

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**



# **Controlador difuso para veículos em platonning**

**Francisco António Colaço Restivo**

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Rui Esteves Araújo

12 de Outubro 2022



# Resumo

A indústria do transporte tem vindo a enfrentar grandes desafios como o aumento na procura de transportes, o constante aumento dos preços dos combustíveis, o aumento das emissões de gases de efeito de estufa e os consequentes impactos ambientais. Todos estes fatores têm forçado a humanidade a reduzir ao máximo a utilização de combustíveis fósseis. Como os automóveis e redes de transporte são responsáveis por grande parte destas emissões e consumos, existe a necessidade automatizar a condução de forma a torná-la mais eficaz e diminuir o congestionamento nas estradas.

Desta forma, este trabalho foca-se na automatização da condução longitudinal, a qual procura controlar um conjunto de veículos, um pelotão, a viajar com o mesmo destino a uma pequena distância entre veículos de forma a reduzir o consumo de combustível. Este trabalho procura utilizar uma abordagem de *platooning* com recurso ao conceito de dois sistemas de automação da condução longitudinal disponíveis no mercado: o *Cruise Control* e *Adaptive Cruise Control*. Com esse objetivo, é desenvolvido um controlador de velocidade baseado no conceito de *Cruise Control*, capaz de acelerar e travar o veículo, e um controlador de distância baseado no conceito do *Adaptive Cruise Control*, capaz de criar o plano de velocidade ideal para o veículo, utilizando em ambos o controlo difuso. O controlo dos veículos seguidores está dividido em duas camadas. Na camada superior encontra-se o controlador de distância, que recebe, através de um sensor ou comunicação, a distância ao veículo da frente ou do veículo líder e, com base no erro entre este valor e a distância referência, gera uma velocidade referência que passa à camada de controlo mais baixa, o controlador de velocidade que, com base no erro entre este valor e a velocidade atual, gera um sinal de saída capaz de controlar a aceleração/travagem do veículo. Os controladores desenvolvidos são por sua vez implementados no *software SIMULINK*, onde o principal objetivo é perceber a eficácia das arquiteturas projetadas sem ter em conta os consumos de combustível.

Os resultados demonstram que esta arquitetura é capaz de utilizar o *Cruise Control* e *Adaptive Cruise Control* de forma a controlar um pelotão de seis elementos eficazmente mas existe uma visível propagação das perturbações nos veículos mais afastados do líder impossibilitando o controlo de pelotões com mais elementos.



# Abstract

The transportation industry is facing major challenges such as increasing demand for transportation, the constant rise in fuel prices, the increase in greenhouse gas emissions and the consequent environmental impacts. All of these factors have forced humanity to reduce the use of fossil fuels as much as possible. As automobiles and transportation networks are responsible for a large part of these consumption and emissions, there is a need to automate driving to make it more efficient and reduce congestion on the roads.

Therefore, this work focuses on the automation of longitudinal driving, which seeks to control a set of vehicles, a platoon, traveling to the same destination at a small distance between vehicles in order to reduce fuel consumption. This work seeks to use a platooning approach using the concept of two commercially available longitudinal automation systems available in the market: Cruise Control and Adaptive Cruise Control. With this objective, we developed a speed controller based on the Cruise Control concept, capable of accelerating and braking the vehicle, and a distance controller based on the Adaptive Cruise Control concept, capable of creating the ideal speed plan for the vehicle, using in both fuzzy control. The control of the following vehicles is done by two layers. In the upper layer is the distance controller, which receives, through a sensor or communication, the distance to the vehicle in front or the leading vehicle and, based on the error between this value and the reference distance, generates a reference speed that passes to the lower control layer, the speed controller which, based on the error between this value and the current speed, generates an output signal capable of controlling the acceleration/braking of the vehicle. The developed controllers are in turn implemented in the software SIMULINK, where the main objective is to realize the effectiveness of the designed architectures without taking into account the fuel consumption.

The results show that this architecture is able to use Cruise Control and Adaptive Cruise Control in order to control a platoon of six elements effectively but there is visible propagation of disturbances in the vehicles farthest from the leader making it impossible to control of platoons with more elements.



# Agradecimentos

Este trabalho representa o final de uma grande etapa. Desta forma, quero agradecer a todos os que me apoiaram e aconselharam durante este trajeto e o tornaram possível.

Inicialmente, quero agradecer aos meus pais. Não há palavras que cheguem para agradecer tudo o que fizeram e têm feito por mim. À minha mãe, obrigado por todo o suporte emocional que me deste. Sem ti nunca seria possível ultrapassar todas as dificuldades que encontrei pelo caminho. Ao meu pai, obrigado pelas palavras amigas e encorajadoras que tens sempre para dar nos momentos de maior aperto e obrigado pela partilha de experiências e conhecimentos que foste adquirindo ao longo da tua vida, às vezes pode não parecer mas levo-as sempre comigo.

À minha avó Mimi e ao meu avô Joaquim que sempre me acolheram em qualquer tipo de situação e que, sem querer, me proporcionaram um espaço onde pude desenvolver o meu interesse pela engenharia.

Aos meus irmãos Tatiana, Jorge e João, por todo o amor, carinho e coragem que me deram e por toda a paciência que tiveram. Sem a vossa companhia não era possível.

Ao meu tio Elísio, tio Amândio e todos os restantes membros da minha família por me ajudarem com tudo o que os meus pais não conseguiram.

À Sara pelo apoio psicológico indispensável ao longo destes anos. Obrigado por todos os conselhos, sermões e palavras amigas que me fizeram continuar em frente e aperfeiçoar-me como pessoa. Obrigado por me tornares uma pessoa melhor e me ajudares a concluir esta etapa.

Ao Ed, ao Toto, ao Tropa, ao Enes, ao Tavares, ao Banderas, ao Saleiro, ao Arrojado, ao Miguel, ao Lebre, ao Freitinhas, ao Magda, ao Zé Miguel, ao Lucas, ao Vasquinho e a todos os amigos que fiz na faculdade, obrigado por toda a partilha de emoções, festas, guaridas, convívios e horas mal dormidas a estudar ao longo destes anos.

À Inês, ao Gonçalo, ao João Manuel, ao D8, à Joana Rita, à Joana, à Mariana, ao Lucca e ao Bateira, obrigado por, apesar de me ter afastado de forma a concluir esta etapa, terem estado sempre lá prontos para me receber como se nada se tivesse passado.

E por último um especial agradecimento ao professor Rui Esteves Araújo por aceitar trabalhar comigo numa situação tão peculiar e estar sempre presente para me ajudar a cruzar a meta neste percurso pelo ensino superior.

Francisco Restivo



À minha avó

*“Try and leave this world a little better than you found it,  
and when your turn comes to die,  
you can die happy in feeling that at any rate,  
you have not wasted your time but have done your best.”*

Robert Baden-Powell



# Conteúdo

|          |                                                                |           |
|----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                              | <b>1</b>  |
| 1.1      | Contexto e motivação . . . . .                                 | 1         |
| 1.2      | Objetivos . . . . .                                            | 3         |
| 1.3      | Estrutura da Dissertação . . . . .                             | 3         |
| <b>2</b> | <b>Revisão Bibliográfica</b>                                   | <b>5</b>  |
| 2.1      | Métodos de controlo que suportam o <i>platooning</i> . . . . . | 5         |
| 2.1.1    | <i>Cruise Control</i> . . . . .                                | 6         |
| 2.1.2    | <i>Adaptive Cruise Control</i> . . . . .                       | 6         |
| 2.1.3    | <i>Look-Ahead Control</i> . . . . .                            | 7         |
| 2.1.4    | <i>Pulse and Glide</i> . . . . .                               | 7         |
| 2.2      | Estratégias de controlo de pelotões . . . . .                  | 8         |
| 2.2.1    | <i>Platooning</i> sem comunicação . . . . .                    | 9         |
| 2.2.2    | <i>Platooning</i> com comunicação . . . . .                    | 10        |
| 2.3      | Segurança em <i>platooning</i> . . . . .                       | 15        |
| 2.4      | Conclusão . . . . .                                            | 15        |
| <b>3</b> | <b>Modelo matemático do sistema em estudo</b>                  | <b>17</b> |
| 3.1      | Dinâmica longitudinal de veículos . . . . .                    | 17        |
| 3.1.1    | Força de tração/travagem . . . . .                             | 18        |
| 3.1.2    | Força gravitacional . . . . .                                  | 18        |
| 3.1.3    | Força de rolamento . . . . .                                   | 18        |
| 3.1.4    | Força de resistência aerodinâmica . . . . .                    | 19        |
| 3.2      | Modelo dinâmico de um veículo . . . . .                        | 19        |
| 3.3      | Verificação do modelo desenvolvido . . . . .                   | 20        |
| <b>4</b> | <b>Sistema de controlo longitudinal</b>                        | <b>23</b> |
| 4.1      | Modelo de controlo difuso sem comunicação . . . . .            | 23        |
| 4.1.1    | Arquitetura de controlo . . . . .                              | 23        |
| 4.1.2    | Controlador de velocidade . . . . .                            | 24        |
| 4.1.3    | Controlador de distância . . . . .                             | 27        |
| 4.2      | Modelo de controlo difuso com comunicação . . . . .            | 32        |
| 4.2.1    | Arquitetura de controlo . . . . .                              | 32        |
| <b>5</b> | <b>Resultados das simulações</b>                               | <b>35</b> |
| 5.1      | Estrada plana . . . . .                                        | 37        |
| 5.1.1    | Resultados do pelotão sem comunicação . . . . .                | 37        |
| 5.1.2    | Resultados do pelotão com comunicação . . . . .                | 40        |

|          |                                                 |           |
|----------|-------------------------------------------------|-----------|
| 5.2      | Subida de uma encosta . . . . .                 | 42        |
| 5.2.1    | Resultados do pelotão sem comunicação . . . . . | 43        |
| 5.2.2    | Resultados do pelotão com comunicação . . . . . | 46        |
| 5.3      | Descida de uma encosta . . . . .                | 48        |
| 5.3.1    | Resultados do pelotão sem comunicação . . . . . | 49        |
| 5.3.2    | Resultados do pelotão com comunicação . . . . . | 52        |
| 5.4      | Conclusão . . . . .                             | 54        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões e Trabalho futuro</b>             | <b>57</b> |
| 6.1      | Conclusão . . . . .                             | 57        |
| 6.2      | Trabalho futuro . . . . .                       | 58        |
|          | <b>Referências</b>                              | <b>59</b> |

