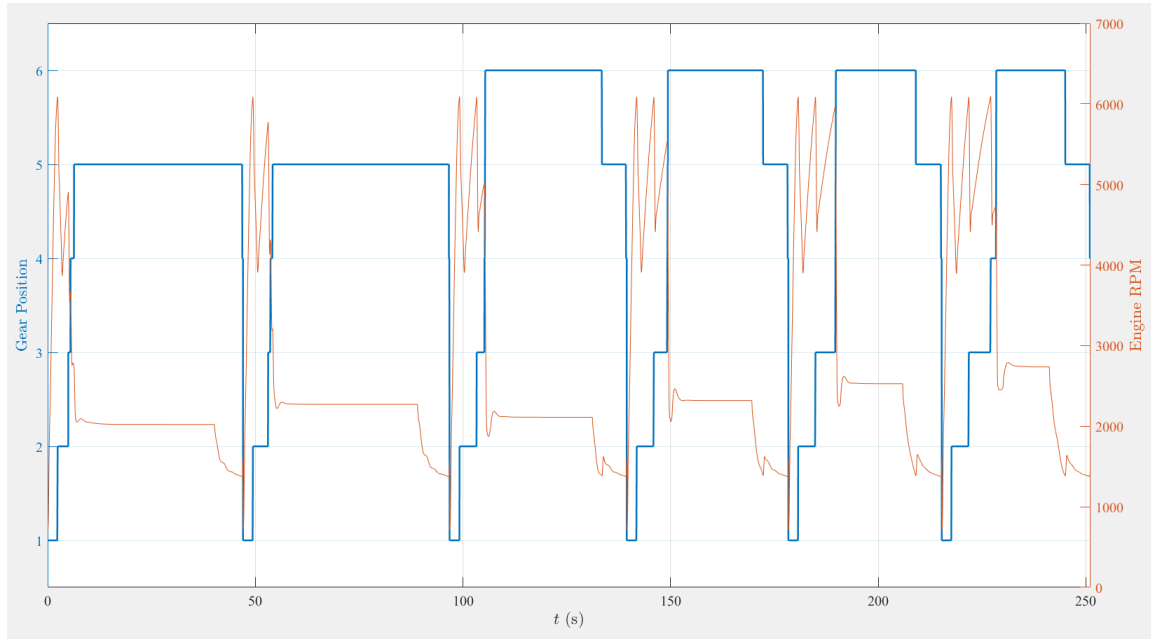


Figura 67: Teste CCRm - GVT @ 60 km/h: Marcha e Motor VUT

6.7 CCRb - Alvo Freando

O teste CCRb (*Car-to-Car Rear Braking*) visa avaliar um cenário em que um veículo avança em direção a outro veículo que se desloca com velocidade constante e depois desacelera, sendo que deseja-se evitar a colisão. Nesse teste o VUT está a 55 km/h enquanto o GVT está a 50 km/h. O que varia neste teste é a frenagem em m/s^2 realizada pelo GVT e a distância D entre veículos que a frenagem passa a ocorrer.

6.7.1 Frenagem de $-2 m/s^2$ para $D = 40 m$

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste ($score = 1$).

No gráfico da Figura 68 é possível observar que no instante que o veículo *host* detecta o *leader*, em aproximadamente 30s, cuja distância entre eles é 40 metros, o veículo *leader* freia com $-2 m/s^2$, mas a barreira não é violada, garantindo a segurança do motorista.

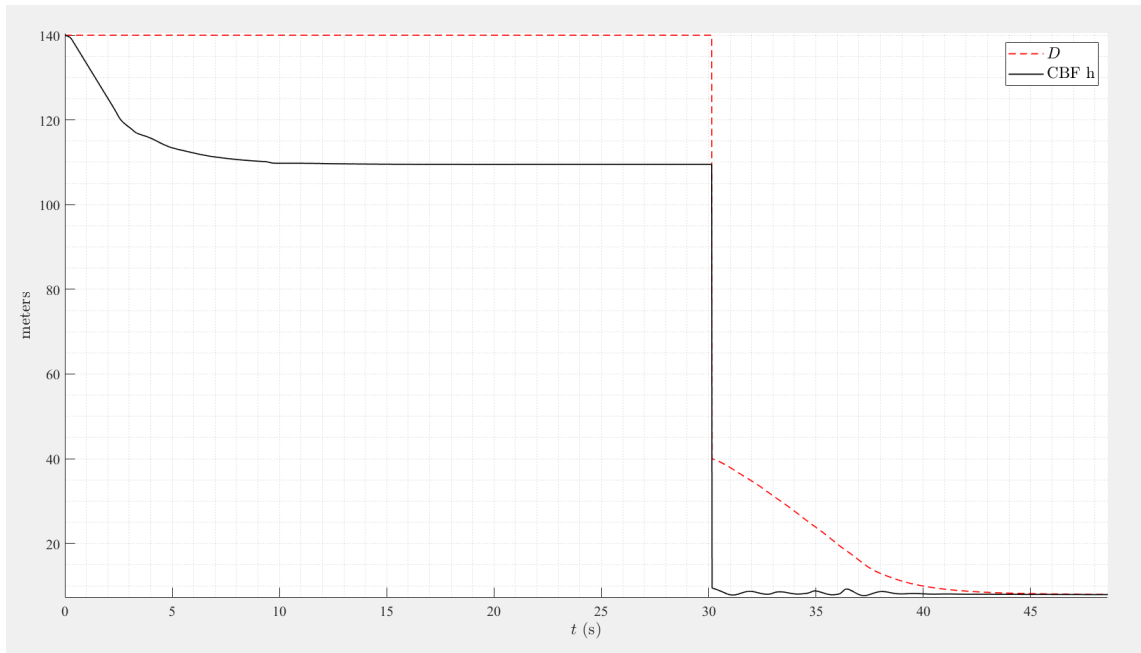


Figura 68: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Distância e Barreira

Na Figura 69 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). Como é possível notar, a velocidade v_h atinge v_c , o que demonstra bom desempenho no rastreamento do objetivo. No entanto, diante da frenagem do veículo *leader*, o sistema precisa abandonar o rastreamento da referência, priorizando a segurança. Vale destacar que para o veículo *host*, a velocidade do *leader* v_l só é 50 km/h no momento de detecção do RADAR, que ocorre em aproximadamente 30s, sendo que antes disso uma boa estimativa para o sistema é adotar $v_l = v_c$.

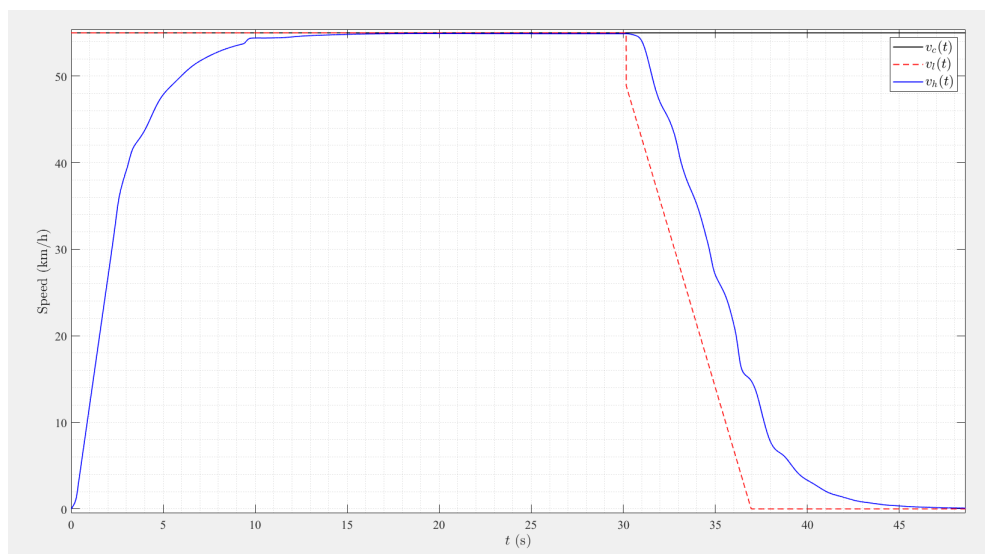


Figura 69: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Velocidades

Na Figura 70 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$)

enviado pela malha externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). Nota-se que a dinâmica da referência é seguida, mas há um sobressinal no momento de frenagem. Isso ocorre devido à necessidade de a dinâmica de frenagem ser rápida o suficiente para que se garanta a factibilidade do teste. Ênfase para a região de aceleração negativa, indicando o comando de freio em virtude do RADAR detectar o veículo à frente estando a uma distância de potencial colisão.

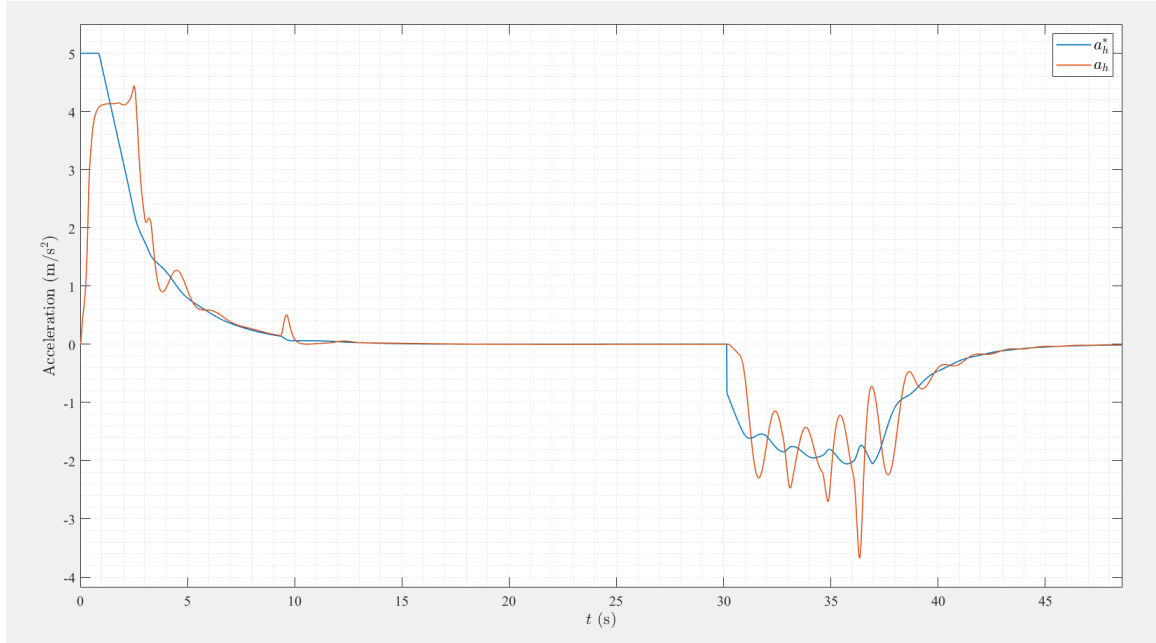


Figura 70: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Acelerações VUT

Na Figura 71 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). Neste gráfico é possível perceber que a dinâmica imposta ao pedal do acelerador é suave, uma vez que o objetivo de atingir a velocidade de cruzeiro ocorre com exatidão, no entanto, a ação do freio é um pouco mais brusca em virtude do sistema solicitar freio assim que detecta o veículo *leader*.

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 72. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto, devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, o que demonstra o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa exercer mais torque para vencer a inércia.

Tendo passado no teste com uma distância relativa de 40 metros no momento da frenagem, testa-se a seguir para uma distância de 12 metros.

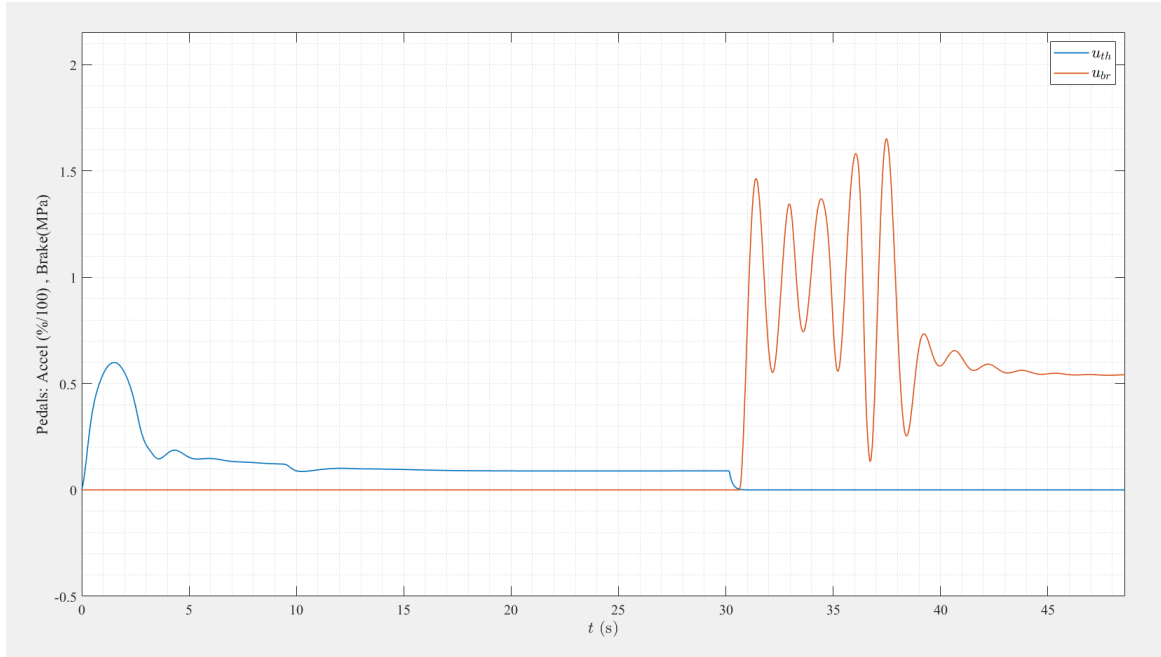


Figura 71: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Pedais VUT

6.7.2 Frenagem de -2 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste ($score = 1$).

No gráfico da Figura 73 é possível observar que no instante que o veículo *host* detecta o *leader*, em aproximadamente 65s, cuja distância entre eles é 12 metros, o veículo *leader* freia com -2 m/s^2 , a distância é curta o bastante para fazer com que a barreira seja violada, ou seja, atinja valor negativo, porém o sistema é robusto o bastante para reverter tal cenário e manter a distância relativa entre os veículos sempre positiva, garantindo a segurança.

Na Figura 74 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). Como é possível notar, a velocidade v_h atinge v_c , o que demonstra boa performance no rastreamento do objetivo. No entanto, diante da frenagem do veículo *leader*, o sistema precisa abandonar o rastreamento da referência, priorizando a segurança. Vale destacar que para o veículo *host*, a velocidade do *leader* v_l só é 50 km/h no momento de detecção do RADAR, que ocorre em aproximadamente 65s, sendo que antes disso uma boa estimativa para o sistema é adotar $v_l = v_c$.