# Lista de Figuras

|      |                                                                                                                                                                                              |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Emissões de gás de efeito estufa globais, por setor . . . . .                                                                                                                                | 2  |
| 1.2  | Exemplo de <i>Phantom traffic jam</i> . . . . .                                                                                                                                              | 2  |
| 2.1  | Arquitetura de controlo em CC. . . . .                                                                                                                                                       | 6  |
| 2.2  | Arquitetura de controlo em ACC. . . . .                                                                                                                                                      | 6  |
| 2.3  | Fluxo de informação no LAC . . . . .                                                                                                                                                         | 7  |
| 2.4  | Método <i>Pulse and Glide</i> . . . . .                                                                                                                                                      | 8  |
| 2.5  | <i>Platooning</i> baseado em ACC. . . . .                                                                                                                                                    | 9  |
| 2.6  | Pelotão baseado em ACC com comunicação V2V. . . . .                                                                                                                                          | 11 |
| 2.7  | Arquitetura de controlo de <i>Adaptive Look-Ahead Control</i> . . . . .                                                                                                                      | 11 |
| 2.8  | Arquitetura de controlo de <i>Cooperative Look-Ahead Control</i> . . . . .                                                                                                                   | 13 |
| 2.9  | Arquitetura <i>Cooperative Adaptive Cruise Control</i> . . . . .                                                                                                                             | 13 |
| 2.10 | Arquitetura <i>Cooperative Adaptive Cruise Control</i> . . . . .                                                                                                                             | 14 |
| 3.1  | Representação das forças longitudinais que atuam num veículo. . . . .                                                                                                                        | 17 |
| 3.2  | Implementação do modelo representado pela equação 3.8 no <i>software Simulink</i> . . . . .                                                                                                  | 20 |
| 3.3  | Resultados do teste de aceleração/travagem. . . . .                                                                                                                                          | 21 |
| 4.1  | Arquitetura de controlo baseada em lógica difusa. . . . .                                                                                                                                    | 24 |
| 4.2  | Arquitetura do controlador de velocidade baseado em lógica difusa. . . . .                                                                                                                   | 24 |
| 4.3  | Representação gráfica das funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas nas variáveis $\frac{du(t)}{dt}$ , $e(t)$ e $\frac{de(t)}{dt}$ . . . . .                                 | 26 |
| 4.4  | Resultado da verificação do controlador de velocidade desenvolvido no <i>software SIMULINK</i> . . . . .                                                                                     | 27 |
| 4.5  | Arquitetura do controlador de um veículo seguidor. . . . .                                                                                                                                   | 27 |
| 4.6  | Arquitetura do controlador de distância baseado em lógica difusa. . . . .                                                                                                                    | 28 |
| 4.7  | Representação gráfica das funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas na variável $\frac{de(t)}{dt}$ . . . . .                                                                 | 28 |
| 4.8  | Representação gráfica das funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas na variável $\frac{du(t)}{dt}$ . . . . .                                                                 | 29 |
| 4.9  | Representação gráfica das funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas na variável $\frac{d^2e(t)}{dt^2}$ . . . . .                                                             | 31 |
| 4.10 | Resultado da verificação do controlador de distância desenvolvido no <i>software SIMULINK</i> . . . . .                                                                                      | 33 |
| 4.11 | Arquitetura de controlo baseada em lógica difusa com comunicação. . . . .                                                                                                                    | 33 |
| 5.1  | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação num terreno plano. . . . . | 37 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2  | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência num terreno plano. . . . .                | 38 |
| 5.3  | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação num terreno plano. . . . .                                             | 40 |
| 5.4  | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência num terreno plano. . . . .                | 41 |
| 5.5  | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação da subida de uma encosta. . . . .                                      | 43 |
| 5.6  | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência durante a subida de uma encosta. . . . .  | 44 |
| 5.7  | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação da subida de uma encosta. . . . .                                      | 46 |
| 5.8  | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência durante a subida de uma encosta. . . . .  | 47 |
| 5.9  | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação da descida de uma encosta. . . . .                                     | 49 |
| 5.10 | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência durante a descida de uma encosta. . . . . | 50 |
| 5.11 | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação da descida de uma encosta. . . . .                                     | 52 |
| 5.12 | Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência durante a descida de uma encosta. . . . . | 53 |

# Lista de Tabelas

|      |                                                                                                                                    |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Sistemas de controlo longitudinal aplicado ao <i>platooning</i> . . . . .                                                          | 9  |
| 3.1  | Descrição dos parâmetros da equação (3.8). . . . .                                                                                 | 20 |
| 3.2  | Valores atribuídos aos parâmetros do veículo para verificação do modelo de um veículo. . . . .                                     | 21 |
| 4.1  | Funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas nas variáveis $\frac{du(t)}{dt}$ , $e(t)$ e $\frac{de(t)}{dt}$ . . . . . | 25 |
| 4.2  | Regras difusas para controlo de velocidade. . . . .                                                                                | 26 |
| 4.3  | Parâmetros do veículo utilizado na verificação do controlador de velocidade. . . . .                                               | 26 |
| 4.4  | Funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas na variável $\frac{de(t)}{dt}$ . . . . .                                 | 29 |
| 4.5  | Funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas na variável $\frac{du(t)}{dt}$ . . . . .                                 | 30 |
| 4.6  | Funções de pertença das variáveis linguísticas utilizada na variável $\frac{d^2e(t)}{dt^2}$ . . . . .                              | 30 |
| 4.7  | Regras difusas para controlo de distância. . . . .                                                                                 | 32 |
| 4.8  | Parâmetros dos veículos utilizados na verificação do controlador de distância. . . . .                                             | 32 |
| 5.1  | Parâmetros dos veículos do pelotão utilizado na verificação do modelo de controlo. . . . .                                         | 35 |
| 5.2  | Ganhos de pré e pós processamento utilizados nos controladores. . . . .                                                            | 36 |
| 5.3  | Resposta de um pelotão sem comunicação a mudanças de velocidade num plano. . . . .                                                 | 39 |
| 5.4  | Resposta de um pelotão sem comunicação a uma paragem de emergência num plano. . . . .                                              | 39 |
| 5.5  | Resposta de um pelotão com comunicação a mudanças de velocidade num plano . . . . .                                                | 42 |
| 5.6  | Resposta de um pelotão com comunicação a uma paragem de emergência num plano. . . . .                                              | 42 |
| 5.7  | Resposta de um pelotão sem comunicação a mudanças de velocidade numa subida. . . . .                                               | 45 |
| 5.8  | Resposta de um pelotão sem comunicação a uma paragem de emergência numa subida. . . . .                                            | 45 |
| 5.9  | Resposta de um pelotão sem comunicação a mudanças de velocidade numa subida. . . . .                                               | 48 |
| 5.10 | Resposta de um pelotão com comunicação a uma paragem de emergência numa subida. . . . .                                            | 48 |
| 5.11 | Resposta de um pelotão sem comunicação a mudanças de velocidade numa descida. . . . .                                              | 51 |
| 5.12 | Resposta de um pelotão sem comunicação a uma paragem de emergência numa descida. . . . .                                           | 51 |
| 5.13 | Resposta de um pelotão com comunicação a mudanças de velocidade numa descida. . . . .                                              | 54 |
| 5.14 | Resposta de um pelotão com comunicação a uma paragem de emergência numa descida. . . . .                                           | 54 |



# Abreviaturas e Símbolos

|                 |                                                                |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|
| ACC             | <i>Adaptive Cruise Control</i>                                 |
| ADAS            | <i>Advanced driver-assistance system</i>                       |
| ALAC            | <i>Adaptive Look-Ahead Control</i>                             |
| CACC            | <i>Cooperative Adaptive Cruise Control</i>                     |
| CC              | <i>Cruise Control</i>                                          |
| CLAC            | <i>Cooperative Look-Ahead Control</i>                          |
| CO <sub>2</sub> | <i>Dioxido de Carbono</i>                                      |
| EACC            | <i>Extended Adaptive Cruise Control</i>                        |
| ECU             | <i>Electronic Control Unit</i>                                 |
| ENSEMBLE        | <i>ENabling SafE Multi-Brand pLatooning for Europe</i>         |
| GPS             | <i>Global Positioning System</i>                               |
| LAC             | <i>Look-Ahead Control</i>                                      |
| LIDAR           | <i>Light Detection And Ranging</i>                             |
| LN              | <i>Large Negative</i>                                          |
| LP              | <i>Large Positive</i>                                          |
| MN              | <i>Medium Negative</i>                                         |
| MP              | <i>Medium Positive</i>                                         |
| PnG             | <i>Pulse and Glide</i>                                         |
| RADAR           | <i>Radio Detection and Ranging</i>                             |
| SN              | <i>Small Negative</i>                                          |
| SP              | <i>Small Positive</i>                                          |
| V2I             | <i>Comunicação de veículo para infraestrutura</i>              |
| V2V             | <i>Comunicação de veículo para veículo</i>                     |
| V2X             | <i>Comunicação de veículo para veículo e/ou infraestrutura</i> |
| ZE              | <i>Zero</i>                                                    |



# Capítulo 1

## Introdução

Este capítulo tem como objetivo introduzir o tema tratado nesta dissertação. Inicialmente, no subcapítulo 1.1 é exposto o contexto em que a dissertação se insere e de seguida, são referidos os motivos pelos quais existe a necessidade de estudar o tema. No subcapítulo 1.2 encontram-se enumerados os objetivos deste trabalho e por fim, no subcapítulo 1.3, é apresentada a estrutura da restante dissertação.

### 1.1 Contexto e motivação

O grande crescimento da economia global resulta no consequente aumento das redes de transporte rodoviárias que, por sua vez, se reflete nas emissões de gases de efeito estufa do setor. Na União Europeia, em 2020, existiam cerca 560 veículos de passageiros e 81 veículos comerciais por cada mil habitantes [1]. Este número tem tendência para vir a aumentar e, consequentemente, aumentar com ele a intensidade de tráfego, o consumo energético e a emissão de gases de efeito estufa.

É possível constatar que, nos últimos anos, o número de desastres naturais consequentes das mudanças climáticas provocadas pelo Homem é cada vez maior. A utilização de combustíveis fósseis aumenta a concentração de dióxido de carbono,  $CO_2$ , na atmosfera, um dos gases que provoca o efeito estufa. Apesar de ser difícil de prever os efeitos que esta mudança na atmosfera irá provocar, é provável que a temperatura média do planeta aumente, os fenómenos climatéricos se tornem mais intensos, os glaciares e mantos de gelo derretam parcialmente, o nível médio das águas do mar suba, as colheitas diminuam não só em quantidade mas também no seu valor nutricional e que o ambiente se torne mais favorável a pestes [2].

Ultimamente, o ser humano encontra-se cada vez mais ciente do impacto ambiental das suas ações e, desta forma, procura cada vez mais formas de reduzir a sua pegada de carbono.

Em 2020 o transporte rodoviário foi responsável por 11.9% das emissões de gases de efeito estufa onde 60% são emitidos por veículos de passageiros e 40% emitidos por veículos de transporte de mercadorias, como pode ser observado na 1.1 [3].

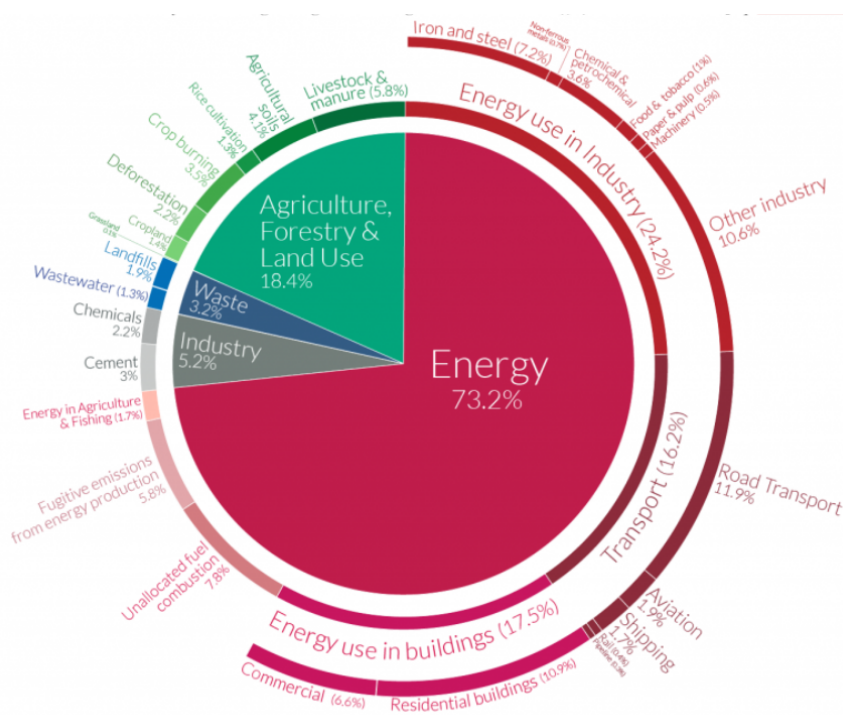


Figura 1.1: Emissões de gás de efeito estufa globais, por setor [3].

O congestionamento automóvel é também um problema cada vez mais comum, que afeta em especial áreas urbanas. Este fenómeno pode ser explicado não só pelo aumento do número de veículos na estrada como também por pequenas perturbações introduzidas pela condução humana.

A forma mais eficaz de um conjunto de veículos viajar consiste em cada um dos veículos manter a mesma distância do veículo precedente e o veículo que o sucede. Esta configuração torna-se complexa de manter devido a diversos fatores tais como, pequenas perturbações inseridas pela inconsistência na condução humana. Por exemplo, se um dos condutores se aproximar demasiado do veículo da frente e, por algum motivo, este tiver de desacelerar repentinamente, o condutor terá de parar para ficar em segurança. Ao parar, terá uma demora no arranque obrigando o veículo anterior a parar também (figura 1.2).

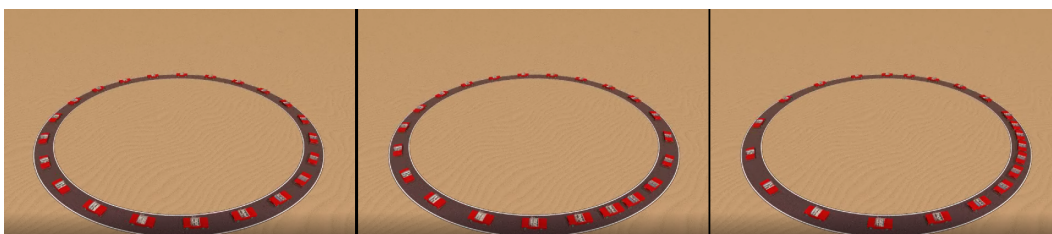


Figura 1.2: Exemplo de *Phantom traffic jam* [4].

Consequentemente, surge uma onda de alta densidade de veículos sem qualquer motivo óbvio como acidentes rodoviários ou supressões de vias. Este fenómeno é conhecido como *Phantom traffic jam* (engarrafamento fantasma) [4].

Desta forma, os fabricantes automóveis têm vindo a instalar sistemas de apoio à condução longitudinal e transversal com o objetivo de diminuir os consumos de combustível e melhorar o conforto dos passageiros. Estas abordagens, apesar de eficazes, focam-se apenas num veículo enquanto que, uma abordagem num grupo de veículos pode alcançar mais vantagens, nomeadamente o *platooning*.

O *platooning* trata-se de uma técnica que procura manter a mínima distância entre veículos dentro de um grupo de veículos a viajar com o mesmo destino de forma a explorar o arrasto aéreo com a finalidade de reduzir os seus consumos energéticos. Cada elemento do grupo deve ser capaz de, no mínimo, monitorizar a posição do elemento que o precede, seja através de sensores ou comunicação entre veículos, de forma a manter a distância ao mesmo.

O veículo líder, que conduz o pelotão, cria um túnel de ar para os membros posteriores diminuindo assim o arrasto aéreo. Sabe-se que o túnel é mais eficaz quanto menor for a distância entre veículos e quanto maior for a velocidade do pelotão. Por outro lado, o líder também experimentará uma redução no seu arrasto, devido à forma mais aerodinâmica que o pelotão apresenta [5].

Atualmente o *platooning* de veículos pesados de mercadorias está a ser estudado e testado com o apoio da união europeia (UE) e de fabricantes de veículos pesados europeus no projeto "*Enabling Safe Multi-Brand Platooning for Europe*", (*ENSEMBLE*) cujo principal objetivo consiste na modernização do sistema de transportes. Esta modernização pode ser conseguida através do aprimoramento dos consumos de combustível, da diminuição do gases de efeito estufa, do congestionamento rodoviário e do aumento da segurança rodoviária [6].

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo estudar o desempenho de controladores de pelotões baseados em sistemas difusos. Os leitores não familiarizados com o funcionamento do controlo difuso podem encontrar uma introdução mais completa ao tema em "An Introduction to Fuzzy Control"([7]). Com este propósito, os principais objetivos deste trabalho são desenvolver um controlador de velocidade e um controlador de distância com recurso a lógica difusa, aplicar os controladores desenvolvidos num sistema de controlo de pelotões não cooperativo e sem comunicação e num sistema de controlo não cooperativo com comunicação de forma a testar a eficácia desta arquitetura simulando-a no *software SIMULINK*.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução esta dissertação será constituída por mais 5 capítulos.

No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica sobre estudos, conceitos e tecnologias dentro da área de interesse da dissertação. No capítulo 3 têm o objetivo de desenvolver e verificar o modelo dinâmico de um veículo utilizado ao longo da dissertação.

No capítulo 4 são projetados e verificados os controladores de velocidade e distância baseados em lógica difusa e é desenvolvida uma arquitetura de controlo por camadas sem recurso à comunicação V2V.

No capítulo 5 a arquitetura de controlo desenvolvida é testada num pelotão de seis veículos em diversas topografias e planos de velocidade.

Por fim, o capítulo 6 contém a conclusão deste trabalho bem como algumas sugestões para em caso de trabalhos futuros se resolverem os problemas aqui apresentados.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo providenciar informação sobre as áreas de desenvolvimento desta dissertação de forma a possibilitar uma mais fácil compreensão e discussão do tema.

Inicialmente, no subcapítulo 2.1, são revistos alguns sistemas de apoio à condução longitudinal que podem ser encontrados implementados em veículos comercialmente disponíveis, os *driver-assistance system* (ADAS). São revistos também alguns métodos de condução que promovem a poupança de combustível e que podem ser replicados no controlo de pelotões.

Seguidamente, no subcapítulo 2.2, são explicados alguns conceitos sobre o *platooning*, mais concretamente o *platooning* sem comunicação, o *platooning* não cooperativo e o *platooning* cooperativo.

Para finalizar, é apresentado um pequeno conceito básico de segurança em *platooning*.

### 2.1 Métodos de controlo que suportam o *platooning*

A necessidade de tornar os veículos mais rápidos, confortáveis e seguros forçou os fabricantes a melhorar as tecnologias nestes contidas. A quantidade e qualidade dos sensores instalados aumentou e consequentemente a informação transmitida à centralina (ECU). Desta forma, foi também desenvolvido e melhorado este computador com o objetivo de ser capaz de processar toda a informação mais rapidamente e se tornar mais robusto. Por outro lado, a evolução tecnológica acompanhou a evolução do setor automóvel o que levou a uma diminuição no preço e dimensão dos componentes permitindo aplicá-los a diversas gamas de veículos.

De forma a conseguir automatizar um pelotão, manter pequenas distâncias entre veículos eficientemente, em segurança e diminuir a sua resistência aerodinâmica, o controlo tem de ser baseado em informações obtidas através de sensores instalados nos veículos ou por alguma forma de comunicação. Assim sendo, neste capítulo são apresentadas tecnologias de controlo longitudinal que suportam o *platooning* e as suas funcionalidades que possibilitam a perceção do ambiente em redor do veículo.

### 2.1.1 Cruise Control

O *Cruise Control* (CC) (Shaout and Jarrah, 1997) trata-se de um sistema de ajuda à condução longitudinal que é baseado no controlo por *feedback* (como pode ser observado na figura 2.1), ou seja, da seguinte forma: ao atingir a velocidade cruzeiro desejada, o condutor ativa o sistema que, por sua vez, irá comparar a velocidade atual do veículo com a velocidade cruzeiro definida, calculando assim o erro no sistema. Caso este seja maior que zero, o sistema acelera o veículo, caso este seja inferior a zero desacelera-o. Este sistema encontra-se frequentemente instalado em veículos de passageiros.



Figura 2.1: Arquitetura de controlo em CC.

### 2.1.2 Adaptive Cruise Control

O CC apesar de proporcionar um maior conforto em viagens longas, não oferece qualquer tipo de aumento de segurança. Como o objetivo de colmatar esta falha, foi criado e lançado o *Adaptive Cruise Control* (ACC), que surge instalado em veículos de luxo no final dos anos 90. Ao contrário do CC, o ACC é capaz de controlar não só a aceleração do veículo como também a sua travagem. Desta forma, este controlador é capaz de manter a velocidade cruzeiro do veículo, como no CC, mas quando deteta um veículo à sua frente é capaz de manter uma distância de segurança deste colmatando assim a carência de segurança do CC, figura 2.2.

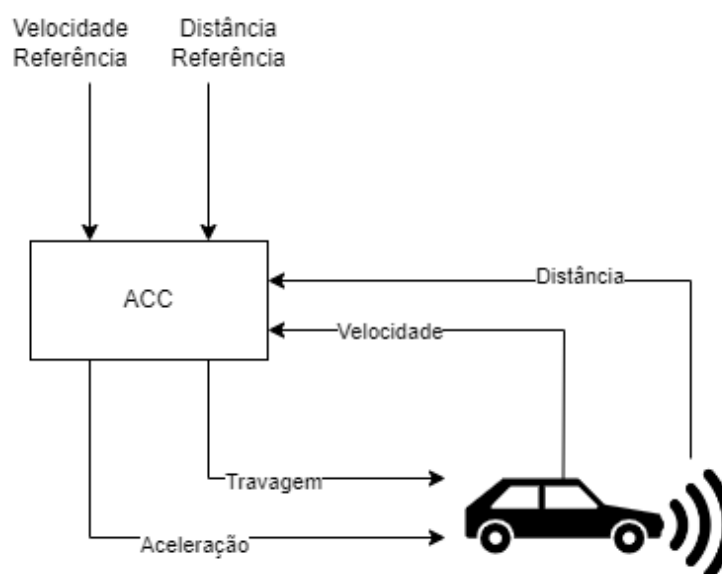


Figura 2.2: Arquitetura de controlo em ACC.