Na Figura 75 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela Malha Externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). Nota-se que a dinâmica da referência é seguida, mas há um sobressinal no momento de frenagem. Isso

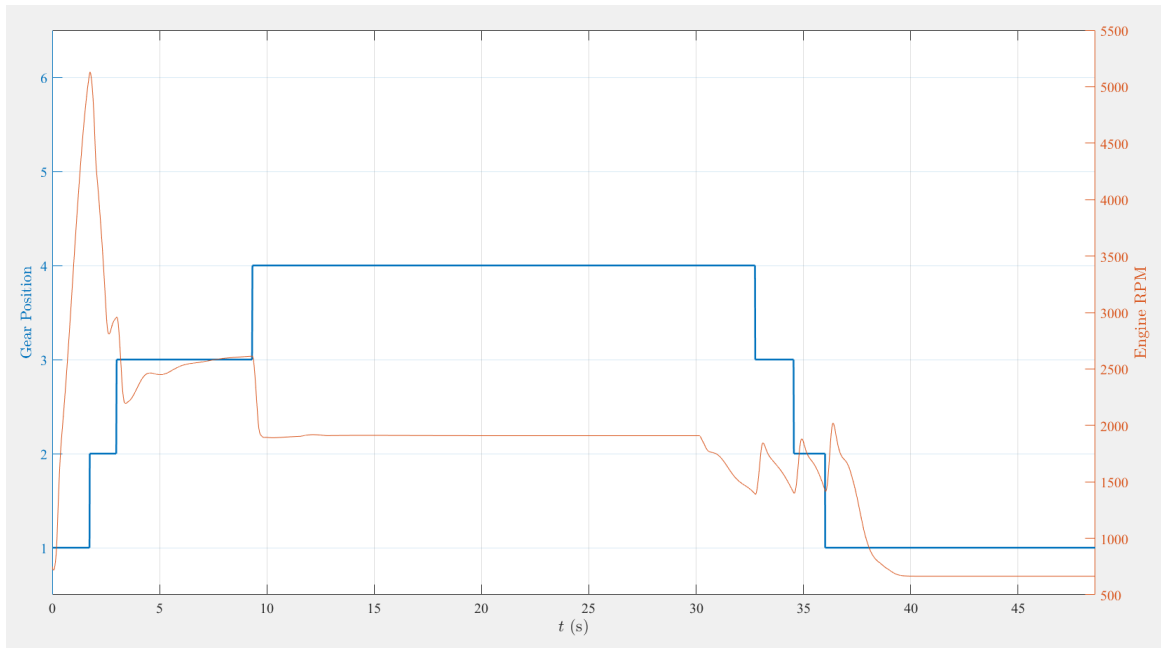


Figura 72: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Marcha e Motor VUT

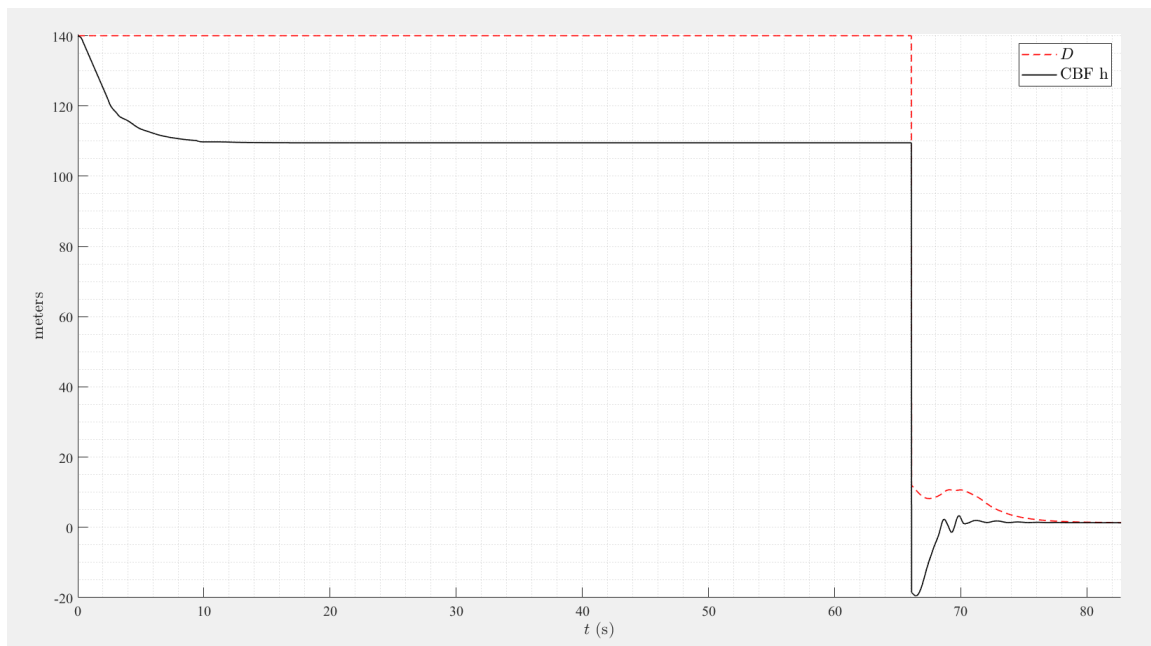


Figura 73: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$: Distância e Barreira

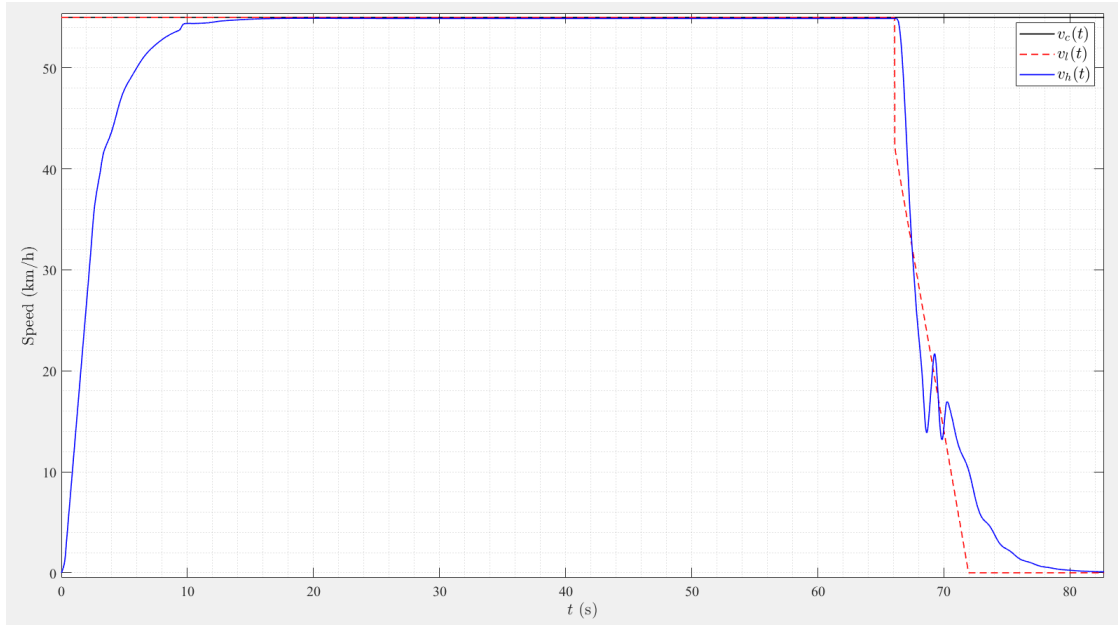


Figura 74: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$: Velocidades

ocorre devido à necessidade de a dinâmica de frenagem ser rápida o suficiente para que se garanta a factibilidade do teste. Ênfase para a região de aceleração negativa, indicando o comando de freio em virtude do RADAR detectar o veículo à frente estando a uma distância de potencial colisão.

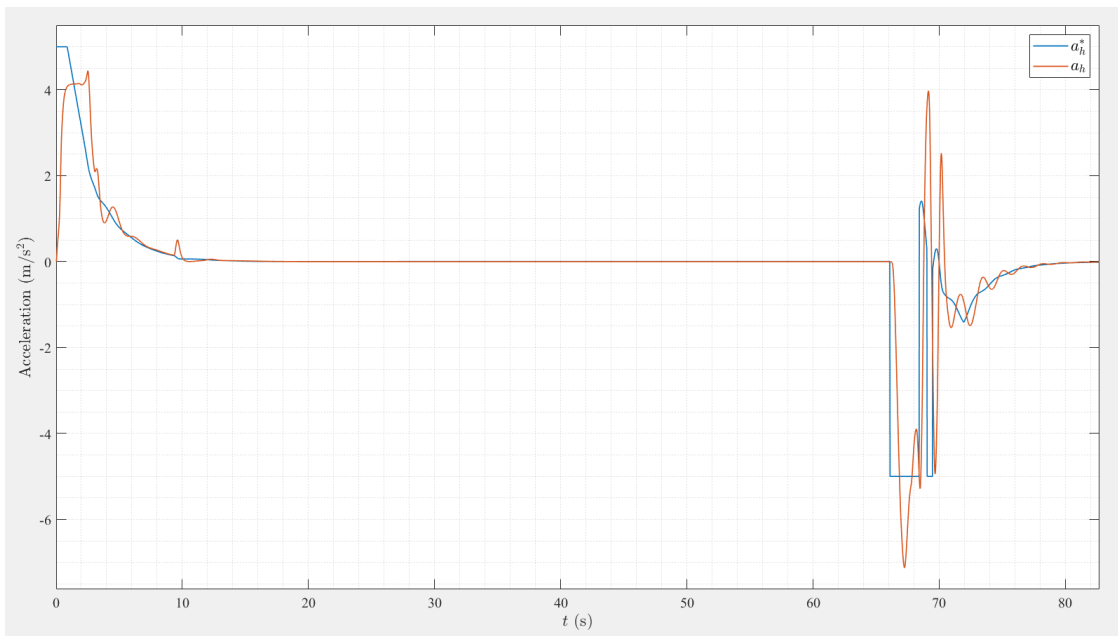


Figura 75: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$: Acelerações VUT

Na Figura 76 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). Neste gráfico é possível perceber que a dinâmica imposta ao pedal do acelerador é suave, uma vez que o objetivo de atingir a velocidade de cruzeiro

ocorre com exatidão, no entanto, a ação do freio é brusca em virtude do sistema solicitar freio assim que detecta o veículo *leader*.

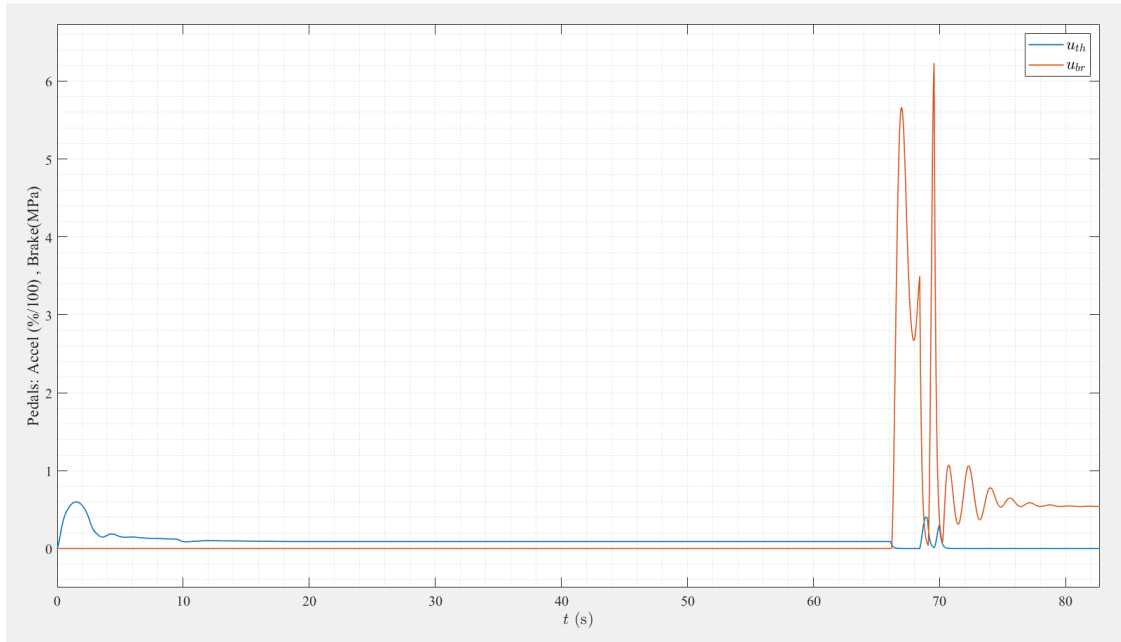


Figura 76: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$: Pedais VUT

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 77. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto, devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, o que demonstra o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa exercer mais torque para vencer a inércia.

6.7.3 Frenagem de -6 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste (score = 1).

No gráfico da Figura 78 é possível observar que no instante que o veículo *host* detecta o *leader*, em aproximadamente 30s, cuja distância entre eles é 40 metros, o veículo *leader* freia com -6 m/s^2 , mas a barreira não é violada, garantindo a segurança do motorista.

Na Figura 79 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). Como é possível notar, a velocidade v_h atinge v_c , o que demonstra boa performance no rastreamento do objetivo. No entanto, diante

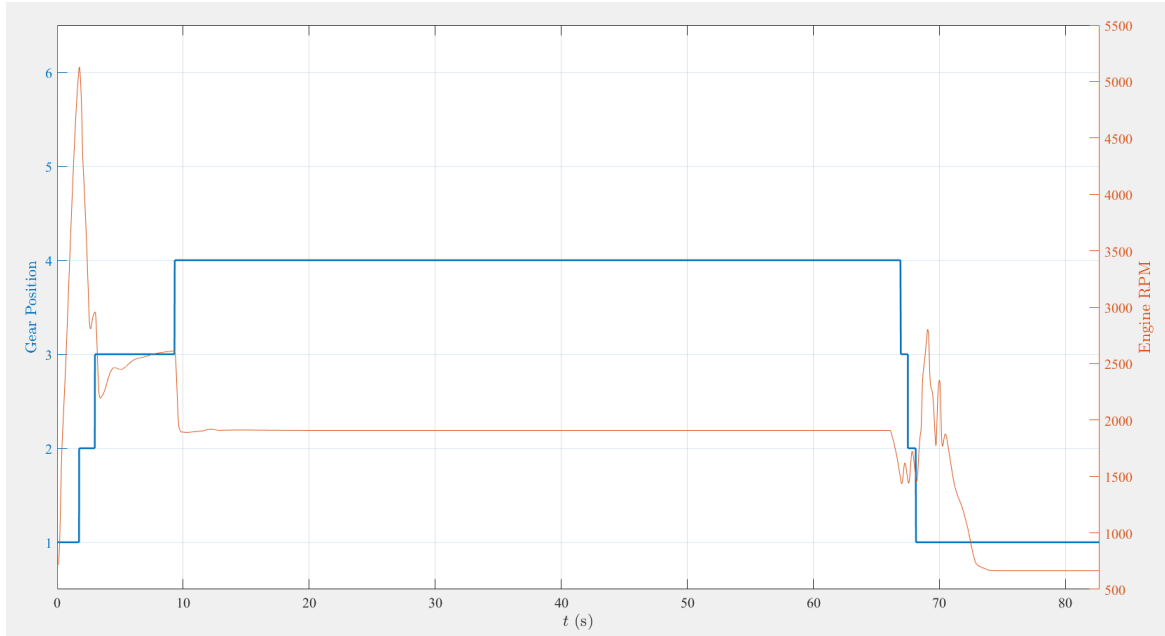


Figura 77: Teste CCRb - Frenagem -2 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$: Marcha e Motor VUT

da frenagem do veículo *leader*, o sistema precisa abandonar o rastreamento da referência, priorizando a segurança. Vale destacar que para o veículo *host*, a velocidade do leader v_l só é 50 km/h no momento de detecção do RADAR, que ocorre em aproximadamente 30s , sendo que antes disso uma boa estimativa para o sistema é adotar $v_l = v_c$.

Na Figura 80 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela Malha Externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). Nota-se que a dinâmica da referência é seguida. Ênfase para a região de aceleração negativa, indicando o comando de freio em virtude do RADAR detectar o veículo à frente estando a uma distância de potencial colisão.

Na Figura 81 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). Neste gráfico é possível perceber que a dinâmica imposta ao pedal do acelerador é suave, uma vez que o objetivo de atingir a velocidade de cruzeiro ocorre com exatidão, no entanto, a ação do freio é um pouco mais brusca em virtude do sistema solicitar freio assim que detecta o veículo *leader*.