Este tipo de controlo é baseado nos dados obtidos por um sensor instalado no veículo. Nos primeiros modelos disponíveis o sensor utilizado era um RADAR instalado na frente do veículo. Hoje em dia é comum o ACC utilizar outros tipos de sensores como por exemplo o LIDAR ou um conjunto de câmaras a funcionar em paralelo com o RADAR de forma a fornecer informação mais precisa.

### 2.1.3 Look-Ahead Control

O *Look Ahead Control* (LAC) tem como princípio de funcionamento a utilização da posição e da topografia da estrada na qual o veículo segue para traçar o melhor plano de velocidade para o trajeto. O LAC utiliza o sistema GPS com o objetivo de obter a posição do veículo a controlar e verifica, numa base de dados topográfica, o declive da estrada à qual o veículo se aproxima. Desta forma, é calculado o plano de velocidade ideal para a trajetória que segue de forma a minimizar o consumo de combustível do veículo (figura 2.3).

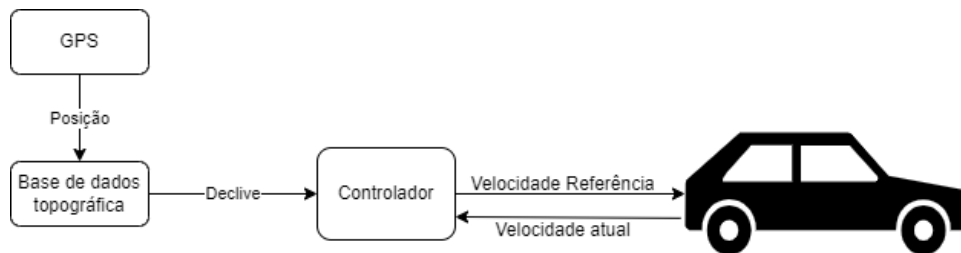


Figura 2.3: Fluxo de informação no LAC [8].

Pode-se constatar que este tipo de controlo torna o veículo mais eficiente energeticamente uma vez que, considerando os limites de velocidade, tem em conta o declive da estrada e utiliza-o para sua vantagem. Desta forma consegue não só evitar travagens desnecessárias quando o veículo se está a aproximar de subidas de encostas como evita também acelerações no início de descidas.

### 2.1.4 Pulse and Glide

O *Pulse and Glide* (PnG) consiste numa estratégia de economia de combustível que se encontra dividida em dois momentos. No momento *Pulse* o veículo acelera um pouco acima da velocidade desejada pelo condutor, já o momento *Glide* consiste em desacelerar o carro. A desaceleração pode acontecer com o carro "com a mudança engatada" ou em ponto morto dependendo sempre do tipo de transmissão e motor que o veículo possui. Um exemplo de um veículo a executar este ciclo pode ser observado na figura 2.4.

Diversos estudos comprovam a superioridade deste método na poupança de combustível [9] [10] mas um ponto negativo na utilização do PnG é o desconforto que provoca no condutor uma vez que este passa bastante tempo na cabine e o motor acelera e desacelera de forma rítmica. Apesar deste ponto negativo, este método encontra-se bastantes vezes conjugado com alguns tipos de arquitetura de controlo de pelotões, melhorando bastante a sua eficácia.

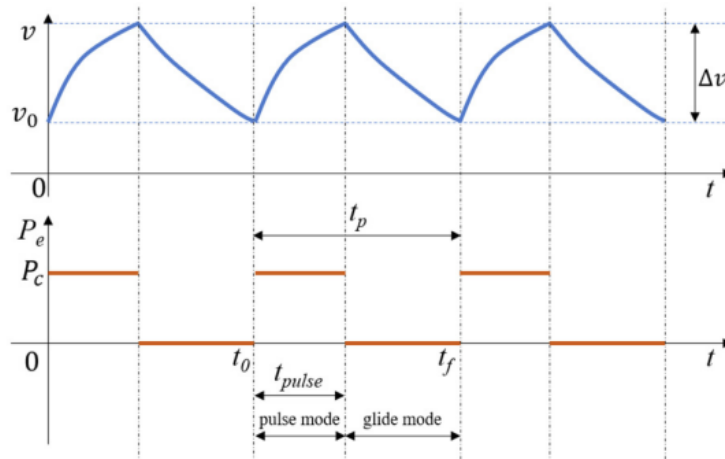


Figura 2.4: Método *Pulse and Glide* [9].

Em [11], o autor consegue reduzir até 4% nos consumos de combustível quando alia o PnG com a arquitetura de controlo ALAC.

Em [12], os autores também constataam a eficácia do PnG quando aliado à arquitetura ALAC mas concluem que este método não deve ser considerado pois, para além do desconforto que causa aos passageiros, desgasta muito mais rapidamente a caixa de velocidades do veículo.

## 2.2 Estratégias de controlo de pelotões

O conceito de automatizar parcialmente o tráfego em autoestradas não é recente, na *World's Fair* de 1939 em Nova Iorque, a *General Motors* apresentou a exposição *Futurama* na qual expunha a sua visão de "super autoestradas" onde os carros eram capazes de fazer curvas a 80 km/h quando controlados por um sistema de "rádio controlo automático" de forma a manterem uma distância de segurança. Nos anos cinquenta começam a ser estudadas as dinâmicas em conjuntos de veículos, por exemplo, em [13], o autor estuda o arranque de um grupo de veículos em fila quanto o sinal de trânsito passa a verde. Nos anos sessenta surge o interesse pelo conceito de pelotão, conjunto de veículos em fila controlados automaticamente, dentro da comunidade do controlo. Em [14], os autores propõem uma arquitetura de controlo *feedback* baseada na comunicação entre todos os veículos do pelotão. Mais tarde, em [15] e [16], surgem soluções de controlo que requerem a comunicação com menor número de veículos do pelotão.

O *platooning* de veículos pode ser descrito como um alinhamento de vários veículos a viajar a uma certa velocidade, onde a prioridade de cada veículo deve ser manter a distância mínima ao veículo que se encontra imediatamente à sua frente, dentro dos limites de segurança, de forma a utilizar o vácuo causado pela forma e velocidade do veículo precedente com o objetivo reduzir a resistência aerodinâmica e, consequentemente, os seus consumos.

Diversas estratégias de controlo podem ser aplicadas de forma a automatizar um pelotão. As

estratégias podem variar consoante a existência de comunicação entre veículos e/ou infraestruturas, a utilização de sensores de forma a obter informação do declive da estrada que se aproxima, e a existência de cooperação entre os veículos, como pode ser observado na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Sistemas de controlo longitudinal aplicado ao *platooning*.

|                                      | <i>platooning</i><br>sem comunicação | <i>platooning</i><br>não cooperativo | <i>platooning</i><br>cooperativo |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Sem informação topográfica posterior | ACC [17]                             | EACC [12]                            | CACC [18]                        |
| Com informação topográfica posterior | LAC                                  | ALAC [18]                            | CLAC [18]                        |

### 2.2.1 *Platooning* sem comunicação

O *platooning* sem comunicação trata-se da forma mais básica de *platooning*. Nesta forma de *platooning* cada veículo baseia-se nos sensores que tem instalados para decidir qual a sua estratégia de velocidade ideal, ou seja, não existe cooperação. Por esta razão, o ACC é mencionado como uma plataforma de lançamento do *platooning* por Hedrick em [19] e por Rajamani e Zhu em [20]. Os primeiros passos para automação longitudinal em veículos surgiram juntamente com a introdução do ACC, por exemplo [17]. Como é descrito na secção 2.1.2, o ACC é capaz de manter uma velocidade cruzeiro predefinida e adaptá-la no caso de ser detetado um veículo à sua frente. Este sistema possibilita uma forma rudimentar de *platooning* visto que permite o veículo seguidor manter uma certa distância do veículo da frente. Este método de *platooning* não é muito eficaz pois, como o veículo seguidor não tem qualquer informação sobre o veículo que segue para além da distância a que se encontra do mesmo, irão existir situações de aceleração e travagem indesejadas.

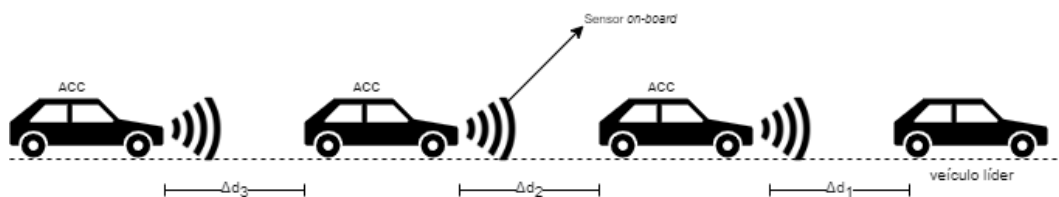


Figura 2.5: *Platooning* baseado em ACC.

É possível observar na figura 2.5 que o líder do pelotão utiliza o CC, que controla apenas a sua aceleração, já os restantes membros do pelotão seguem o líder tendo como referência a distância a que se encontram do veículo à sua frente. Esta distância é fornecida por um sensor instalado na parte da frente do veículo.

Hoje em dia, o ACC é constituído por mais e melhores sensores que são capazes de fornecer mais informações e mais precisas. Apesar de esta configuração conseguir garantir um espaçamento constante com dois veículos torna-se limitado: se o pelotão for constituído por três ou mais veículos, o sistema torna-se instável [21]. Uma mudança de velocidade no trânsito, numa auto-estrada

por exemplo, onde circula um pelotão de veículos em *platooning* baseado no controlo ACC resultaria, provavelmente, num embate de vários veículos. A instabilidade deste método surge devido ao atraso na deteção da mudança de velocidade entre o primeiro e o último membro [22].

Ling e Lindsten, em [23], procuram solucionar a instabilidade do sistema ao aliar uma rede neuronal ao ACC de forma a replicar mais precisamente a velocidade do veículo líder sem recurso a qualquer tipo de comunicação. Os autores implementam também um sistema de LAC no veículo líder de forma ao comportamento do mesmo ser replicado pelos veículos que o seguem. Os autores concluem que a rede neuronal implementada é bastante eficaz em terrenos planos mas, em terrenos com declives mais variáveis, pode ser mais vantajoso cada veículo circular independentemente utilizando apenas o LAC como estratégia de controlo.

### 2.2.2 *Platooning* com comunicação

A introdução de unidades de comunicação sem fios em veículos permite a implementação de comunicações veículo/veículo (V2V) e veículo/interface (V2I).

Ao aliar à informação GPS a velocidade e aceleração do veículo torna possível o veículo estimar o seu estado com uma precisão de centímetros [24] e comunicá-lo (V2V) aos restantes elementos do pelotão. Os veículos são também, desta forma, capazes de comunicar os seus parâmetros físicos como a sua massa, capacidade de travagem e de aceleração no caso do *platooning* cooperativo.