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 82. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto, devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, o que demonstra o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa

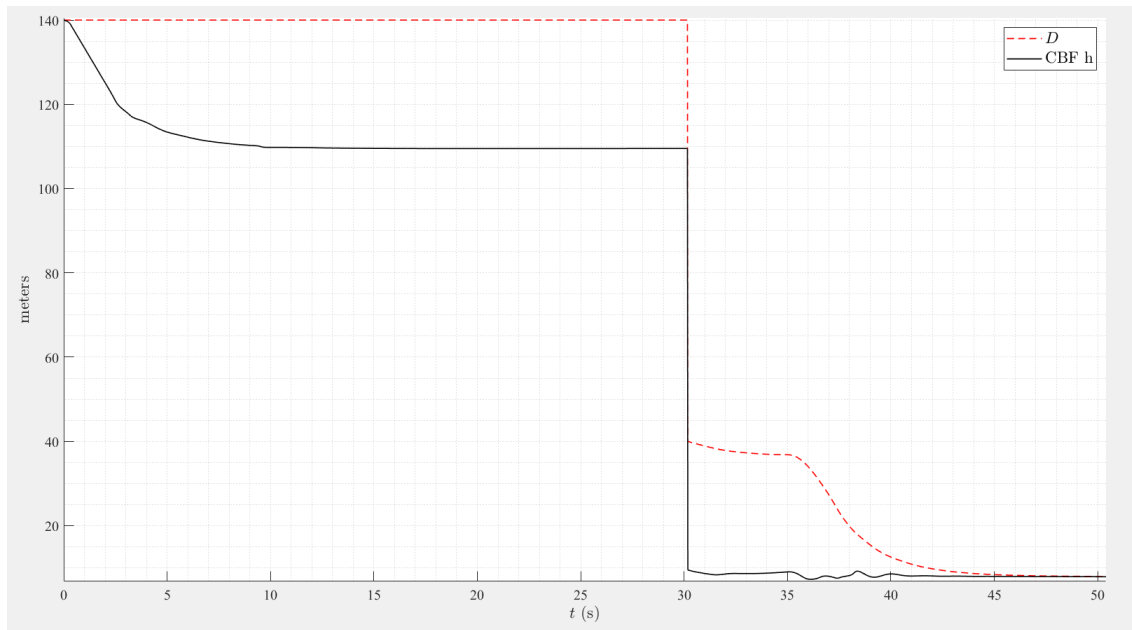


Figura 78: Teste CCRb - Frenagem -6 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Distância e Barreira

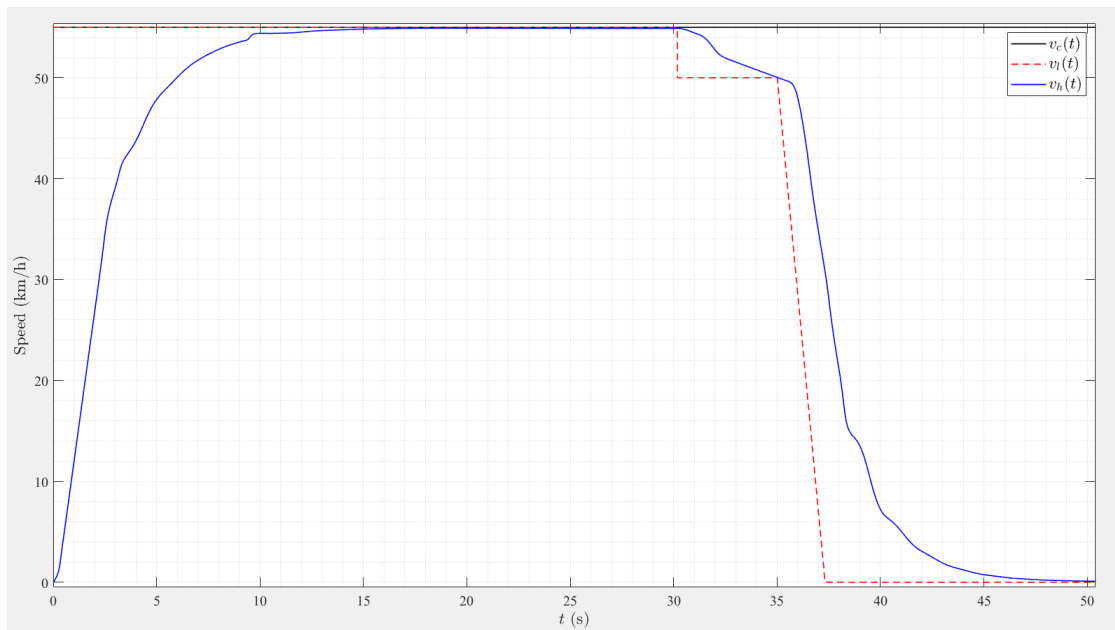


Figura 79: Teste CCRb - Frenagem -6 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Velocidades

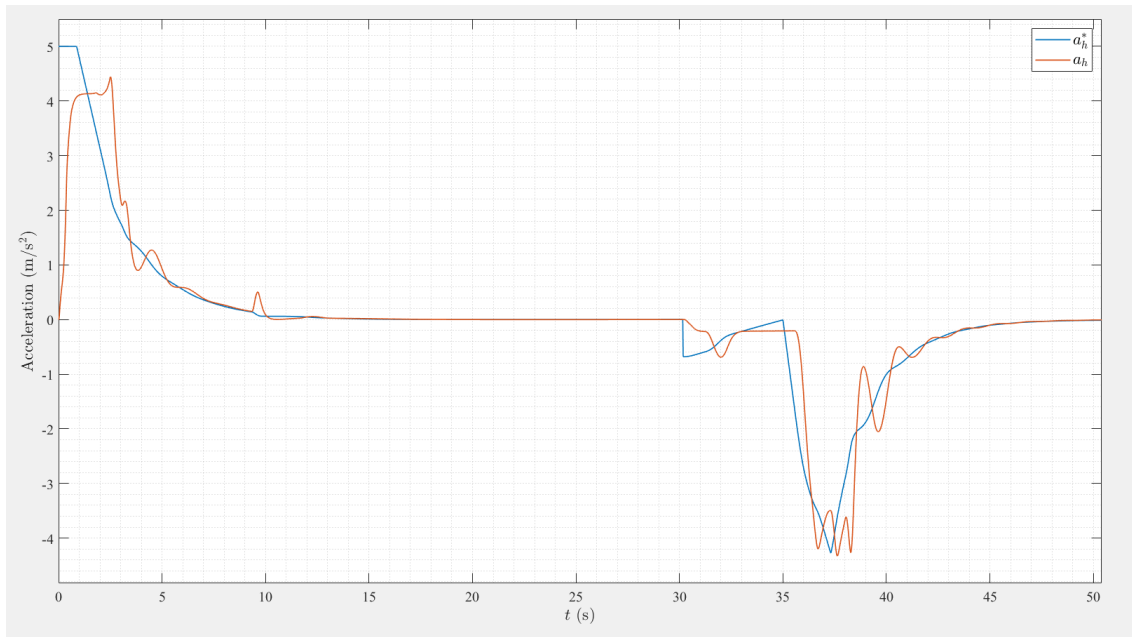


Figura 80: Teste CCRb - Frenagem -6 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Acelerações VUT

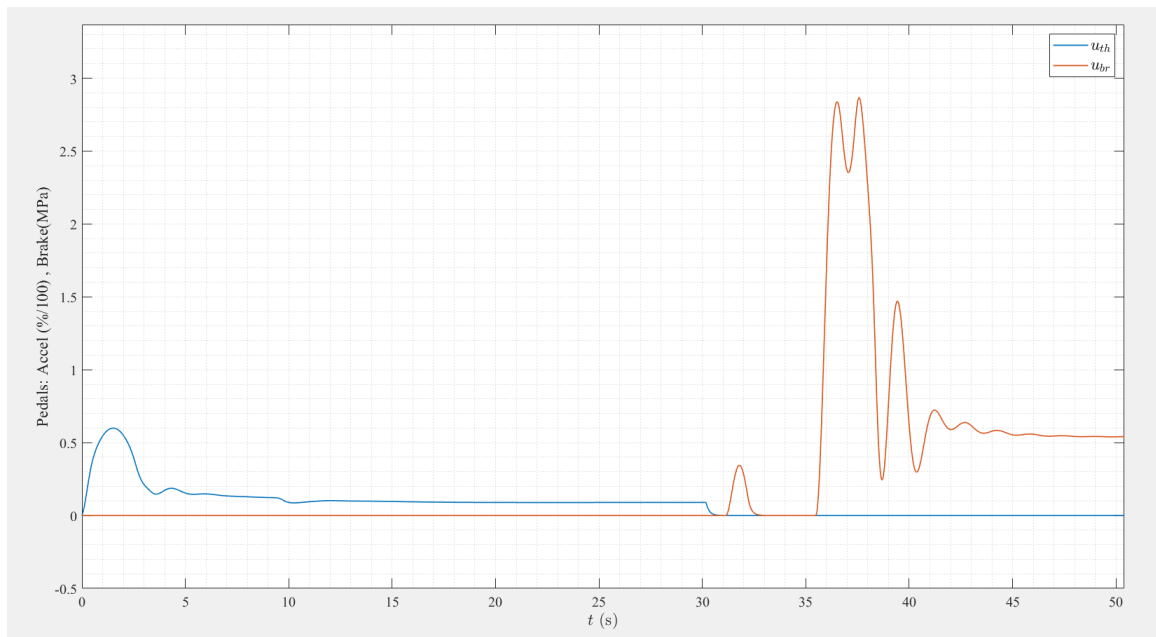


Figura 81: Teste CCRb - Frenagem -6 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Pedais VUT

exercer mais torque para vencer a inércia.

Tendo passado no teste com uma distância relativa de 40 metros no momento da frenagem, testa-se agora para uma distância de 12 metros.

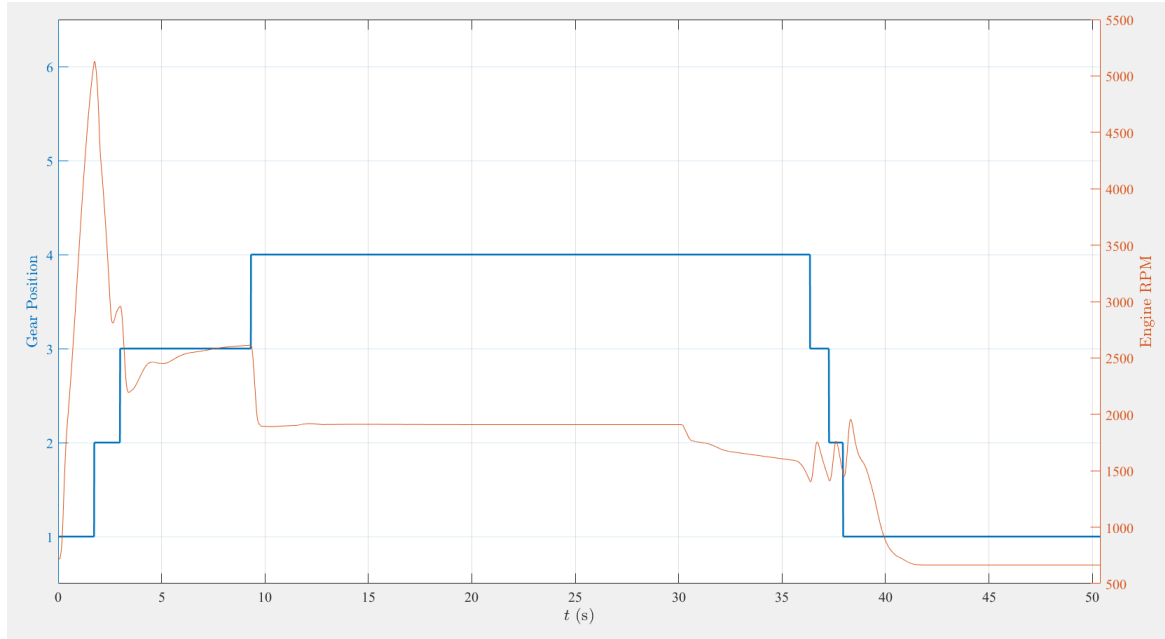


Figura 82: Teste CCRb - Frenagem -6 m/s^2 para $D = 40 \text{ m}$: Marcha e Motor VUT

6.7.4 Frenagem de -6 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste (score = 1).

No gráfico da Figura 83 é possível observar que no instante que o veículo *host* detecta o *leader*, em aproximadamente 67s, cuja distância entre eles é 12 metros, o veículo *leader* freia com -6 m/s^2 , mas a barreira se mantém não negativa, garantindo a segurança do motorista. Após isso, o veículo *host* sai do campo de visão do RADAR, voltando a indicar sua máxima distância focal (140 metros), quando posteriormente os veículos voltam a ficar a 12 metros, ocorrendo uma nova frenagem.

Na Figura 84 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). Como é possível notar, a velocidade v_h atinge v_c , o que demonstra boa performance no rastreamento do objetivo. No entanto, diante da frenagem do veículo *leader*, o sistema precisa abandonar o rastreamento da referência, priorizando a segurança. Vale destacar que para o veículo *host*, a velocidade do *leader* v_l só é 50 km/h no momento de detecção do RADAR, que ocorre em aproximadamente 67s, sendo que antes disso uma boa estimativa para o sistema é adotar $v_l = v_c$.

Na Figura 85 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela Malha Externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). Nota-se que a dinâmica da referência é seguida, mas há um sobressinal no momento de frenagem. Isso

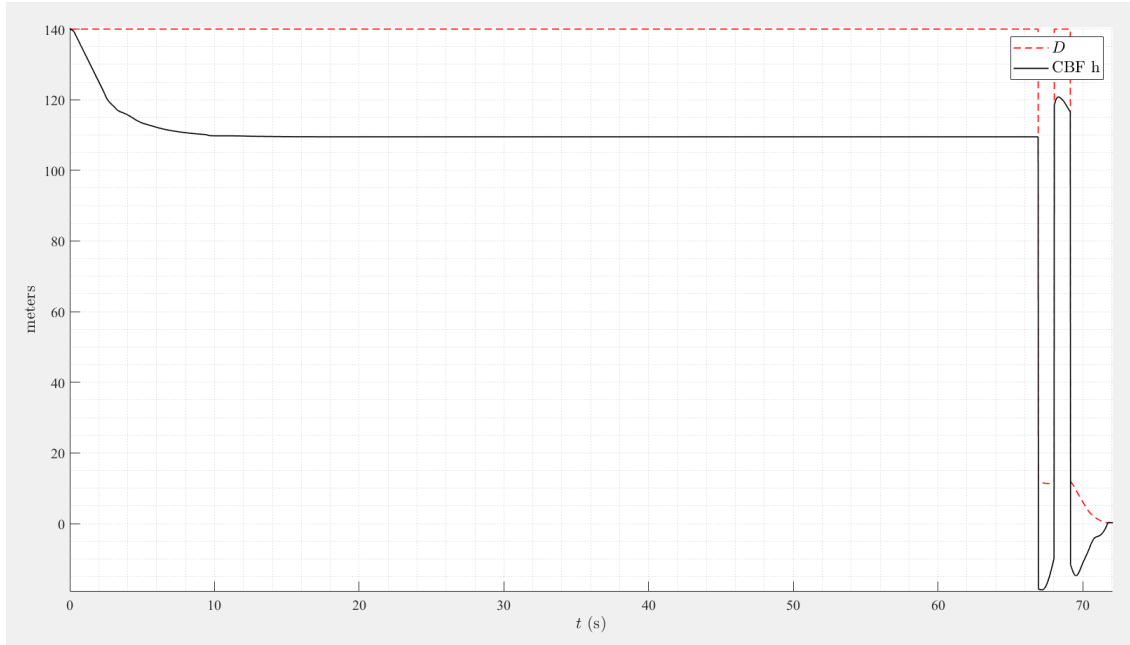


Figura 83: Teste CCRb - Frenagem -6 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$: Distância e Barreira

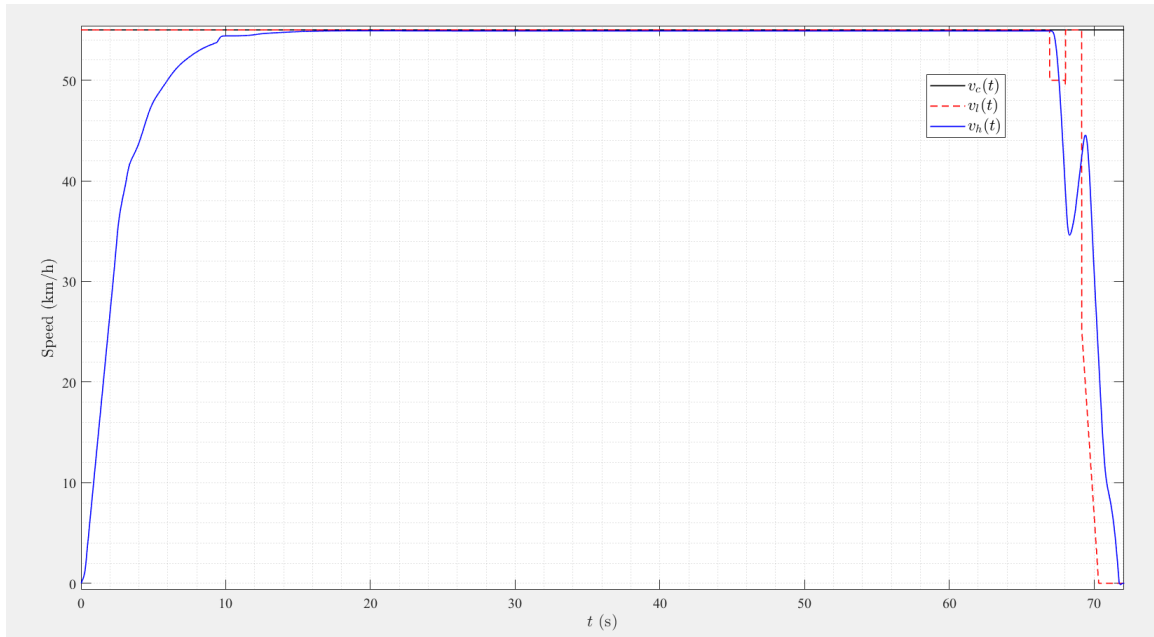


Figura 84: Teste CCRb - Frenagem -6 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$: Velocidades

ocorre devido à necessidade de a dinâmica de frenagem ser rápida o suficiente para que se garanta a factibilidade do teste. Ênfase para a região de aceleração negativa, indicando o comando de freio em virtude do RADAR detectar o veículo à frente estando a uma distância de potencial colisão.