Por outro lado, a comunicação V2I permite os veículos receberem não só receberem informação topográfica da estrada em que seguem como também informações de trânsito. Este tipo de comunicação possibilita também a partilha de informação entre os elementos de um pelotão e, por exemplo um *back-end office* ou um serviço de *cloud*, por exemplo [25] e [26], possibilitando assim a implementação de arquiteturas de controlo mais complexas e eficazes.

A comunicação permite assim a implementação do *platooning* com comunicação que pode ser dividido em duas categorias, o cooperativo e o não cooperativo. O *platooning* cooperativo procura adaptar a estratégia de cada veículo de forma a obter a máxima eficiência do conjunto enquanto que no *platooning* não cooperativo cada veículo procurar otimizar o seu próprio trajeto com as informações fornecidas pelos outros veículos.

#### 2.2.2.1 *Platooning* não cooperativo

O *platooning* não cooperativo, apesar de utilizar a comunicação V2V/V2I, não utiliza uma estratégia de controlo global, ou seja, cada veículo procura minimizar os seus próprios consumos sem ter em conta os veículos que o seguem.

A comunicação, aliada aos sistemas de apoio à condução longitudinal anteriormente descritos, colmata algumas das falhas que o *platooning* sem comunicação apresenta.

Quando comparado um pelotão controlado apenas por ACC com um pelotão com o mesmo tipo de controlo aliado à partilha de velocidade e aceleração do líder com os restantes elementos,

figura 2.6, pode-se concluir que os erros derivados da propagação de distúrbios são eliminados, tornando assim o sistema estável [27].

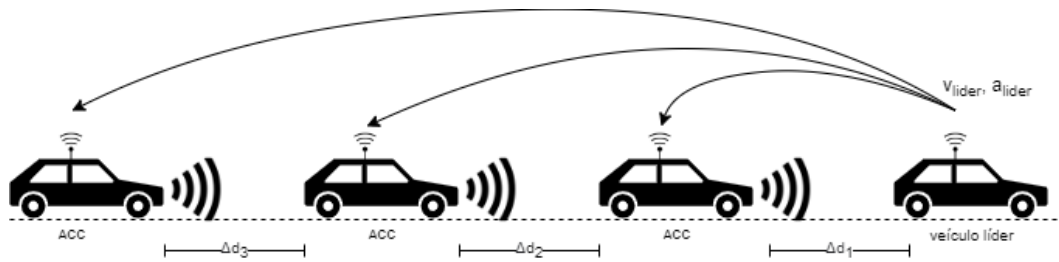


Figura 2.6: Pelotão baseado em ACC com comunicação V2V.

Em [12], Ohlsén e Sten propõe um método no qual combinam o ACC com a comunicação V2V, onde cada veículo utiliza a velocidade e aceleração dos elementos precedentes de forma a eliminar a propagação de erros existente no controlo de um pelotão utilizando apenas ACC. O modelo, testado através de simulações, comprovou ser bastante eficaz tendo apenas pouca eficácia em descidas mais acentuadas. Isto deve-se ao facto de na simulação os veículos não utilizarem os travões para desacelerar o veículo mas sim o motor. Os autores referem-se a esta arquitetura de controlo *Extended Adaptive Cruise Control* (EACC).

Diversos autores estudam também o concílio do controlo ACC, o LAC e a comunicação V2X. Turri em [28], propõe um método onde o controlo de cada veículo se baseia no plano de velocidade delineado pelo LAC do veículo que o antecede, recebido através da uma comunicação V2V, para planear o seu controlo ótimo. O autor combina também o método PnG a este processo de forma a torná-lo ainda mais rentável. A arquitetura desenvolvida por Turri foi simulada num modelo longitudinal por um pelotão de dois veículos. Os resultados da simulação do método comprovam uma redução de cerca de 18% de consumo de combustível do veículo seguidor quando comparado a um veículo a viajar fora de um pelotão e cerca de 7% quando comparado a um veículo em pelotão com uma distância constante face ao líder.

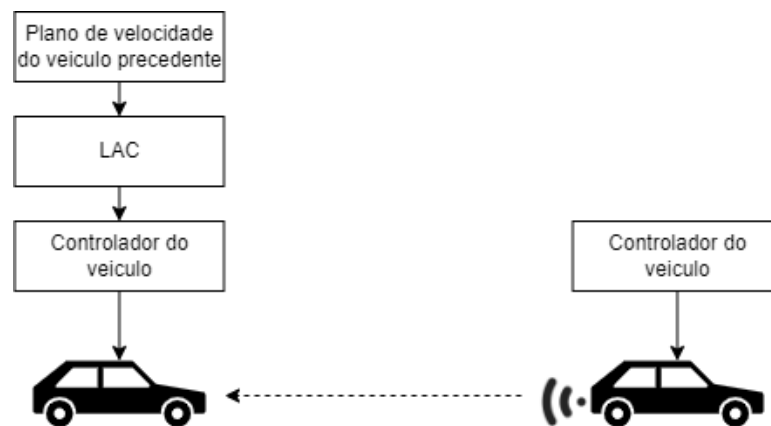


Figura 2.7: Arquitetura de controlo de *Adaptive Look-Ahead Control*.

Já Alam em [18], estuda a aplicação do método anteriormente referido aplicado a pelotões com

maior número de elementos. O conceito aprofundado pelo autor é bastante semelhante ao testado por Turi. A arquitetura desenvolvida pelo autor, à qual se refere como *Adaptive Look-Ahead Control* (ALAC), consiste na receção do perfil de velocidade do veículo precedente via comunicação wireless V2V, tendo este de otimizar o seu perfil de velocidade de forma adaptável tendo sempre em conta a restrição adicional da distância de segurança. Como o perfil de velocidade do veículo antecedente já está determinado torna-se simples o cálculo da variação do espaçamento em relação ao declive do segmento no horizonte, figura 2.7.

Desta forma, o *platooning* não cooperativo pode ser visto como uma solução de controlo que resulta numa eficácia mais baixa quando comparado a um sistema cooperativo mas com uma complexidade menor. O *platooning* cooperativo requer não só comunicação entre veículos como também algum tipo de protocolo de forma a uniformizá-lo globalmente. Enquanto não existe uma política de cooperação implementada atualmente, o *platooning* não cooperativo deve ser considerado como uma alternativa.

### 2.2.2.2 Platooning Cooperativo

O *platooning* cooperativo requer a existência de alguma forma de comunicação entre veículos, ou seja, não está limitado a certos protocolos de comunicações nem apenas à partilha de determinados sinais. A comunicação deve ser feita com a camada superior de controlo do pelotão, esteja esta implementada num veículo (V2V) ou numa infraestrutura (V2I), que por sua vez delinea o perfil de velocidade ótimo para o conjunto e comunica-o a cada elemento do pelotão com o objetivo de aumentar a eficácia energética do grupo.

Alam em [18], procura uma solução de controlo, com recurso ao uso de controladores de velocidade disponíveis comercialmente, de forma a otimizar o custo energético de um pelotão atravessar uma colina. O LAC provou não ser prático pois a subida da colina requer uma grande aceleração que poderia comprometer as distâncias de segurança. Desta forma, autor testou duas novas formas de arquitetura de controlo em pelotões as quais designou como *Cooperative Look-Ahead Control* (CLAC) e como *Cooperative Adaptive Cruise Control* (CACC).

Alam emprega a arquitetura de controlo CLAC que utiliza a comunicação V2V e V2I de forma a controlar o pelotão globalmente, figura 2.8. O autor utiliza uma arquitetura de controlo de duas camadas, a camada mais baixa, que consiste num controlo individual descentralizado equipado com comunicação V2V de forma a transmitir a informação sobre o estado do veículo, e a camada mais alta, que consiste num controlador global que comunica com todos os veículos do pelotão (V2I). O controlador global tem em consideração a topografia da rota e todas as especificações e estados dos veículos que constituem o pelotão de forma a conseguir garantir que todos os veículos são capazes de atingir as velocidades planeadas dentro dos tempos planeados. Este plano global de velocidades é transmitido a cada um dos veículos e o controlador individual deve procurar manter as velocidades planeadas, minimizando sempre o desvio. Este método permite que o controlador global esteja instalado numa infraestrutura ou em qualquer veículo do pelotão pois os controladores da camada mais baixa são responsáveis pela segurança do trajeto, ou seja, a falha em qualquer tipo de comunicação não acarreta nenhum tipo de falha de segurança nos veículos.

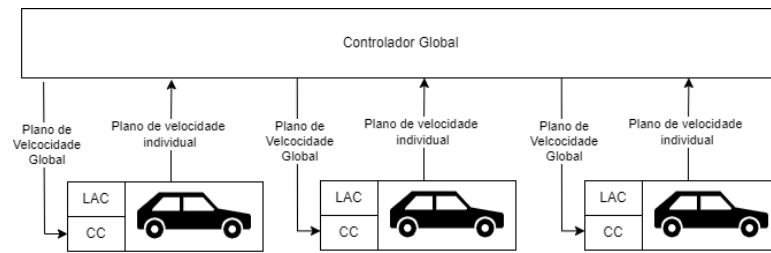


Figura 2.8: Arquitetura de controlo de *Cooperative Look-Ahead Control*.

Turri, em [11], apresenta um modelo de controlo CLAC com uma arquitetura de controlo idêntica ao modelo de Alam. No modelo de Alam o controlador da camada mais alta recebe estratégia de velocidade calculada pelo LAC de cada um dos veículos do pelotão e, a partir destas, define uma estratégia global para o pelotão. No modelo de Turri, o autor aplica um LAC na camada superior de controlo tendo em conta toda a informação topográfica obtida por cada um dos veículos e as suas limitações físicas de forma a obter a estratégia de velocidade ótima de forma a aprimorar a eficiência energética do pelotão globalmente.

Alam propõe também, no mesmo documento, a arquitetura de controlo CACC 2.9. Esta solução consiste novamente numa arquitetura de controlo por camadas. A camada mais baixa resume-se a um CC convencional que garante três vantagens: mantém a velocidade do veículo, melhora o rendimento energético do mesmo e melhora o conforto do passageiro em longas viagens, figura 2.9.

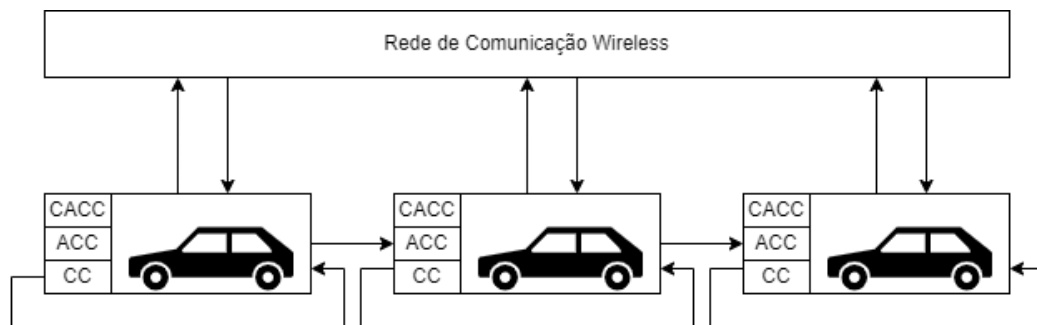


Figura 2.9: Arquitetura *Cooperative Adaptive Cruise Control* (Adaptado de [18]).