Na Figura 86 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). Neste gráfico é possível perceber que a dinâmica imposta

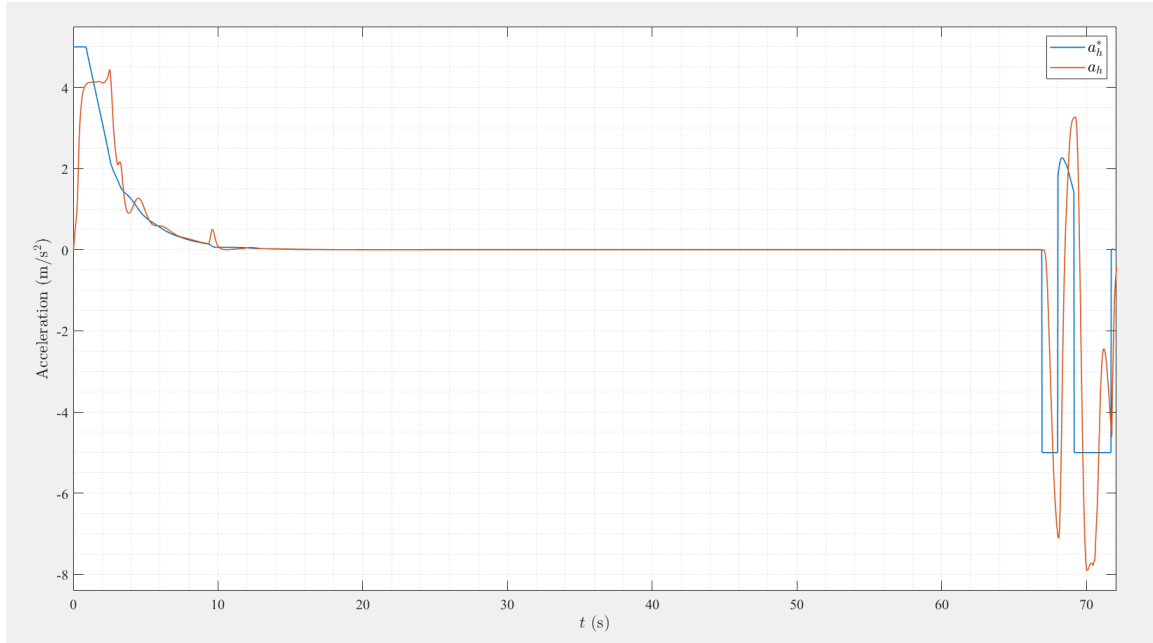


Figura 85: Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 12$ m: Acelerações VUT

ao pedal do acelerador é suave, uma vez que o objetivo de atingir a velocidade de cruzeiro ocorre com exatidão, no entanto, a ação do freio é brusca em virtude do sistema solicitar freio assim que detecta o veículo *leader*.

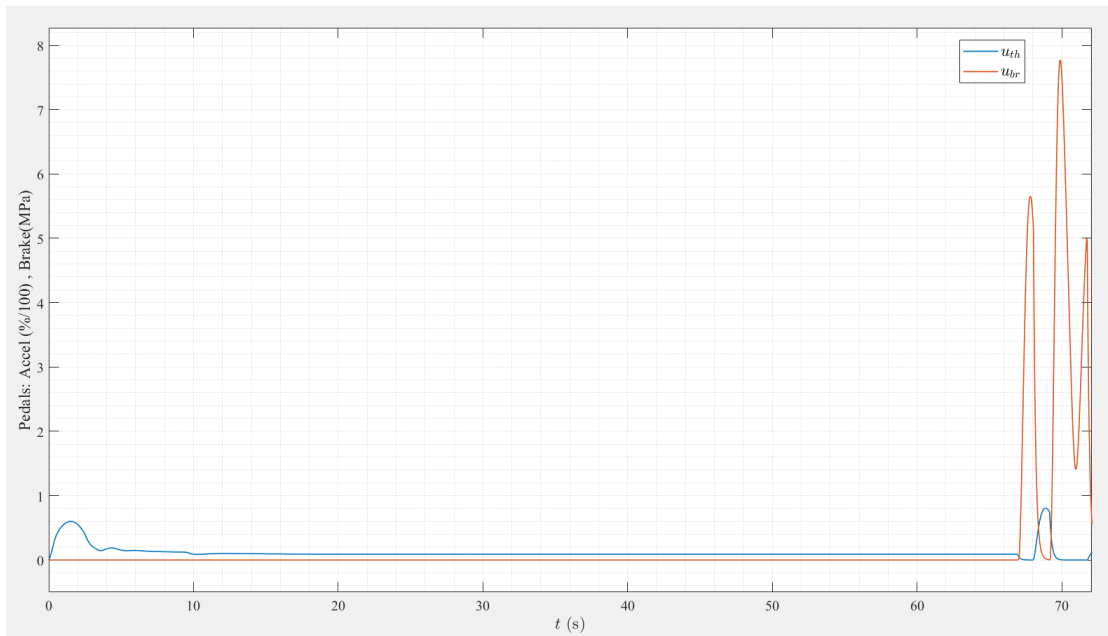


Figura 86: Teste CCRb - Frenagem $-6 m/s^2$ para $D = 12$ m: Pedais VUT

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 87. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto,

devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, o que demonstra o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa exercer mais torque para vencer a inércia.

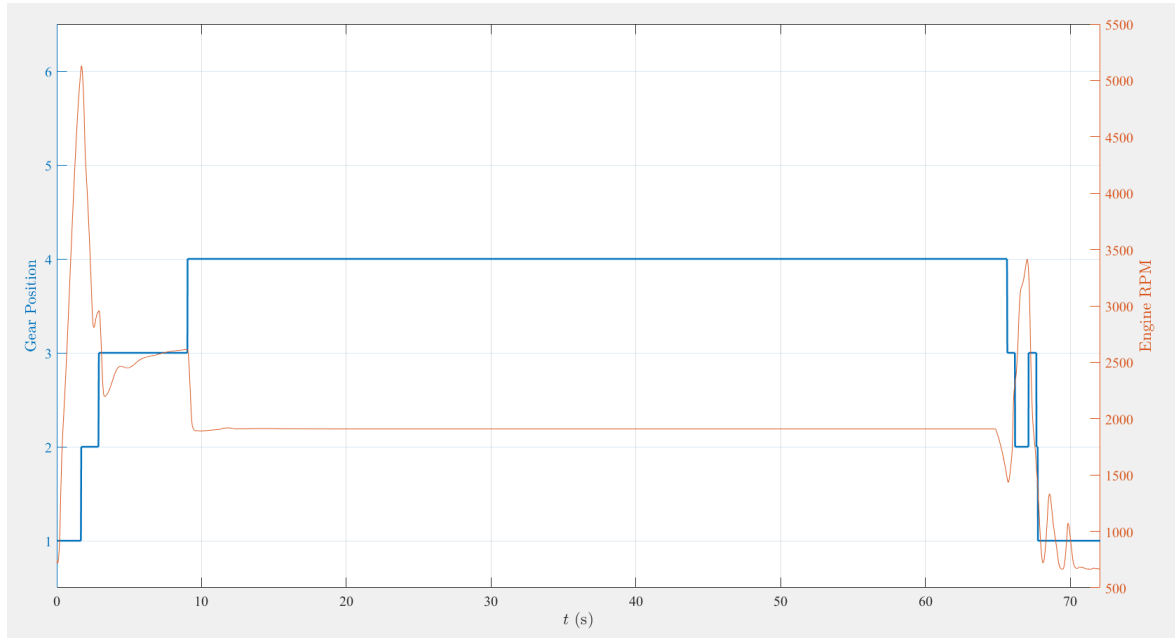


Figura 87: Teste CCRb - Frenagem -6 m/s^2 para $D = 12 \text{ m}$: Marcha e Motor VUT

6.8 CUT-IN

Nos testes de CUT-IN, o GVT na faixa adjacente realizará uma mudança completa de faixa, isto é, deslocamento lateral de 3.5m para a faixa do VUT (**Lane Change Offset** - Figura 88). A Figura 88 ilustra o cenário.

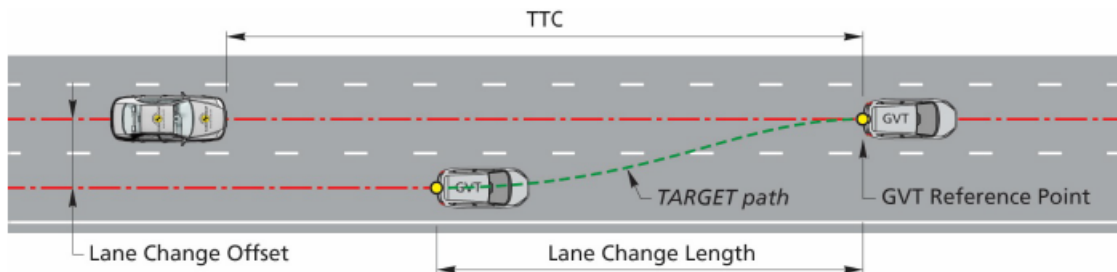


Figura 88: Cenário testado no CUT-IN. Extraído de [4]

6.8.1 Referência 50 km/h

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste ($score = 1$).

A Figura 89 mostra o instante em que o veículo GVT entra na faixa de rodagem do veículo VUT. Fica claro que está é uma situação perigosa e mesmo assim o ACC proposto nesse trabalho consegue lidar com a situação e manter a segurança do veículo *host* como se vê nos gráficos referentes a esse teste.



Figura 89: Visualização do resultado da simulação CUT-IN @ 50km/h

A barreira h na Figura 90 é positiva no intervalo $t = [0, 24]$ s é positiva, pois a simulação começa com o estado $x(0) = x_0$ sendo um estado seguro, e pela invariância do conjunto seguro isso se mantém até 24s. Nesse instante um veículo de outra faixa invade, de maneira perigosa, a faixa de rodagem do veículo com ACC. Por isso, devido à modelagem da barreira adotada, ela fica negativa. Porém, o sistema atua freando imediatamente de maneira a recuperar a barreira que volta a ser positiva, isto é, o estado x volta a ser seguro. E a segurança do veículo é mantida, o que fica evidente no gráfico da distância, Figura 90, entre os dois veículos, sendo sempre positiva ao longo do teste.

Na Figura 91 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). É possível ver que o veículo VUT atinge a velocidade de cruzeiro, atendendo os requisitos de velocidade. Porém, em 24s, a velocidade cai abruptamente de modo a manter a distância segura.

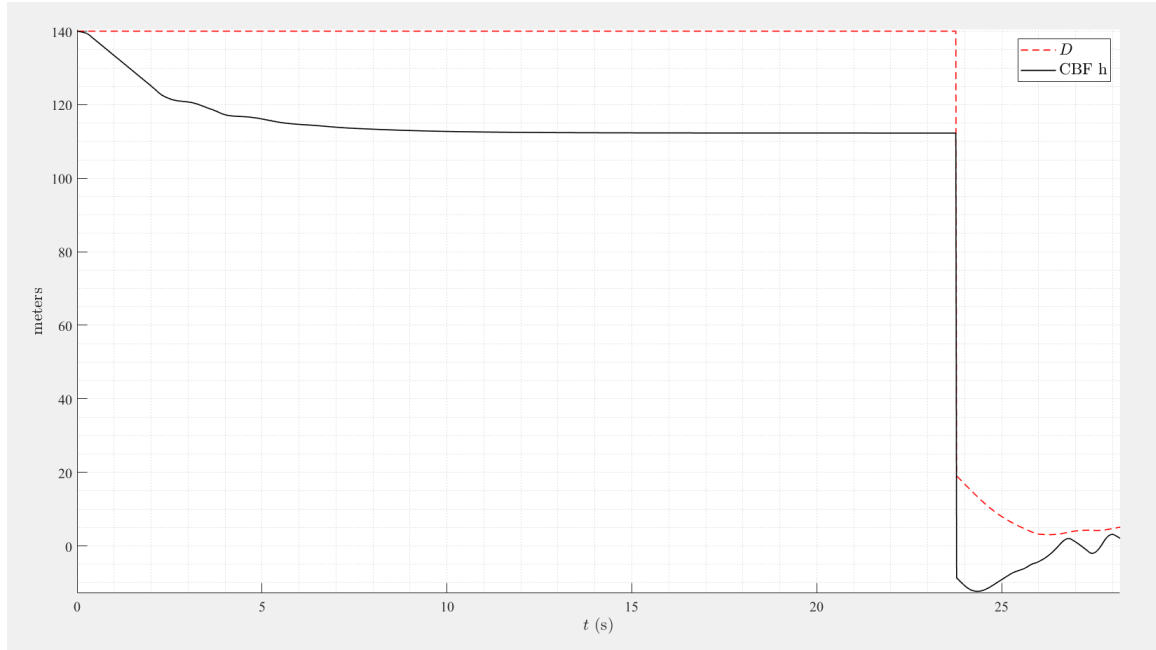


Figura 90: Teste CUT-IN @ 50 km/h: Distância e Barreira

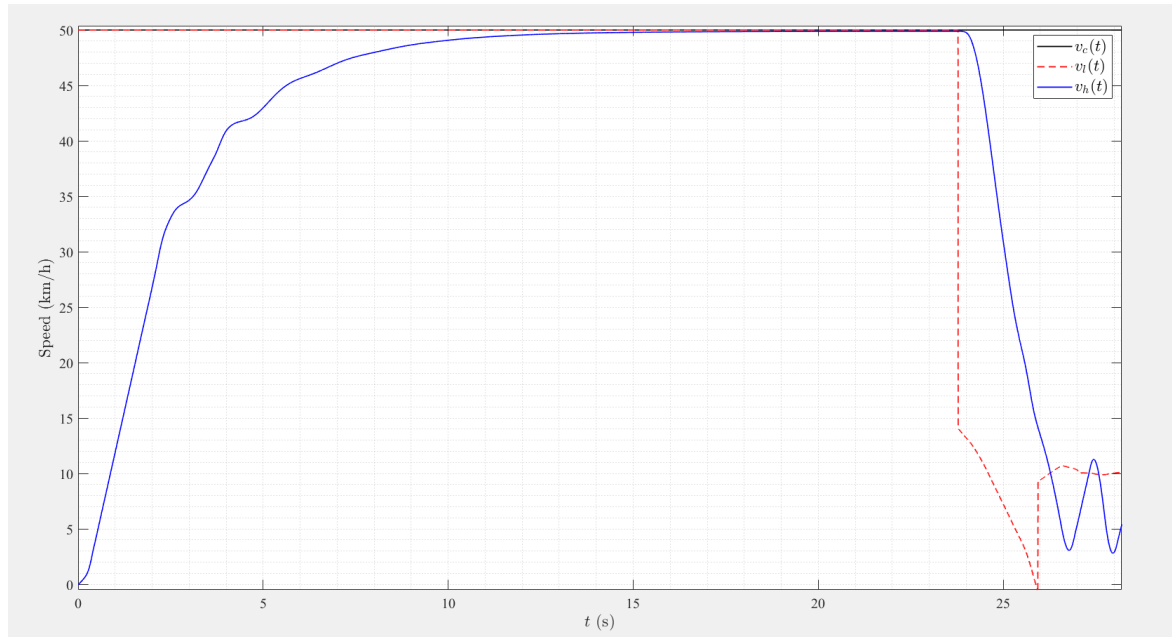


Figura 91: Teste CUT-IN @ 50 km/h: Velocidades

Na Figura 92 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela malha externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). A observação principal é que a partir de 24s a aceleração $a_{h,d} \geq -5m/s^2$ e a aceleração a_h fica aproximadamente, a menos de um sobressinal, acima de $-5m/s^2$ como exige o Euro NCAP.