A camada acima, o ACC, tem como função manter a distância desejada entre veículos. Esta camada oferece uma melhoria na segurança do sistema pois é-lhe permitido atuar sobre os travões e tem uma capacidade de reação muito menor que a do condutor. Por fim, a camada do topo consiste num controlador CACC, que forma decisões de controlo descentralizadas baseadas nos veículos dentro de alcance do seu transceptor. Este controlador tem como função manter uma distância adequada entre veículos dentro do raio de comunicação de forma a reduzir o consumo de combustível e mantendo a sua segurança.

Em [29], os autores optam por uma solução de controlo CACC descentralizada semelhante à utilizada por Alam, onde cada veículo se encontra equipado com um sistema CC, ACC e CACC,

onde o principal foco do estudo é a formação de pelotões em CACC e a resposta deste tipo de pelotões e/ou elementos a interações com veículos sem a capacidade de fazer parte de um pelotão. Inicialmente, um veículo a viajar fora de um pelotão é controlado por CC, à velocidade definida pelo seu condutor. Se este se deparar com um outro veículo com o qual não consegue comunicar, passa a ser controlado por ACC e segue-o. Já no caso de conseguir comunicar com o veículo que se encontra à sua frente o veículo passa a ser controlado por CACC e passa a fazer parte de um pelotão. Este veículo passa a comunicar também com o líder do pelotão e com o veículo que o precede de forma a manter o intervalo definido entre veículos, como pode ser observado na figura 2.10.

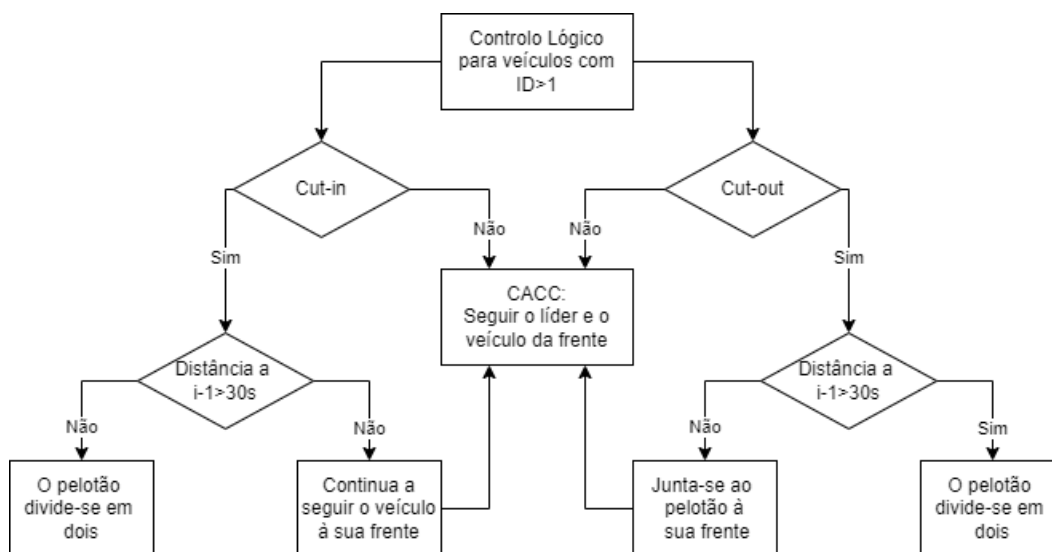


Figura 2.10: Arquitetura *Cooperative Adaptive Cruise Control* (Adaptado de [30]).

O método CACC é descrito pelos autores como um passo intermédio para atingir o controlo de pelotões de veículos com distâncias entre veículos mínimas. Este conceito é descrito desta forma pois consiste apenas num controlo longitudinal o que obriga os condutores a controlar o veículo transversalmente, e monitorizar as condições de tráfego.

Assim, com o objetivo de testar o método de controlo sobre uma variedade de condições reais e desta forma descobrir os potenciais impactos que poderia trazer este método quando implementado no quotidiano, o CACC foi instalado num conjunto de três veículos pesados e submetido a um conjunto de testes que simulam situações reais.

Os autores concluem, nesta investigação, que o sistema ACC já implementado em produção nos veículos pode ser alterado com sucesso de forma a produzir um controlador CACC sem um custo muito significativo, o sistema é capaz de funcionar com veículos externos ao pelotão entre veículos em *platooning* (*cut-ins*) e consegue reduzir notavelmente o congestionamento no trânsito.

Ambos os métodos mostraram-se bastante promissores nas simulações, em especial o CLAC que se aproxima bastante da eficiência energética hipoteticamente ótima. Apesar de ser provado que as arquiteturas de *platooning* cooperativo reduzem significativamente tanto o consumo de combustível como o congestionamento do tráfego pode ser consideradas difíceis de implementar

devido à complexidade computacional do problema, devido à necessidade de um protocolo de comunicação comum a todos os fabricantes de veículos e devido à possibilidade de existência de falhas na comunicação.

## 2.3 Segurança em platooning

O *platooning* tem como objetivo ser aplicado na via pública com outros veículos fora do pelotão. Existe sempre a possibilidade de acontecerem eventos adversos como acidentes de viação e veículos entre os elementos do pelotão o que obriga, consequentemente, a que todos os veículos mantenham uma distância de segurança entre o veículo da frente de forma a que o seu tempo de reação e travagem impeça a colisão quando este desacelera ao máximo. Em [31], Chien e Ioannou formulam a equação da distância de segurança entre veículos. A expressão obtida tem em conta a máxima desaceleração e atrasos de deteção, representada em (2.1)

$$d_{safe} = \lambda_1(v_i^2 - v_{i-1}^2) + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (2.1)$$

onde  $v_{i-1}$  e  $v_i$  representam, respetivamente, a velocidade do veículo precedente e do veículo atual e  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  são parâmetros adequados. Expressões semelhantes foram formuladas em [32] e [33] e utilizadas para criar uma lógica binária para controlo da travagem num ACC.

Mais recentemente, Alam, em [18], propôs uma abordagem baseada em jogos para computar o *set* de segurança para pelotões a utilizar *Cooperative Adaptive Cruise Control* (CACC) e comunicação entre veículos. O autor demonstra que esta abordagem torna seguro viajar à velocidade máxima com uma distância entre veículos de 1.2 m. Em [34], os autores apresentam um mecanismo que mantém a segurança quando um sistema de conectividade falha em CACC. Já em [35], são testados diversos indicadores de segurança num pelotão de dois veículos com um intervalo de 0,5 s entre eles. O autor explica que nesta situação, recorrendo a indicadores baseados na comunicação entre veículos, o pelotão consegue-se distinguir entre uma situação de risco e uma situação segura.

## 2.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as premissa tecnológicas para o *platooning* de veículos. A tecnologia instalada em veículos como melhores funcionalidades do ECU e mais e melhores sensores. De seguida foram apresentados algumas formas de assistência à condução longitudinal já disponíveis comercialmente na maioria dos veículos. Entre estes irá ser dado particular destaque ao CC e ao ACC logo deste trabalho. Seguidamente, foi apresentada uma perspetiva geral quanto aos diversos métodos de controlo de pelotões já estudados e testados por outros autores e instituições. Por fim houve uma breve visão geral quanto à segurança no *platooning*.



## Capítulo 3

# Modelo matemático do sistema em estudo

Neste capítulo é desenvolvido o modelo matemático que representa a dinâmica de um veículo que integra um pelotão. Inicialmente, no subcapítulo 3.1, são retratadas todas as forças aplicadas num veículo durante o *platooning*. De seguida, no subcapítulo 3.2 são simplificadas algumas das forças caracterizadas de forma a desenvolver o modelo matemático. Por fim, no subcapítulo 3.3 o modelo é testado e verificado.

### 3.1 Dinâmica longitudinal de veículos

Um veículo em movimento encontra-se sujeito a diversas forças para além das produzidas pelo seu motor e travões. Uma visão geral das forças que atuam longitudinalmente sobre um veículo podem ser observadas na figura 3.1.

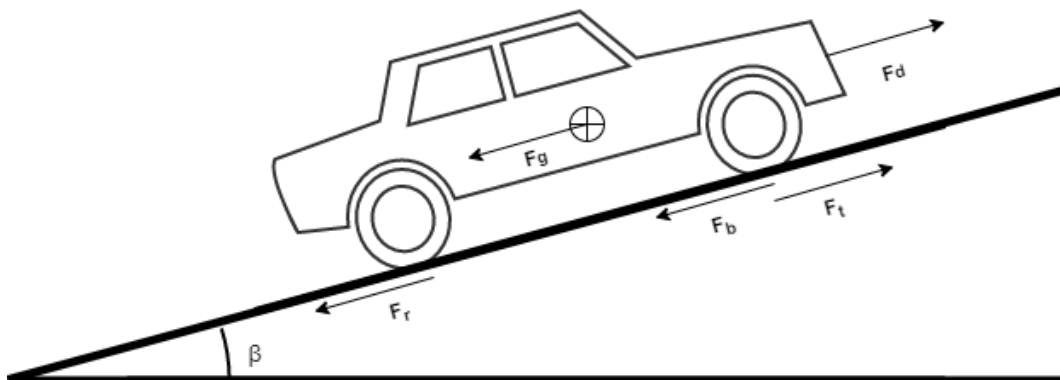


Figura 3.1: Representação das forças longitudinais que atuam num veículo.

Utilizando a segunda lei de Newton podemos exprimir a dinâmica do veículo na equação (3.1)

$$m_i \dot{v}_i = F_{t,i} - F_{b,i} - F_{g,i} - F_{r,i} - F_{d,i} \quad (3.1)$$

onde  $F_t$  e  $F_b$  representam as forças geradas pelos atuadores, respetivamente forças de tração e travagem,  $F_d$  e  $F_r$  representam as forças de atrito do ar e do rolamento,  $F_g$  representa a força gravitacional e  $i$  representa o índice de posição do veículo no pelotão.

### 3.1.1 Força de tração/travagem

A força de tração representa a força gerada pelo motor do veículo e fornecida aos pneus de forma a o movimentar. Já a força de travagem representa a força contrária ao movimento que permite o veículo desacelerar mais rapidamente.

De forma a simplificar o modelo, ambas as forças são representadas pela equação (3.2),

$$F_{b,i} + F_{t,i} = m_i \xi_i \quad (3.2)$$

onde  $\xi_i$  representa a aceleração do motor/travões e pode ser obtida através da equação (3.3),

$$\frac{d\xi_i}{dt} = -\frac{\xi_i}{\tau_i} + \frac{u_i}{m_i \tau_i} \quad (3.3)$$

onde  $\tau_i$  representa a constante de tempo do motor e  $u_i$  a entrada de controlo do motor, onde valores positivos correspondem a acelerações e valores negativos correspondem a travagens, ou seja, a equação da dinâmica do motor retrata ao mesmo tempo o motor e os travões.

### 3.1.2 Força gravitacional

A força gravitacional resulta da componente gravítica no eixo longitudinal. Esta força tanto pode resistir como assistir o movimento pois varia com inclinação da estrada ( $\alpha$ ). Esta força é representada pela equação (3.4).

$$F_{g,i}(\alpha) = m_i g_a \sin \alpha \quad (3.4)$$

### 3.1.3 Força de rolamento

A força de rolamento resulta da interação dos pneus de um veículo com a superfície da estrada. Trata-se de uma força resistiva que se deve principalmente à deformação dos pneus durante a compressão e expansão dos mesmos [36].

$$F_{r,i} = -c_r m_i g_a \quad (3.5)$$

Esta força é aproximadamente proporcional à carga vertical nos pneus e é representada pela equação (3.5), onde a variável  $c_r$  representa o coeficiente de rolamento do veículo  $i$ . Este parâmetro esta dependente da temperatura, pressão e dimensões dos pneus. Desta forma, como o estudo não envolve a variação de nenhum destes fatores, a força de rolamento é constante logo, com o objetivo de simplificar a equação da dinâmica do veículo, foi utilizada a constante  $d_m$  para representar a força de rolamento.

### 3.1.4 Força de resistência aerodinâmica

A força de resistência aerodinâmica resulta da deslocação de ar causada em consequência do movimento do veículo. Desta forma esta força resistiva não se comporta como as restantes que são independentes da velocidade do veículo. A força de atrito aerodinâmico é representada pela equação (3.6)

$$F_{d,i} = \frac{1}{2} \rho_i v^2 c_{d,i} A_i \quad (3.6)$$

onde  $\rho$  representa a densidade do fluido pelo qual o corpo em movimento se encontra envolvido,  $v$  representa a velocidade do corpo,  $A$  representa área do corpo e  $c_d$  representa o coeficiente de resistência aerodinâmica. De forma a simplificar o modelo foi utilizada a equação (3.7), onde todas as constantes físicas do veículo  $i$ , apresentadas na equação (3.6), são representadas por  $K_{d,i}$ .

$$F_{d,i} = K_{d,i} v^2 \quad (3.7)$$

## 3.2 Modelo dinâmico de um veículo

O modelo longitudinal dinâmico de um veículo utilizado ao longo desta dissertação consiste numa simplificação da realidade e é representado pela equação (3.8). Todos os parâmetros apresentados na equação do modelo final encontram-se descritos na tabela 3.1.

$$\begin{cases} m_i \dot{v}_i = m_i \xi_i - m_i g_a \sin \alpha - d_m - K_{d,i} v^2 \\ \frac{d\xi_i}{dt} = -\frac{\xi}{\tau_i} + \frac{u_i}{m_i \tau_i} \end{cases} \quad (3.8)$$

Tabela 3.1: Descrição dos parâmetros da equação (3.8).

| Símbolo     | Descrição                            | Unidade           |
|-------------|--------------------------------------|-------------------|
| $i$         | Posição do veículo no pelotão        | -                 |
| $v_i$       | Velocidade do veículo                | $[\frac{m}{s}]$   |
| $\dot{v}_i$ | Aceleração do veículo                | $[\frac{m}{s^2}]$ |
| $m_i$       | Massa do veículo                     | $[kg]$            |
| $\xi_i$     | Aceleração do motor/travões          | $[\frac{m}{s^2}]$ |
| $\alpha$    | Inclinação da estrada                | $[rad]$           |
| $d(m, i)$   | Força de rolamento                   | $[N]$             |
| $K(d, i)$   | Constante aerodinâmica do veículo    | $[\frac{kg}{m}]$  |
| $\tau_i$    | Constante de tempo do motor          | $[s]$             |
| $u_i(t)$    | Entrada de controlo do motor/travões | $[N]$             |

### 3.3 Verificação do modelo desenvolvido

Após a implementação em *SIMULINK* do modelo dinâmico desenvolvido (figura 3.2) foi necessária a verificação do sistema. Com esse objetivo, foi efetuado um teste no sistema em malha aberta de forma a comprovar que o modelo tem o desempenho esperado.

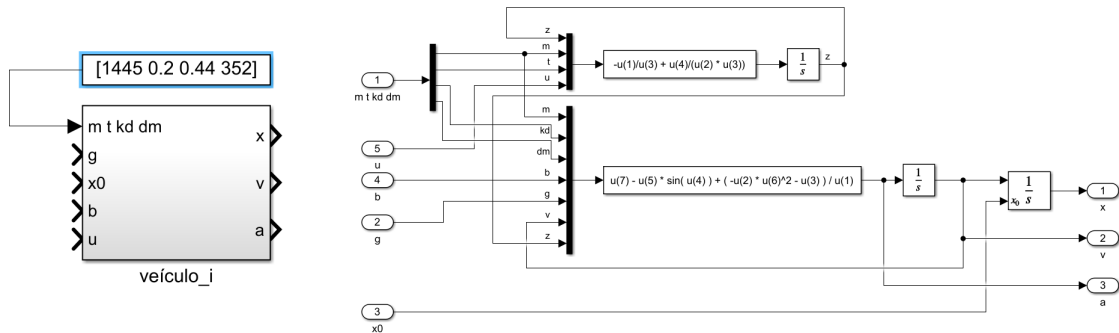


Figura 3.2: Implementação do modelo representado pela equação 3.8 no software Simulink.

Inicialmente, são definidas algumas características do veículo como a massa, a constante de tempo do motor, a constante de atrito aerodinâmico e a força de arrasto, representadas na figura 3.2 pelas variáveis  $m$ ,  $t$ ,  $kd$ , e  $dm$  respetivamente. De seguida, é aplicada à variável de entrada  $u(t)$  um valor constante de forma a que o veículo estabilize numa velocidade constante e, consequentemente, a sua aceleração seja zero. Assumindo que  $u(t)$  toma o valor de 10000, pode-se, com recurso à transformada de Laplace da segunda equação do sistema (3.8), obter a equação (3.9).

$$\xi_i = \frac{10000}{m_i \tau_i} (\tau_i - \tau_i e^{-\frac{1}{\tau_i} t}) \quad (3.9)$$

Desta forma, é possível calcular o valor de  $\lim_{t \rightarrow \infty} \xi(t)$  e assim calcular a velocidade na qual o veículo estabiliza.

Tabela 3.2: Valores atribuídos aos parâmetros do veículo para verificação do modelo de um veículo.

| Variável                      | Valor  |
|-------------------------------|--------|
| $m$ [kg]                      | 1445   |
| $\tau$ [s]                    | 0,2    |
| $K_d$ [ $\frac{m}{kg}$ ]      | 0,44   |
| $d_m$ [N]                     | 352    |
| $u(t)$ [N]                    | 10000  |
| $\xi$ , [ $\frac{m}{s^2}$ ]   | 6,92   |
| $v_{final}$ [ $\frac{m}{s}$ ] | 148,08 |

Na tabela 3.2 podem ser observadas as constantes utilizadas nos cálculos e a velocidade na qual se espera que o veículo estabilize.

Após os cálculos, o modelo foi testado no *SIMULINK*, obtendo assim os valores que podem ser observados na figura 3.3.

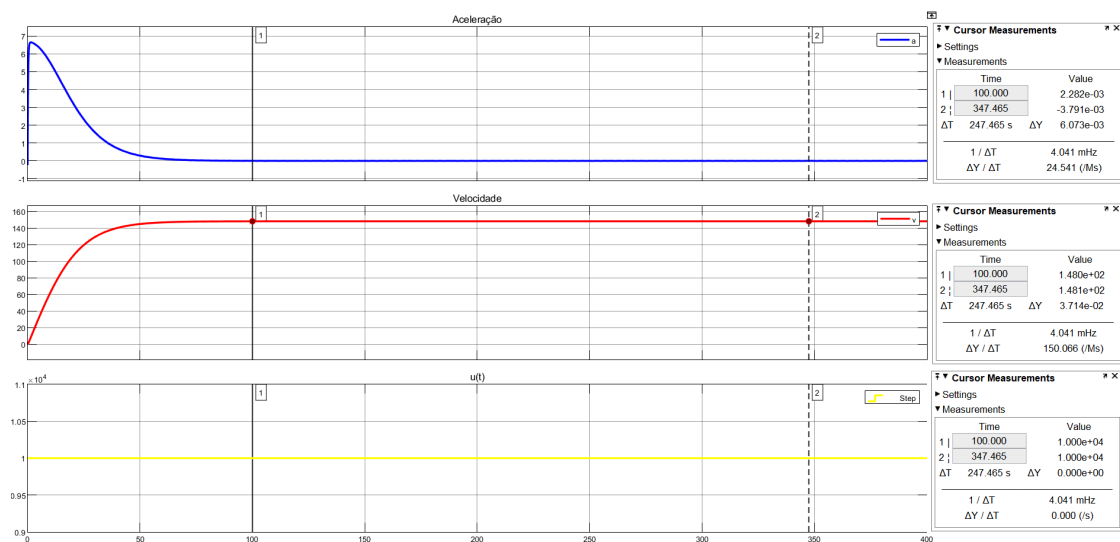


Figura 3.3: Resultados do teste de aceleração/travagem.

Os valores simulados correspondem aos valores calculados, comprovando assim o correto funcionamento do modelo implementado.



## Capítulo 4

# Sistema de controlo longitudinal

Neste capítulo são apresentadas e desenvolvidas as abordagens de controlo baseadas em controlo difuso com o objetivo de controlar pelotões. Primeiramente, é exposta a arquitetura de controlo sem recurso a comunicação, onde cada veículo baseia o seu controlo na sua posição relativa ao veículo à sua frente. De seguida, é exposta a arquitetura com recurso a comunicação V2V, onde cada veículo baseia o seu controlo na sua posição relativa ao líder do pelotão.

### 4.1 Modelo de controlo difuso sem comunicação

#### 4.1.1 Arquitetura de controlo

A arquitetura de controlo inicialmente estudada nesta dissertação consiste num platooning baseado em ACC e sem recurso a qualquer tipo de comunicação, onde o veículo líder é controlado por um controlador que tem como objetivo seguir uma velocidade referência. Os restantes veículos do pelotão utilizam numa arquitetura de controlo por camadas. A camada mais baixa compreende um controlador de velocidade, igual ao utilizado no líder, cujo objetivo é acelerar ou travar o veículo de forma a manter a velocidade igual à velocidade referência. A velocidade referência é obtida pelo controlador da camada superior, um controlador de distância, que tem como objetivo calcular a velocidade a que o veículo deve seguir de forma a manter a distância referência ao veículo precedente (figura 4.1).

Tanto o controlo de velocidade como o de distância utilizam controladores linguísticos difusos. Estes controladores requerem um ajuste de parâmetros mais complexo face a outros controladores pois existe um maior número de graus de liberdade e não existem metodologias sistemáticas que facilitem esta tarefa.

Uma das peculiaridades do controlador difuso consiste na metodologia utilizada na criação de regras que se irão traduzir na estratégia de controlo e integrar a base de conhecimento do controlador. A estratégia utilizada na geração de regras para os controladores deste trabalho teve como base aquilo que na literatura se designa por conhecimento de especialistas, que se baseia no conhecimento prévio do sistema a controlar.