Na Figura 93 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). O destaque nesse gráfico é para o freio em que $u_{br,max} \approx$

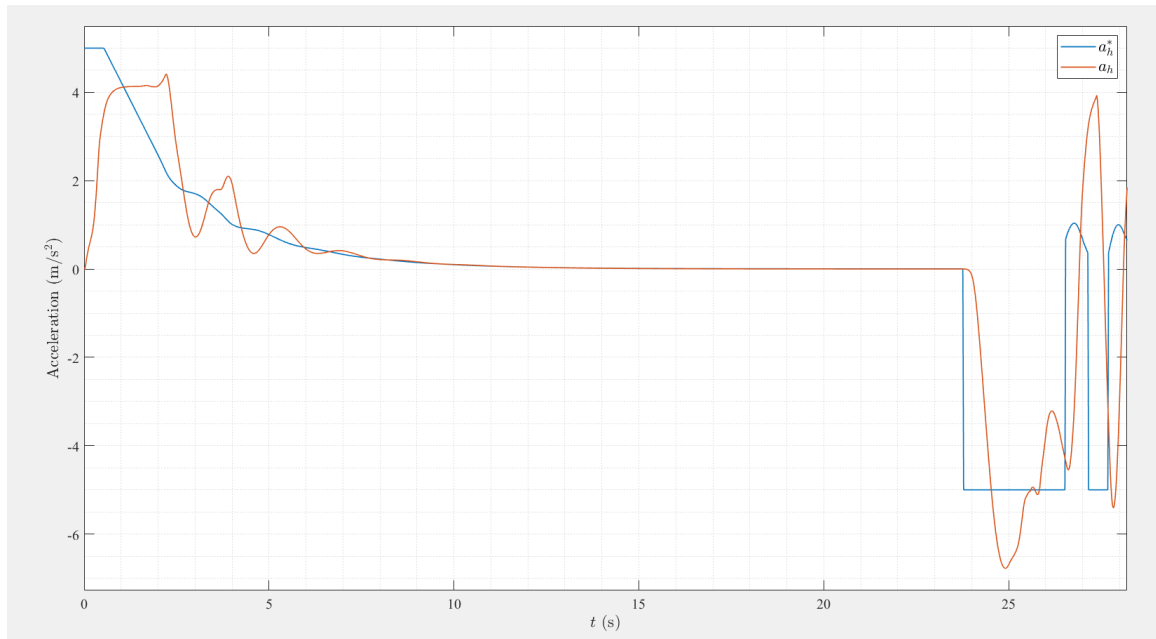


Figura 92: Teste CUT-IN @ 50 km/h: Acelerações VUT

7.5MPa.

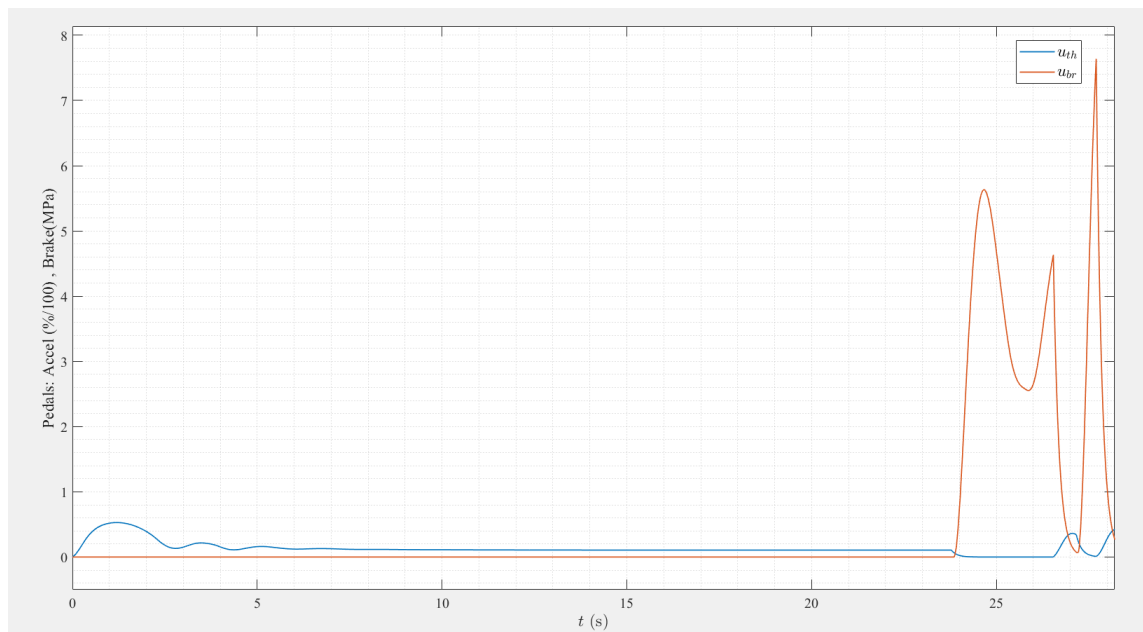


Figura 93: Teste CUT-IN @ 50 km/h: Pedais VUT

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 94. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto, devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, o que demonstra o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa

exercer mais torque para vencer a inércia.

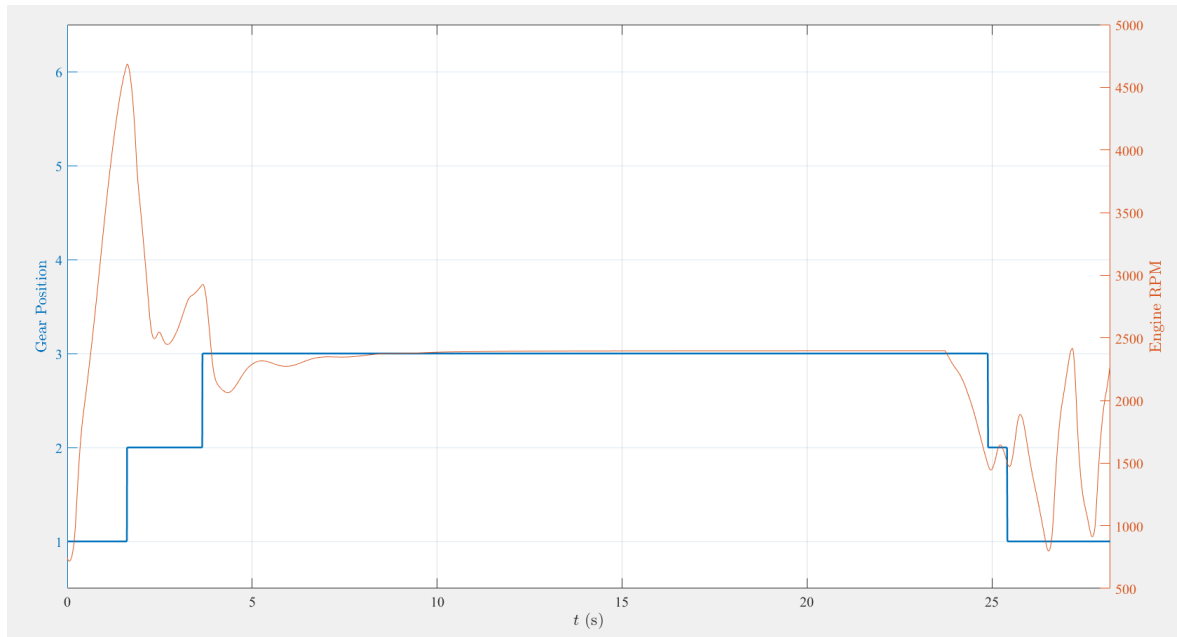


Figura 94: Teste CUT-IN @ 50 km/h: Marcha e Motor VUT

6.8.2 Referência 120 km/h

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste ($score = 1$).

A Figura 95 mostra o instante em que o veículo GVT entra na faixa de rodagem do veículo VUT. Fica claro que está é uma situação perigosa e mesmo assim o ACC proposto nesse trabalho consegue lidar com a situação e manter a segurança do veículo VUT como se vê nos gráficos referentes a esse teste.

A barreira h na Figura 96 é positiva no intervalo $t = [0; 14]$ s é positiva, pois a simulação começa com o estado $x(0) = x_0$ sendo um estado seguro, e pela invariância do conjunto seguro isso se mantém até 14s. Nesse instante um veículo de outra faixa invade, de maneira perigosa, a faixa de rodagem do veículo com ACC. Por isso, devido à modelagem da barreira adotada, ela fica negativa. Porém, o sistema atua freando imediatamente de maneira a recuperar a barreira que volta a ser positiva, isto é, o estado x volta a ser seguro. E a segurança do veículo é mantida, o que fica evidente no gráfico da distância, Figura 96, entre os dois veículos, sendo sempre positiva ao longo do teste.

Na Figura 97 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). É possível ver que o veículo VUT atinge a velocidade

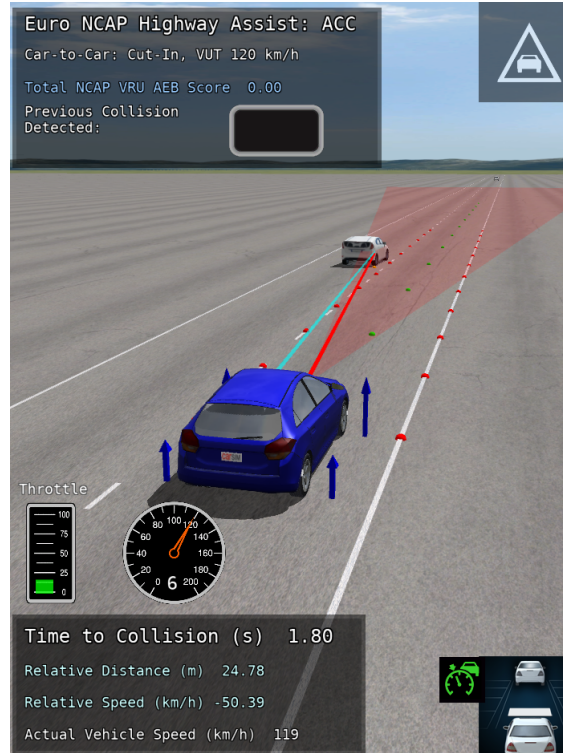


Figura 95: Visualização do resultado da simulação CUT-IN @ 120km/h

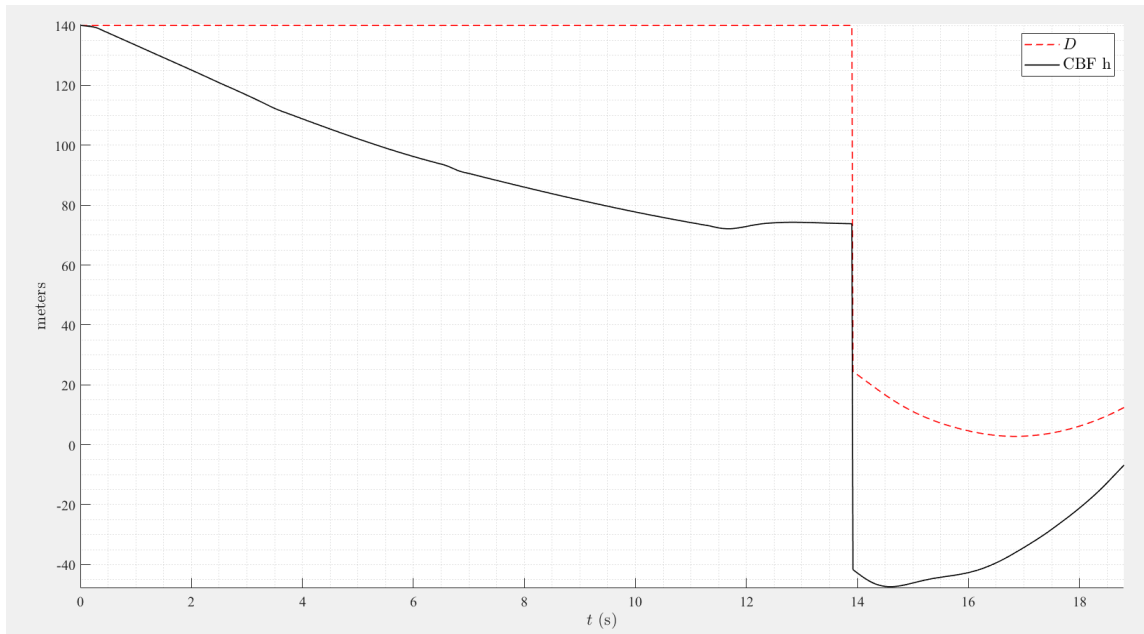


Figura 96: Teste CUT-IN @ 120 km/h: Distância e Barreira

de cruzeiro, atendendo os requisitos de velocidade. Porém, em 14s, a velocidade cai abruptamente de modo a manter a distância segura.

Na Figura 98 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela malha externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h).

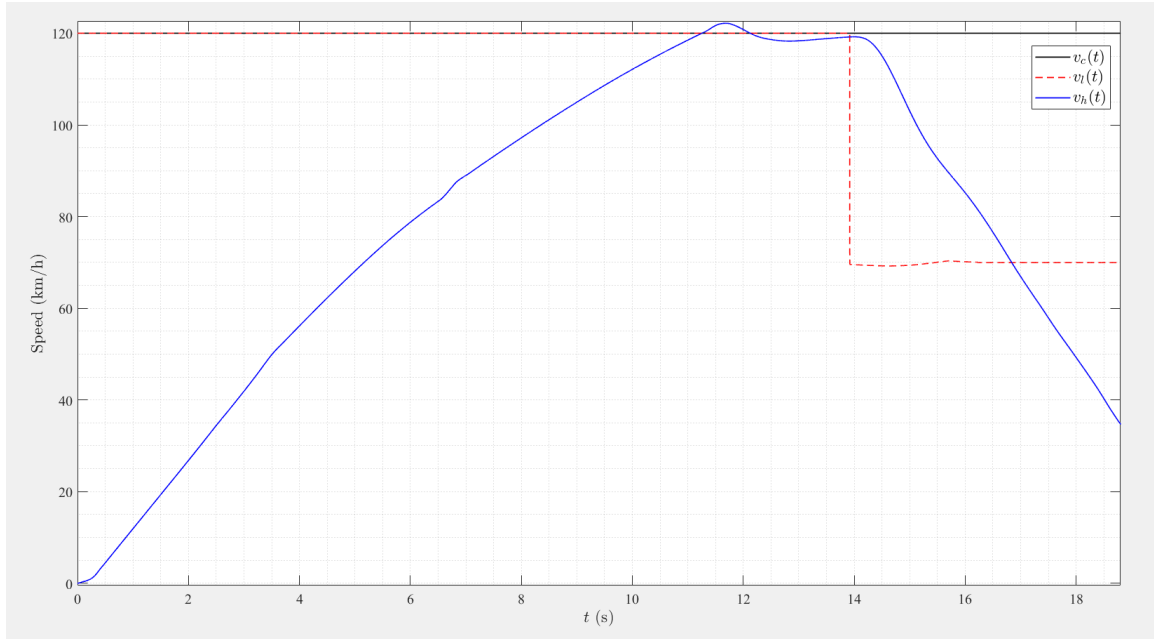


Figura 97: Teste CUT-IN @ 120 km/h: Velocidades

No intervalo $t = [0, 14]$ s o veículo VUT acelera para alcançar a velocidade de cruzeiro. Porém, fica em destaque que a aceleração a_h rastrea a aceleração de referência $a_{h,d}$, mas com uma grande diferença. Isso se dá, pois ocorrem 5 trocas de marcha nesse intervalo que introduzem um efeito que pode ser interpretado como uma perturbação estocástica no sistema, já que o sistema de marcha automático do veículo não decide trocar de marcha de maneira independente do funcionamento do sistema de ACC.

A partir de 14s a aceleração $a_{h,d} \geq -5m/s^2$ e a aceleração a_h fica aproximadamente, a menos de um sobressinal, acima de $-5m/s^2$ como exige o Euro NCAP.

Na Figura 99 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). O destaque nesse gráfico é para o freio em que $u_{br,max} \approx 5.5\text{MPa}$, menor do que no caso em que $v_c = 50\text{km/h}$.

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 100. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto, devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, o que demonstra o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa exercer mais torque para vencer a inércia.

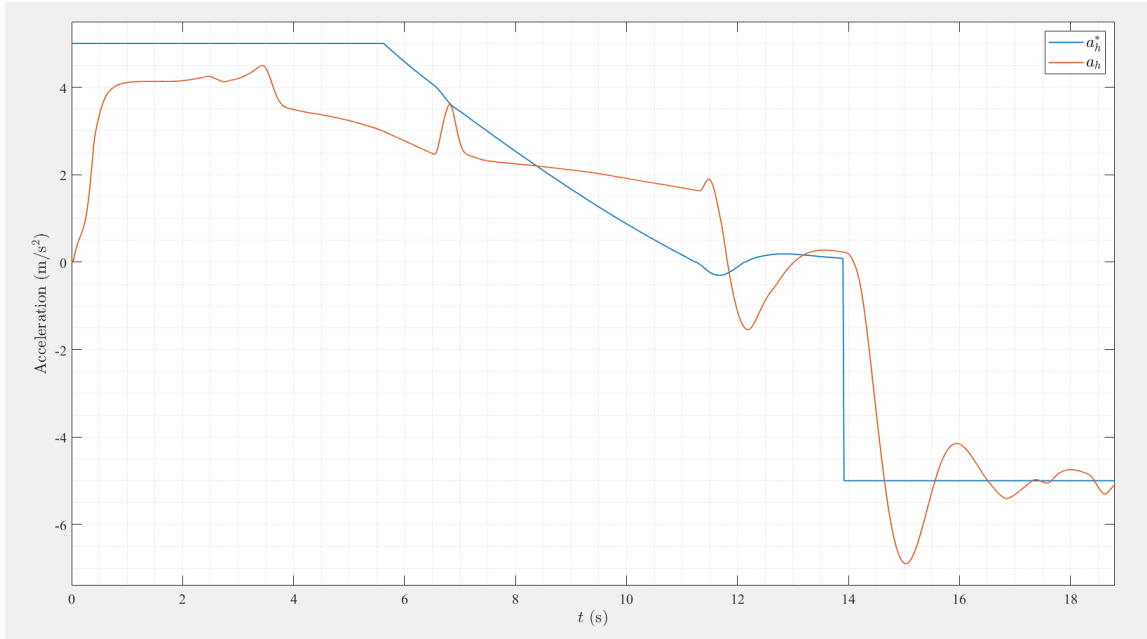


Figura 98: Teste CUT-IN @ 120 km/h: Acelerações VUT

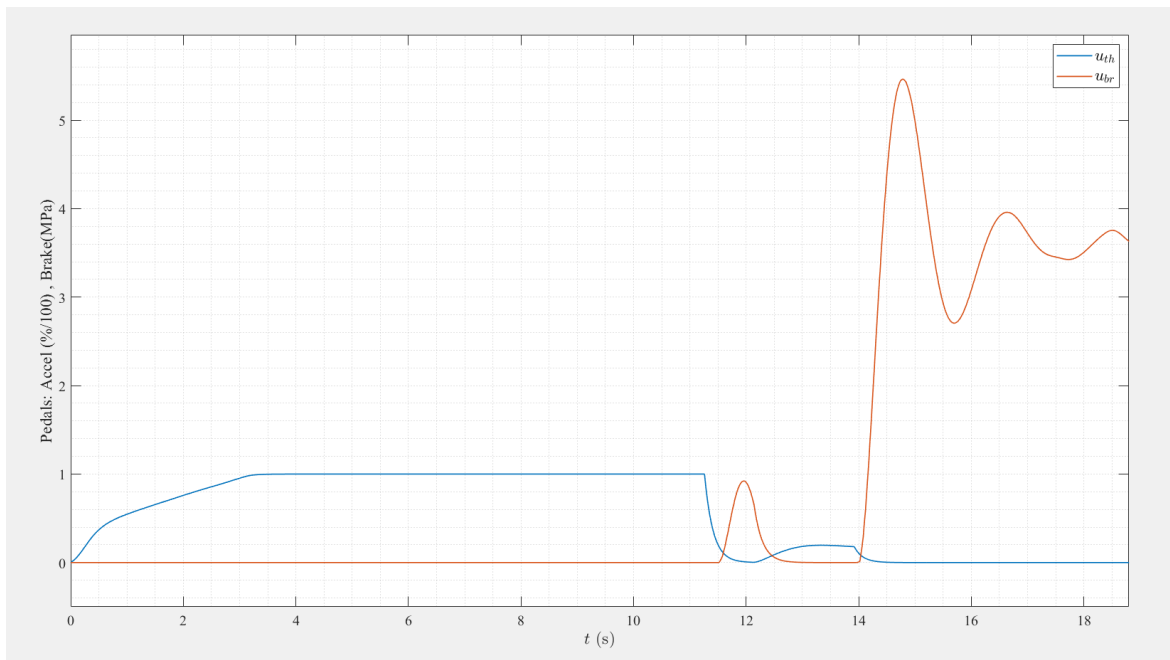


Figura 99: Teste CUT-IN @ 120 km/h: Pedais VUT

6.9 CUT-OUT

Nos testes de CUT-OUT, o GVT está na mesma pista que o VUT, realiza uma mudança de faixa e à frente do VUT há um veículo parado. A Figura 101 ilustra o cenário.

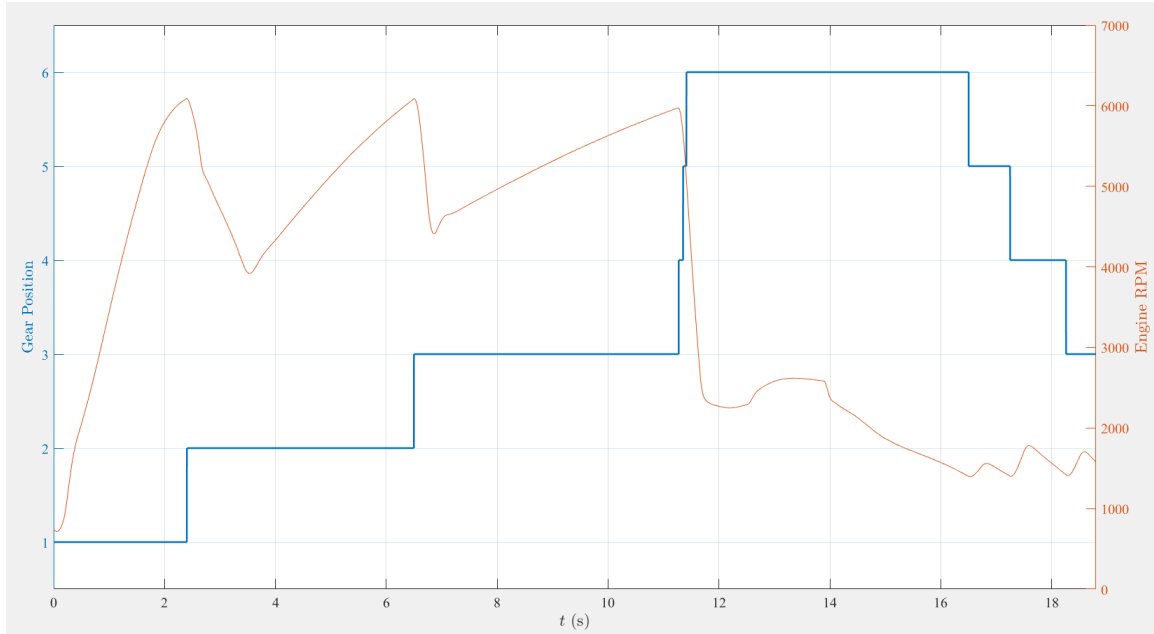


Figura 100: Teste CUT - IN @ 120 km/h: Marcha e Motor VUT

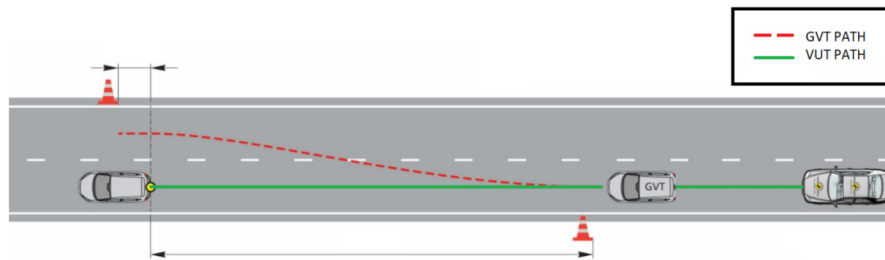


Figura 101: Cenário testado no CUT-OUT. Adaptado de [4]

6.9.1 Referência 70 km/h

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste ($score = 1$).

Na Figura 102 apresenta-se uma sequência de imagens que ilustra o resultado do teste. Observa-se inicialmente no quadro a) que o veículo VUT atinge $v_c = 70\text{km/h}$. Em seguida, considerando-se um RADAR com alcance máximo de 80m (conservador em relação aos 140m adotados no projeto), observa-se no quadro b) que o veículo VUT detecta o veículo azul-escuro a frente que está a 50km/h e freia até quase alcançar essa velocidade. Nesse instante, como mostrado no quadro c), o veículo *leader* azul-escuro muda de faixa e o veículo VUT sem detectar o veículo branco volta a acelerar a até 58km/h. Nesse instante, como mostrado no quadro d), o RADAR do veículo *leader* detecta o veículo branco que se encontra parado na via e por isso o veículo VUT freia mais bruscamente, utilizando somente o modo ACC (não há freio de emergência acionado no teste como orienta o Euro

NCAP) e finalmente o veículo VUT para a uma distância de 41.88m em relação ao veículo *leader* branco obtendo, portanto, *score* igual à unidade.



Figura 102: Resultado do CUT-OUT com $v_c = 70\text{km/h}$. Da esquerda para direita e de cima para baixo apresentam-se os quadros: a), b), c) e d).

No gráfico da Figura 103 é possível observar que no instante que o veículo *host* detecta o *leader*, em aproximadamente 15s, cuja distância entre eles é 140 metros, o veículo *leader* trafega a 50km/h, mas a barreira se mantém não negativa, garantindo a segurança do motorista. Após isso, o veículo *leader* sai do campo de visão do RADAR, voltando a indicar sua máxima distância (140 metros), quando em aproximadamente 22s, o RADAR do veículo *leader* encontra um segundo veículo parado, ocorrendo uma nova frenagem até que uma nova distância segura entre eles seja estabelecida.

Na Figura 104 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). Como é possível notar, a velocidade v_h atinge

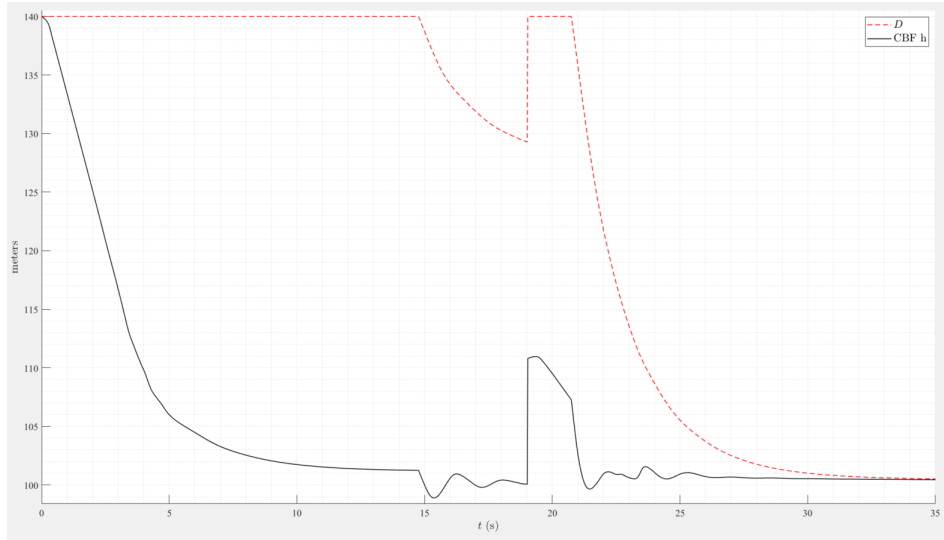


Figura 103: Teste CUT-OUT @ 70km/h: Distância e Barreira

v_c , o que demonstra bom desempenho no rastreamento do objetivo. No entanto, ao encontrar um veículo *leader* mais lento a frente a 50km/h, o sistema precisa abandonar o rastreamento da referência, priorizando a segurança e por isso a velocidade do veículo *host* é diminuída. Quando o veículo *leader* muda de faixa no instante 14s o veículo *host* volta a aumentar sua velocidade, perseguindo o novamente v_c quando no instante 21s o RADAR detecta um novo veículo *leader* parado na via, o que leva a velocidade diminuir drasticamente mantendo-se assim a segurança do veículo *host*.

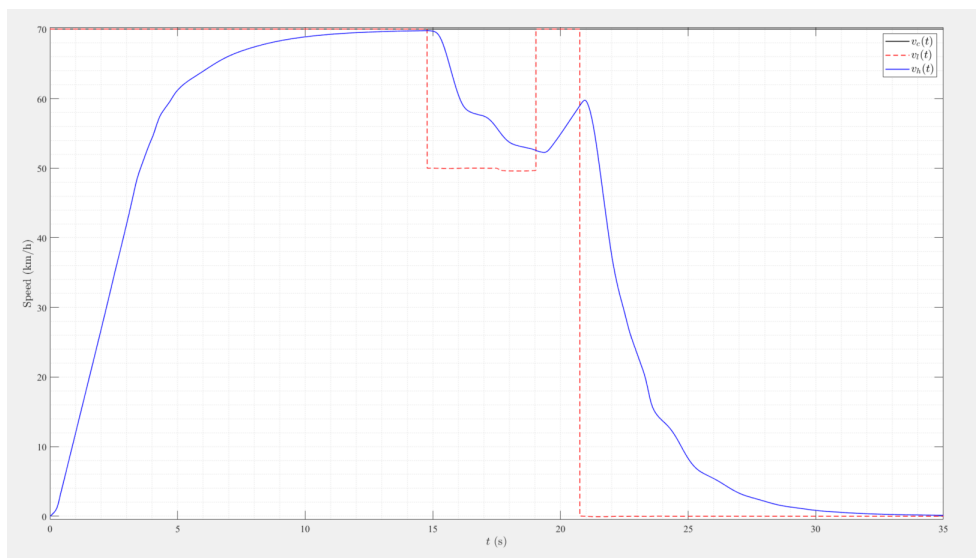


Figura 104: Teste CUT-OUT @ 70km/h: Velocidades

Na Figura 105 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela Malha Externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). Nota-se que a dinâmica da referência é seguida, mas há um sobressinal no momento de frenagem. Isso

ocorre devido à necessidade de a dinâmica de frenagem ser rápida o suficiente para que se garanta a factibilidade do teste.

Ênfase para os dois momentos de aceleração negativa com sobressinal em relação a $a_{h,d}$, indicando o comando de freio severo em virtude do RADAR detectar o veículo à frente estando a uma distância de potencial colisão. Notar que fora o sobressinal de aproximadamente $-7m/s^2$ o veículo se mantém na faixa de acelerações $[-5; +5] m/s^2$ como manda o protocolo de testes Euro NCAP.

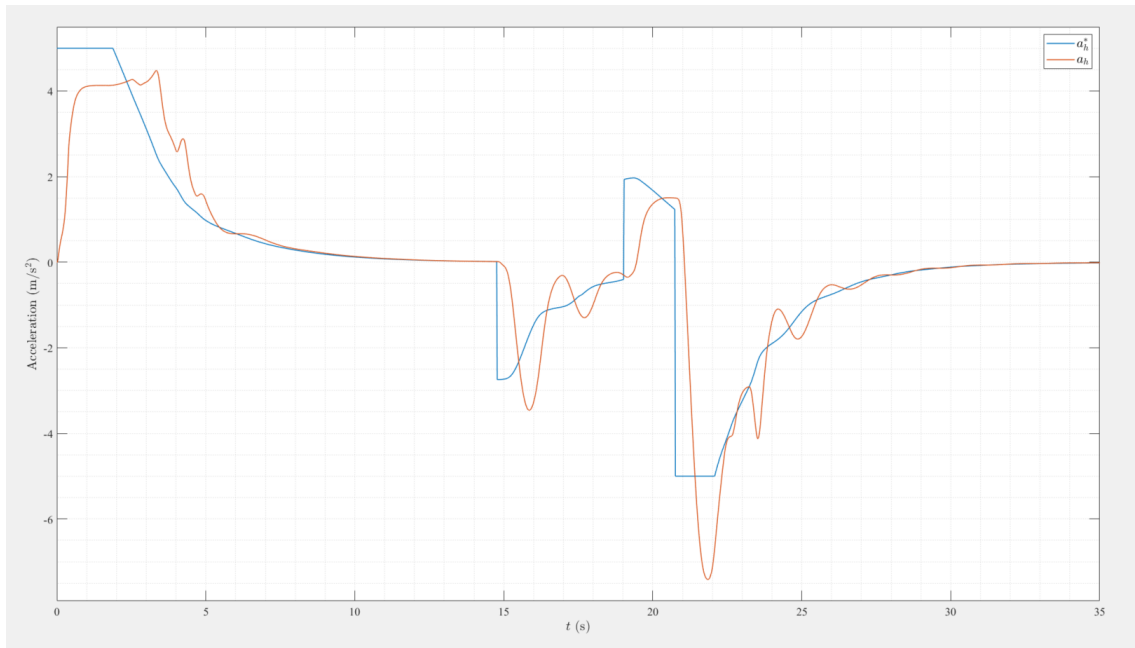


Figura 105: Teste CUT-OUT @ 70km/h: Acelerações VUT

Na Figura 106 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0, 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). Neste gráfico é possível perceber que a dinâmica imposta ao pedal do acelerador é suave, uma vez que o objetivo de atingir a velocidade de cruzeiro ocorre com exatidão, no entanto, a ação do freio é brusca em virtude do sistema solicitar freio assim que detecta o veículo *leader*. Dois picos de freio ocorrem nos instantes em que são detectados os veículos *leader* a frente, isto é, em $t = 15s$ $t = 21s$ aproximadamente.

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 107. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto, devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, o que demonstra o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa exercer mais torque para vencer a inércia.

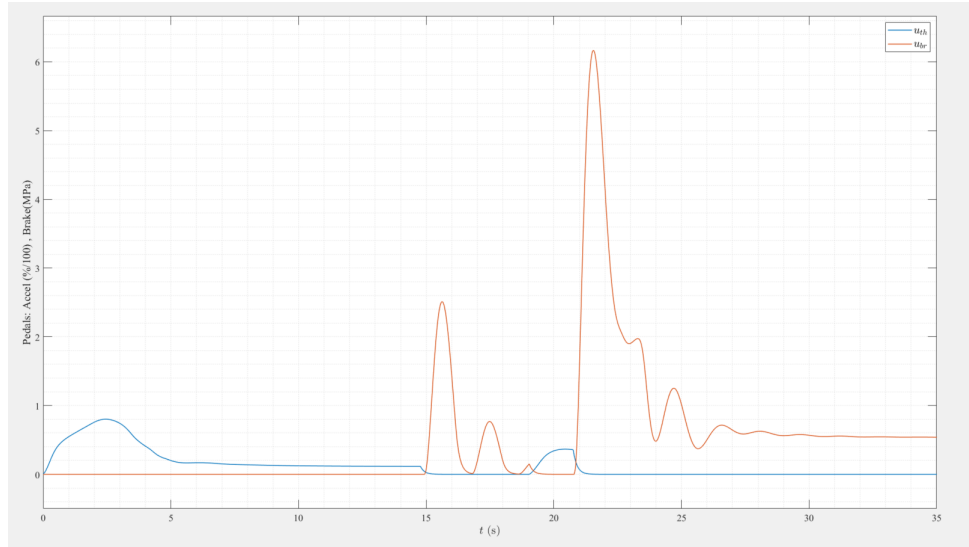


Figura 106: Teste CUT-OUT @ 70km/h: Pedais VUT

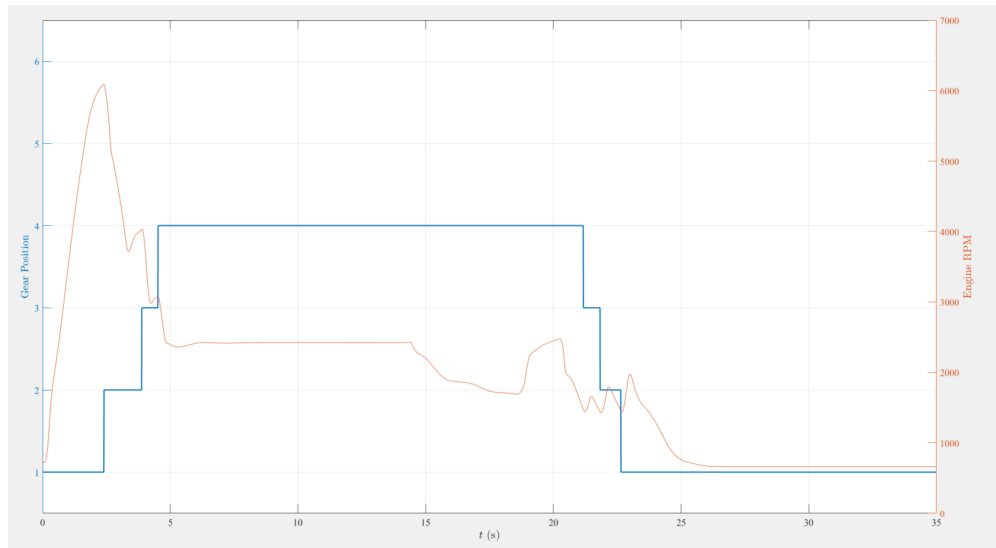


Figura 107: Teste CUT-OUT @ 70km/h: Marcha e Motor VUT

6.9.2 Referência 90 km/h

Para essa condição de velocidade de cruzeiro referência para o veículo VUT o sistema obteve nota máxima no teste (score = 1).

No gráfico da Figura 108 é possível observar que no instante que o veículo *host* detecta o *leader*, em aproximadamente 18s, cuja distância entre eles é 140 metros, o veículo *leader* trafega a 50km/h, mas a barreira se mantém não negativa, garantindo a segurança do motorista. Após isso, o veículo *leader* sai do campo de visão do RADAR, voltando a indicar sua máxima distância (140 metros), quando em aproximadamente 23s, o RADAR do veículo *leader* encontra um segundo veículo parado, ocorrendo uma nova frenagem até

que uma nova distância segura entre eles seja estabelecida.

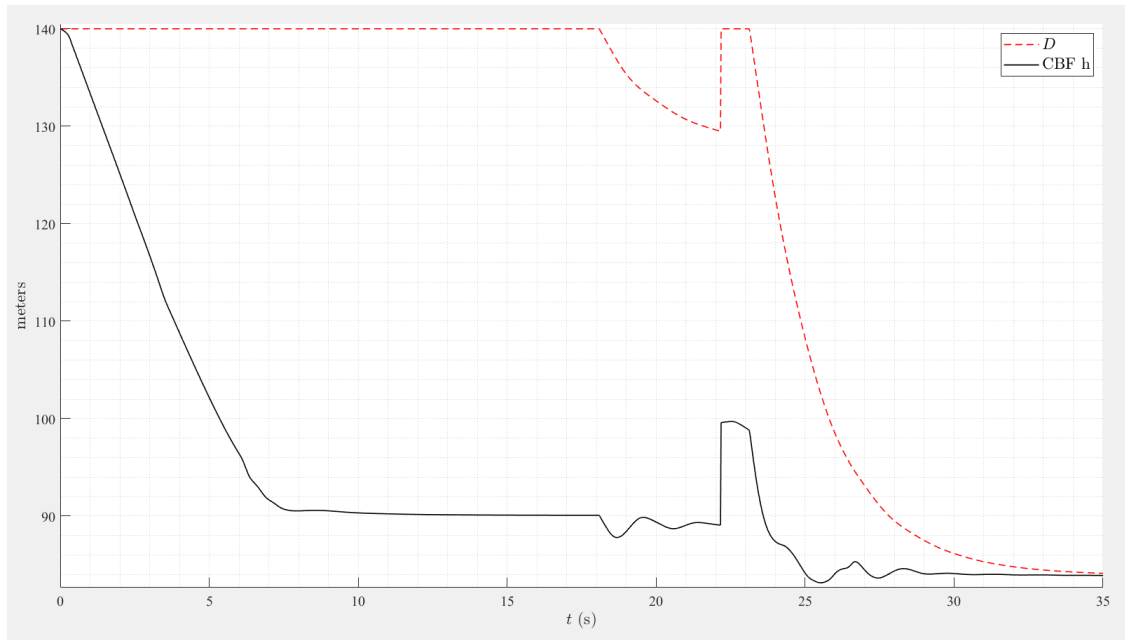


Figura 108: Teste CUT-OUT @ 90km/h: Distância e Barreira

Na Figura 109 são apresentadas as velocidades dos veículos *host* (v_h) e *leader* (v_l), assim como a velocidade de cruzeiro (v_c). Como é possível notar, a velocidade v_h atinge v_c , o que demonstra boa performance no rastreamento do objetivo. No entanto, ao encontrar um veículo *leader* mais lento a frente a 50km/h, o sistema precisa abandonar o rastreamento da referência, priorizando a segurança e por isso a velocidade do veículo *host* é diminuída. Quando o veículo *leader* muda de faixa no instante 14s o veículo *host* volta a aumentar sua velocidade, perseguindo o novamente v_c quando no instante 23s o RADAR detecta um novo veículo *leader* parado na via, o que leva a velocidade diminuir drasticamente mantendo-se assim a segurança do veículo *host*.

Na Figura 110 são apresentadas as acelerações do veículo *host*, tanto o *setpoint* ($a_{h,d}$) enviado pela malha externa, quanto a aceleração propriamente dita (a_h). Nota-se que a dinâmica da referência é seguida, mas há um sobressinal no momento de frenagem. Isso ocorre devido à necessidade de a dinâmica de frenagem ser rápida o suficiente para que se garanta a factibilidade do teste.

Ênfase para os dois momentos de aceleração negativa com sobressinal em relação a $a_{h,d}$, indicando o comando de freio severo em virtude do RADAR detectar o veículo à frente estando a uma distância de potencial colisão. Notar que fora o sobressinal de aproximadamente $-7m/s^2$ o veículo se mantém na faixa de acelerações $[-5; +5] m/s^2$ como manda o protocolo de testes Euro NCAP.

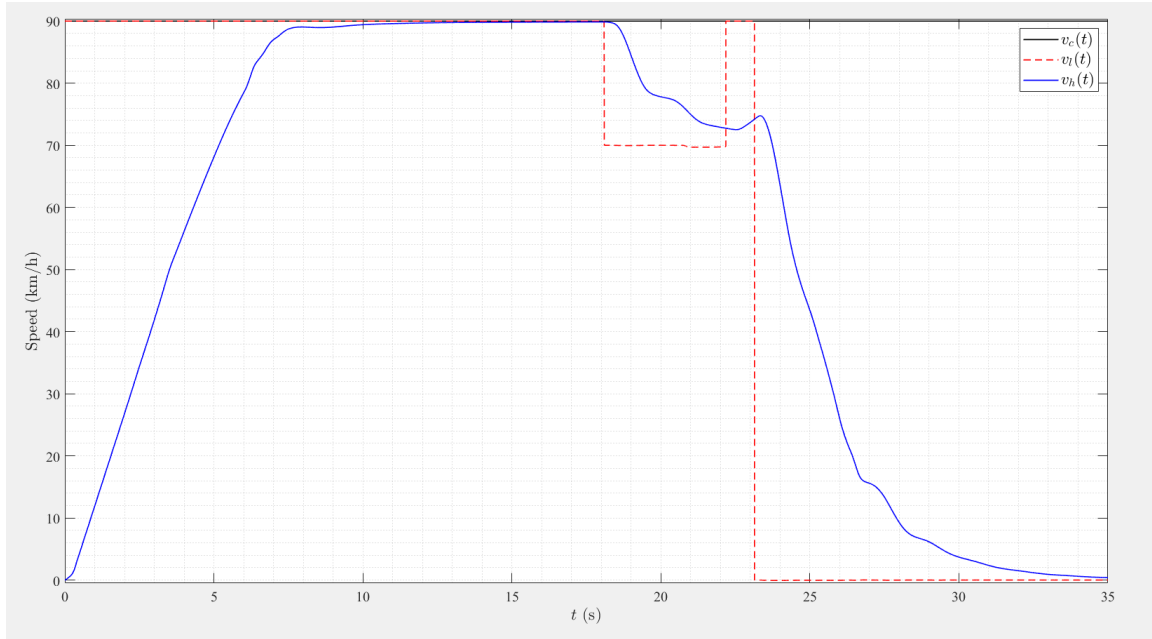


Figura 109: Teste CUT-OUT @ 90km/h: Velocidades

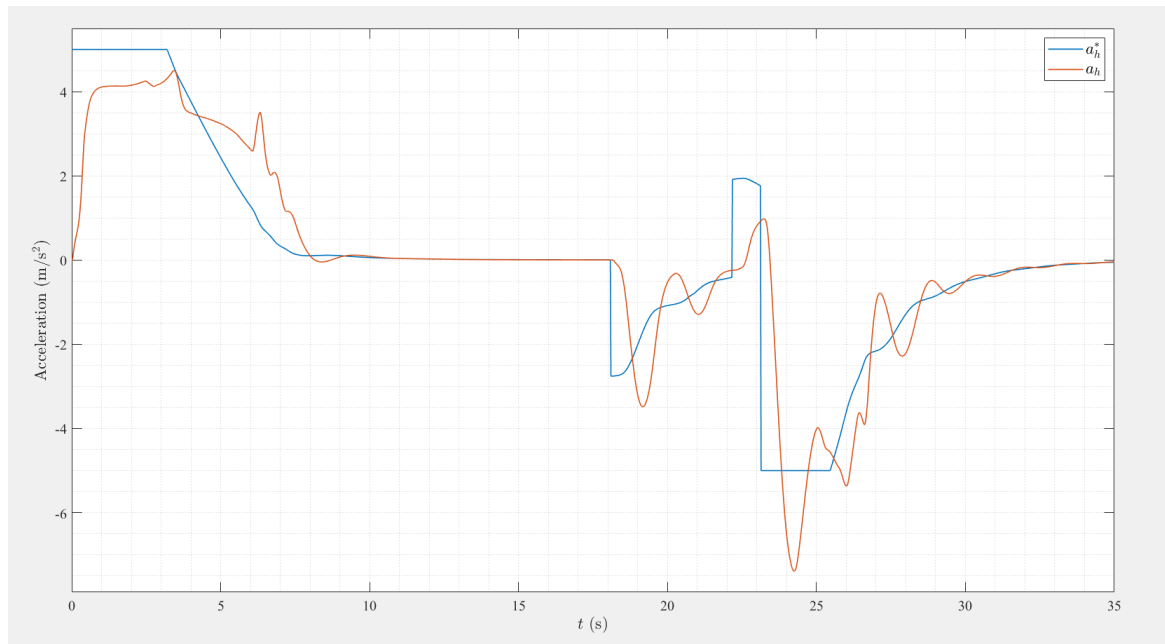


Figura 110: Teste CUT-OUT @ 90km/h: Acelerações VUT

Na Figura 111 são apresentados os sinais referentes aos pedais do acelerador ($u_{th} \in [0; 1]$) e do freio (u_{br} em MPa). Neste gráfico é possível perceber que a dinâmica imposta ao pedal do acelerador é suave, uma vez que o objetivo de atingir a velocidade de cruzeiro ocorre com exatidão, no entanto, a ação do freio é brusca em virtude do sistema solicitar freio assim que detecta o veículo *leader*. Dois picos de freio ocorrem nos instantes em que são detectados os veículos *leader* a frente, isto é, em $t = 18s$ e $t = 23s$ aproximadamente.

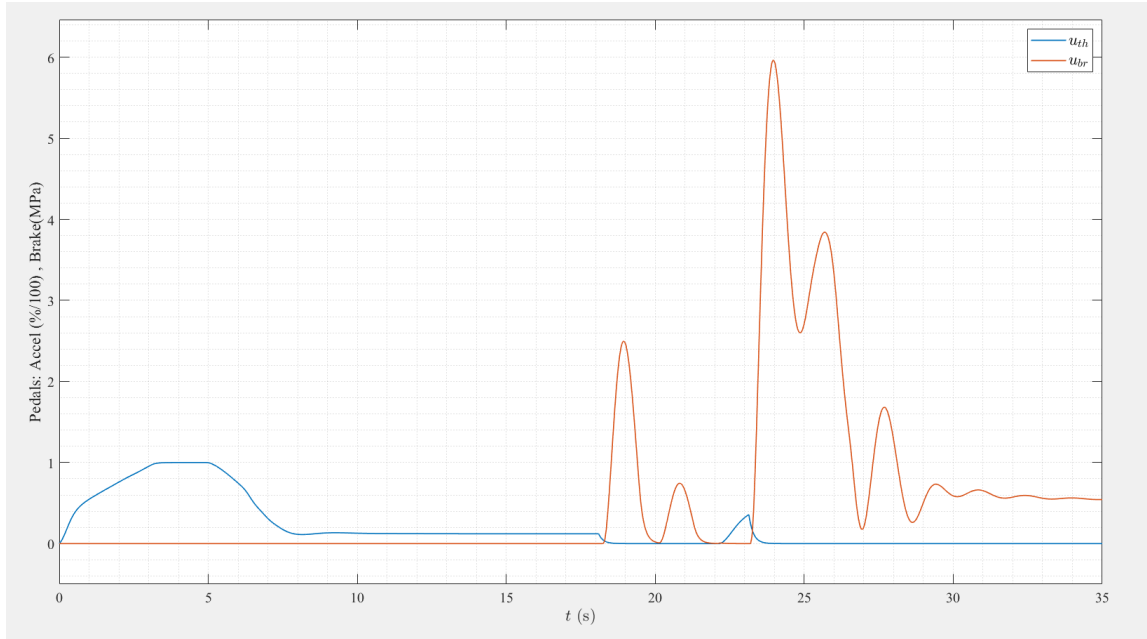


Figura 111: Teste CUT-OUT @ 90km/h: Pedais VUT

Por fim são exibidos os gráficos da marcha e da rotação do motor na Figura 112. Nota-se que para atingir a velocidade de cruzeiro desejada, passa-se por várias posições de marcha, que, na prática, representa plantas com características distintas. No entanto, devido ao *Model-Free* tratar as não linearidades, tais mudanças são minimizadas nas variáveis controladas pelo sistema ACC, o que demonstra o êxito ao atingir os objetivos. Ênfase para grande rotação do motor nas marchas iniciais, pois é quando o motor precisa exercer mais torque para vencer a inércia.

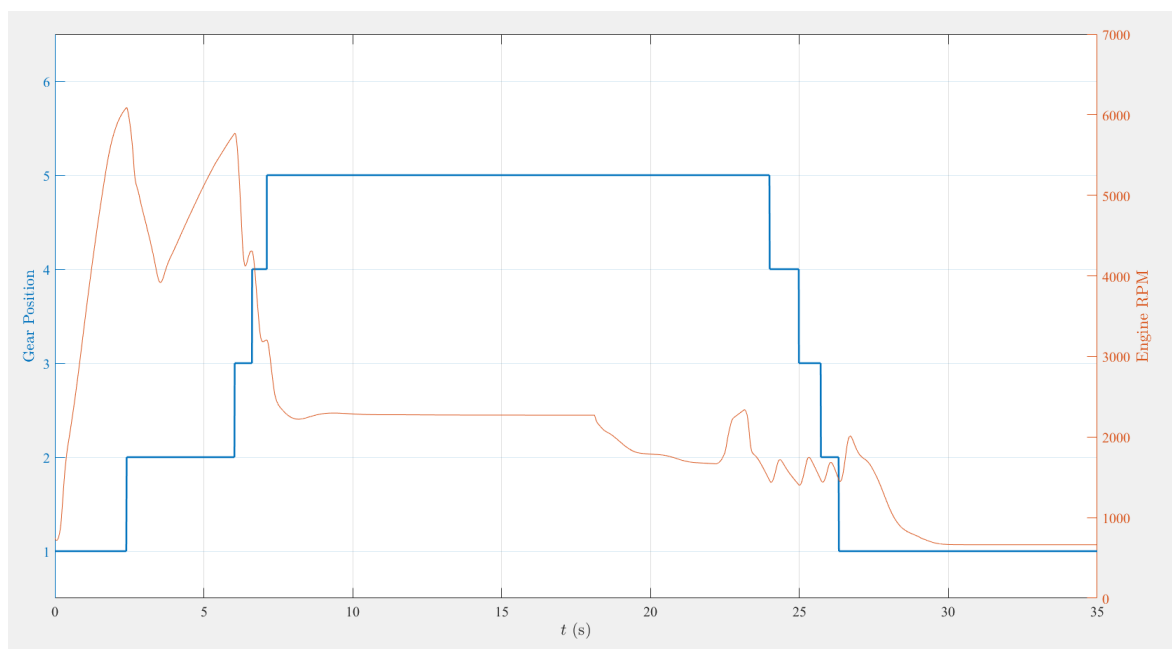


Figura 112: Teste CUT-OUT @ 90km/h: Marcha e Motor VUT

6.10 Conclusão do Euro NCAP

Os gráficos mostrados nesse capítulo referentes aos testes do protocolo Euro NCAP mostram o teste sob a ótica do veículo *host*.

Em todos os testes o sistema de ACC proposto pontuou com nota máxima, por exceção daquele referente ao traçado curvo devido à questão do sistema de classificação de RADAR que está fora do escopo desse trabalho dado a hipótese de sistema modular descrito na subseção 6.5.2.

Conforme a Tabela 13, o sistema de ACC proposto nesse trabalho baseado no controle “*CLF-CBF powered by QP with Model-Free*” gabarita o teste Euro NCAP a menos do teste “CCRS - Alvo Estacionário: Estrada Curva” conforme explicado na seção 6.5.2.

Tabela 13: Conclusão do Teste Euro NCAP

| Teste Euro NCAP | Resultado |
|---|-----------|
| CCRs - Alvo Estacionário: Estrada Reta | 7/7 |
| CCRs - Alvo Estacionário: Estrada Curva | - |
| CCRm - Alvo em Movimento: GTV @ 20KM/h | 6/6 |
| CCRm - Alvo em Movimento: GTV @ 60KM/h | 6/6 |
| CCRB - Alvo Freando VUT @ 55KM/h | 4/4 |
| GTV @ $-2m/s^2$ — D=40m | 1/1 |
| GTV @ $-2m/s^2$ — D=12m | 1/1 |
| GTV @ $-6m/s^2$ — D=40m | 1/1 |
| GTV @ $-6m/s^2$ — D=12m | 1/1 |
| CUT-IN: VUT @ 50KM/h | 1/1 |
| CUT-IN: VUT @ 120KM/h | 1/1 |
| CUT-OUT: VUT @ 70KM/h | 1/1 |
| CUT-OUT: VUT @ 90KM/h | 1/1 |

Sendo assim, com base nos resultados da Tabela 13 e com base nas análises dos gráficos das simulações do capítulo 6 pode-se afirmar que a lei de controle proposta utilizando CLF e CBF via programação quadrática integrada aos controles *Model-Free* por meio da arquitetura de controle mostrada na Figura 2 é uma lei de controle muito adequada para a implementação de ACC. E do ponto qualitativo isso é reforçado considerando-se o embasamento teórico sólido da lei de controle proposta e a facilidade de implementação em um veículo automotivo, uma vez que depende de poucos parâmetros (vide Tabela 12)

a serem ajustados ou medidos no veículo e incorporados a seu modelo de controle em comparação ao alto nível de complexidade de um veículo moderno quando descrito sob a ótica de sistema.

7 TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, esta seção busca levantar a discussão sobre possíveis iniciativas futuras, de tal modo a dar continuidade ao projeto do sistema ACC.

O presente trabalho reuniu estratégias clássicas de controle, tais como modelagem da planta e simulações em MATLAB/Simulink, como também estratégias que visam trazer mais “robustez” ao controle, a partir de simulações em SIL no software de referência veicular CarSim e validação frente aos testes de desempenho do padrão europeu Euro NCAP.

Um passo seguinte, antes da implementação final em hardware para um veículo real, é a etapa de *Hardware-In-the-Loop* (HIL) [19], técnica usada no desenvolvimento e teste de sistemas embarcados complexos em tempo real. A simulação HIL fornece uma plataforma de teste eficaz, adicionando a complexidade do sistema de atuador de processo, conhecido como planta, à plataforma de teste. Consiste em um sistema retroalimentado que comunica a ECU do veículo responsável pelo módulo de ACC com a versão virtual ou gêmeo digital do veículo. Na figura 113 são ilustradas as estratégias de desenvolvimento que norteiam um sólido projeto de ADAS/ACC.

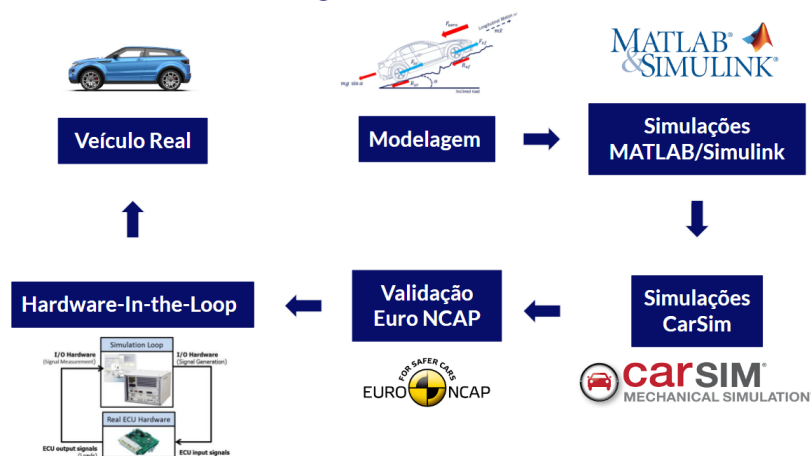


Figura 113: Estratégias de Desenvolvimento

8 CONCLUSÃO

Considerando-se o objetivo de validação em simulação realista da lei de controle “*CLF-CBF powered by QP with Model-Free Control*” (Função de Lyapunov de Controle - Função de Barreira de Controle em um *framework* de programação quadrática com Controle sem Modelo), tema desse trabalho, pode-se afirmar, com base nos resultados da tabela 13 e respectivas conclusões na seção 6.10, que a técnica prevista em teoria, principalmente nas referências [5] [14] e sintetizada na arquitetura de controle proposta na seção 1.1 é uma excelente solução para o problema de ACC considerando-se como parâmetro o Euro NCAP, teste referência na certificação de tecnologias ADAS.

Além disso, a adaptabilidade em tempo de execução do controle *Model-Free* a condições não lineares e até mesmo com caráter estocástico como as trocas de marcha automáticas garantiu, como previsto teoricamente, um desempenho satisfatório para o sistema de ACC. A utilização do *Model-Free* mostrou-se um elemento essencial para que fosse possível utilizar a técnica CLF-CBF com um modelo muito simplificado do veículo, de tal maneira que a implementação do controlador proposto pôde ser bastante simplificada e depender de poucos parâmetros (vide tabela 12). Dessa forma, o esquema de ACC proposto torna-se muito versátil, pois pode ser implementado em qualquer veículo na medida que depende somente de características comuns a qualquer veículo automotivo.

Já sobre a experiência de ajuste dos parâmetros do controle até chegar em uma configuração adequada que pudesse atender aos requisitos do Teste Euro NCAP (vide manual do teste [4]), pode-se afirmar que o processo é adequado para a implementação prática. Isso porque todos os parâmetros do controle apresentam significado físico direto, de maneira que a escolha de qual ou quais parâmetros ajustar para se chegar a um desempenho desejado é intuitiva e de fácil execução.

Quanto a impossibilidade de testar todas as condições de operação veicular existentes, o que é um problema para validações de tecnologia de todas as áreas do conhecimento, a lei de controle proposta é uma solução interessante. Isso porque ela é baseada na Função de Lyapunov de Controle que apresenta boas garantias teóricas de estabilização de

sistemas dinâmicos e de rastreabilidade da referência de controle. É também uma solução interessante por ser baseada na Função de Barreira de Controle, sempre priorizada quando do funcionamento do sistema, que apresenta sólida demonstração matemática no que se refere aos requisitos de segurança do sistema de ACC.

Por fim, analisando os resultados de simulação obtidos somente com o MATLAB e o Simulink em contraste com aqueles realizados com o software de simulação realista CarSim, fica então evidente a importância da validação do sistema em um simulador *benchmark* da área automotiva de alto desempenho. Tal evidência se justifica na medida em que foram necessárias revisões do ajuste dos parâmetros da lei de controle proposta quando as simulações em Matlab/Simulink passaram a ser realizadas no CarSim devido às condições mais realistas consideradas nessas simulações no CarSim. Além disso, erros numéricos associados à baixa fidelidade da simulação disponível somente no ambiente Simulink desapareceram quando a simulação passou a ser realizada no software de simulação realista CarSim.

Em resumo, o esquema de ACC proposto é fácil de implementar, pode ser aplicado em qualquer veículo dependendo de parâmetros comuns a qualquer veículo terrestre, apresenta boa base teórica no que tange o desempenho e principalmente a segurança do sistema e foi validado com êxito em ambiente de simulação realista, no principal teste de validação de tecnologias ADAS da Europa.

REFERÊNCIAS

- [1] G.J.L. Naus, J. Ploeg, M.J.G. Van de Molengraft, W.P.M.H. Heemels, and M. Steinbuch. Design and implementation of parameterized adaptive cruise control: An explicit model predictive control approach. *Control Engineering Practice*, 18(8):882–892, Apr 2010.
- [2] S. Waslander and J. Kelly - University of Toronto Course. Introduction to Self-Driving Cars Course. Acessado Jan. 10, 2022 [Online], 2022.
- [3] Wikipedia. Speed limits by country, 2022. Last accessed 1 November 2022.
- [4] Euro NCAP, Europe. *Test Assessment Protocol*, 2020.
- [5] Aaron D. Ames, Xiangru Xu, Jessy W. Grizzle, and Paulo Tabuada. Control barrier function based quadratic programs for safety critical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(8):3861–3876, 2017.
- [6] K. Vogel. A comparison of headway and time to collision as safety indicators. *Accident Analysis & Prevention*, 35:427–433, 2003.
- [7] Philip Polack, Sébastien Delprat, and Brigitte d’Andréa Novel. Brake and velocity model-free control on an actual vehicle. *Control Engineering Practice*, 92:104072, 2019.
- [8] Aaron D. Ames, Samuel Coogan, Magnus Egerstedt, Gennaro Notomista, Koushil Sreenath, and Paulo Tabuada. Control barrier functions: Theory and applications. In *2019 18th European Control Conference (ECC)*, pages 3420–3431, 2019.
- [9] U.S. Software System Safety Working Group. Adaptive Cruise Control System Overview. Acessado Jan. 10, 2022 [Online], 2005.
- [10] K. Suchit - Udemy Course. Advanced Driver Assistance System (ADAS). Acessado Fev. 03, 2022 [Online], 2022.
- [11] C. Hildreth. A quadratic programming procedure. *Naval Research Logistics Quarterly*, 4:79–85, 1957.
- [12] Huanjian Fei and Qingfeng Wang. Design and application of vehicle adaptive cruise strategy based on carsim. In *2021 China Automation Congress (CAC)*, pages 4426–4431, 2021.
- [13] P. Li, M. Wei, and X. Hou. Modeling and co-simulation of adaptive cruise control system. 34:622–626, 07 2012.
- [14] M. Flies and C. Join. Model-free control. *International Journal of Control*, 86(12):2228–2252, 2013.

- [15] Gabriel Pereira das Neves and Bruno Augusto Angélico. Model-free control of mechatronic systems based on algebraic estimation. *Asian Journal of Control*, 24(4):1575–1584, 2022.
- [16] C. Garcia. *Controle de Processos Industriais. Estratégias Convencionais*. Blucher, 2017.
- [17] Seungwuk Moon, Ilki Moon, and Kyongsu Yi. Design, tuning, and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance. *Control Engineering Practice*, 17(4):442–455, 2009.
- [18] Euro NCAP. Euro ncap for safer cars, 2022. Last accessed 10 October 2022.
- [19] Adit Joshi. Hardware-in-the-loop (hil) implementation and validation of sae level 2 autonomous vehicle with subsystem fault tolerant fallback performance for takeover scenarios. 09 2017.