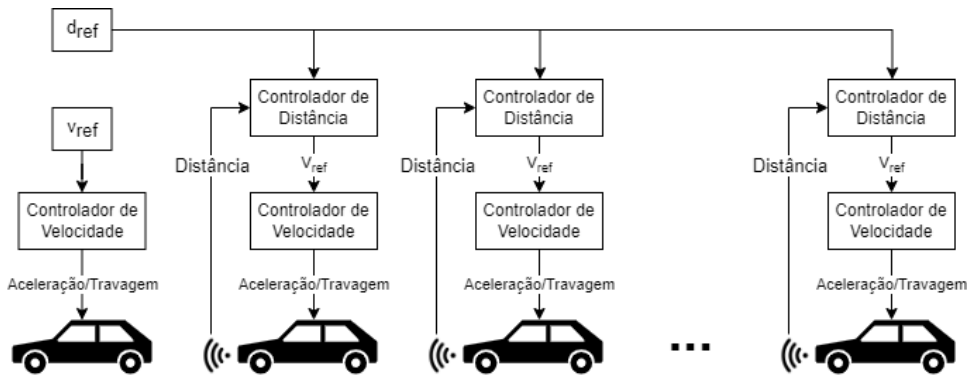


Figura 4.1: Arquitetura de controlo baseada em lógica difusa.

#### 4.1.2 Controlador de velocidade

O CC tem como objetivo manter a velocidade do veículo igual à velocidade referência selecionada pelo condutor, controlando apenas o acelerador.

A estratégia utilizada de forma a controlar a velocidade do veículo baseia-se, como no CC, na diferença entre a velocidade atual e a velocidade referência ( $e(t)$ ) mas, ao contrário do CC, o controlador desenvolvido tem a capacidade de controlar a aceleração e a travagem do veículo de forma a corrigir mais rapidamente o erro.

Como já foi referido anteriormente, este controlador utiliza uma arquitetura de lógica difusa, como se pode observar na figura 4.2. As variáveis G1 e G2 representam os ganhos de pré-processamento dos sinais de entrada e G3 o ganho de pós-processamento da variável de saída.

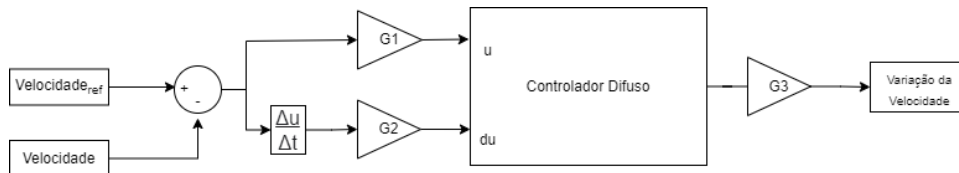


Figura 4.2: Arquitetura do controlador de velocidade baseado em lógica difusa.

Este controlador utiliza como variáveis de entrada a diferença entre a velocidade referência e a velocidade atual, o erro ( $e(t)$ ), a sua variação ( $\frac{de(t)}{dt}$ ) e como variável de saída a variação da aceleração ( $\frac{du(t)}{dt}$ ). Para todas estas variáveis foram consideradas sete funções de pertinência associadas às seguintes designações linguísticas: *Large Negative* (LN), *Medium Negative* (MN), *Small Negative* (SN), *Zero* (ZE), *Small Positive* (SP), *Medium Positive* (MP) e *Large Positive* (LP). As funções de pertinência associadas a cada designação linguística encontram-se apresentadas na tabela 4.1 e representadas na figura 4.3.

Como no controlador de velocidade, em específico, existem duas variáveis de entrada, o erro ( $e(t)$ ) e a variação do erro ( $\frac{de(t)}{dt}$ ) e uma variável de saída a variação da aceleração do motor/travões ( $\frac{du(t)}{dt}$ ). Esta repartição resultou assim num conjunto de 49 regras baseadas na regra geral apresentada equação (4.1) que pode ser observado na tabela 4.2.

Tabela 4.1: Funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas nas variáveis  $\frac{du(t)}{dt}$ ,  $e(t)$  e  $\frac{de(t)}{dt}$ .

| Designação Linguística | Função de Pertença                                                                                                                                                         |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Large Negative</i>  | $\begin{cases} y = 1, -1 \leq x \leq -0,82 \\ y = -\frac{25}{6}x - \frac{7}{3}, -0,82 < x < -0,56 \\ y = 0, x \geq -0,56 \end{cases}$                                      |
| <i>Medium Negative</i> | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,82 \vee x \geq -0,14 \\ y = \frac{25}{12}x + \frac{41}{24}, -0,82 < x \leq -0,34 \\ y = -5x - \frac{7}{10}, -0,34 < x < -0,14 \end{cases}$ |
| <i>Small Negative</i>  | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,48 \vee x \geq 0 \\ y = \frac{25}{7}x + \frac{12}{7}, -0,48 < x \leq -0,2 \\ y = -5x, -0,2 < x < 0 \end{cases}$                            |
| <i>Zero</i>            | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,07 \vee x \geq 0,07 \\ y = \frac{100}{7}x + 1, -0,07 < x \leq 0 \\ y = -\frac{100}{7}x + 1, 0 < x < 0,07 \end{cases}$                      |
| <i>Small Positive</i>  | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0 \vee x \geq 0,48 \\ y = 5x, 0 < x \leq 0,2 \\ y = -\frac{25}{7}x + \frac{12}{7}, 0,2 < x < 0,48 \end{cases}$                                |
| <i>Medium Positive</i> | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0 \vee x \geq 0,48 \\ y = 5x - \frac{7}{10}, 0 < x \leq 0,2 \\ y = -\frac{25}{12}x + \frac{41}{24}, 0,2 < x < 0,48 \end{cases}$               |
| <i>Large Positive</i>  | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0,56 \\ y = \frac{25}{6}x - \frac{7}{3}, 0,56 < x < 0,82 \\ y = 1, 0,82 \leq x \leq 1 \end{cases}$                                            |

$$IF \quad e(t) = \dots \quad AND \quad \frac{de(t)}{dt} = \dots \quad THEN \quad \frac{du(t)}{dt} = \dots \quad (4.1)$$

De forma a que o leitor entenda a estratégia de conhecimento especialista seguem-se dois exemplos da lógica utilizada de modo a gerar as regras do controlador de velocidade que podem ser observadas na tabela 4.2:

-Se o erro é um ZE, ou seja, a velocidade do veículo encontra-se igual ao valor referência e a variação do erro é um LP, ou seja, a velocidade do veículo está tendencialmente a aumentar face ao valor de referência, então a aceleração deve aumentar moderadamente, logo  $\frac{du(t)}{de}$  deve ser MP.

-Se o erro é um LP, ou seja, a velocidade do veículo encontra-se bastante a abaixo do valor referência e a variação do erro é um LN, ou seja, a velocidade do veículo está tendencialmente a aproximar-se do valor de referência, então a aceleração deve manter-se constante, logo  $\frac{du(t)}{dt}$  deve ser ZE.

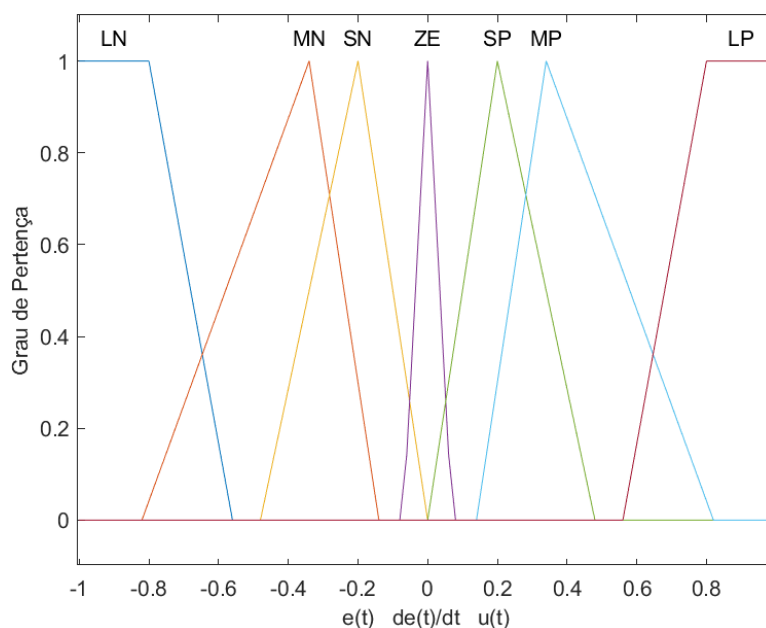


Figura 4.3: Representação gráfica das funções de pertinência das variáveis linguísticas utilizadas nas variáveis  $\frac{du(t)}{dt}$ ,  $e(t)$  e  $\frac{de(t)}{dt}$ .

Tabela 4.2: Regras difusas para controlo de velocidade.

| $\frac{du(t)}{dt}$ |    | $e(t)$ |    |    |    |    |    |    |
|--------------------|----|--------|----|----|----|----|----|----|
|                    |    | LN     | MN | SN | ZE | SP | MP | LP |
| $\frac{de(t)}{dt}$ | LN | LN     | LN | MN | MN | SN | SN | ZE |
|                    | MN | LN     | MN | MN | SN | SN | ZE | SP |
|                    | SN | MN     | MN | SN | SN | ZE | SP | SP |
|                    | ZE | MN     | SN | SN | ZE | SP | SP | MP |
|                    | SP | SN     | SN | ZE | SP | SP | MP | MP |
|                    | MP | SN     | ZE | SP | SP | MP | MP | LP |
|                    | LP | ZE     | SP | SP | MP | MP | LP | LP |

#### 4.1.2.1 Verificação do controlador de velocidade

Após implementar o modelo do controlador de velocidade no *SIMULINK*, existe a necessidade de comprovar se o seu funcionamento é o esperado. Com esse objetivo foi criado um perfil de testes onde existe uma variação de inclinação na estrada e uma variação de velocidade referência ao longo do percurso. A missão de condução desenvolvida consiste no controlo da velocidade de um veículo, com as características descritas na tabela 4.3, que decorreu sem qualquer tipo de limitações de velocidade e encontra-se representada na figura 4.10.

Tabela 4.3: Parâmetros do veículo utilizado na verificação do controlador de velocidade.

| Massa [kg] | $\tau$ [s] | $K_d$ [ $\frac{kg}{m}$ ] | $d_m$ [N] |
|------------|------------|--------------------------|-----------|
| 1445       | 0,2        | 0,44                     | 352       |

O veículo encontra-se inicialmente a uma velocidade referência de 15 m/s numa estrada com

0% de inclinação. De seguida a velocidade referência aumenta para 20 m/s. O controlador de velocidade tem depois de lidar com três variações de inclinação: 1% , 3% e por fim -5%. Para terminar, já numa estrada com 0% de inclinação, a velocidade referencia é reduzida para 15 m/s.

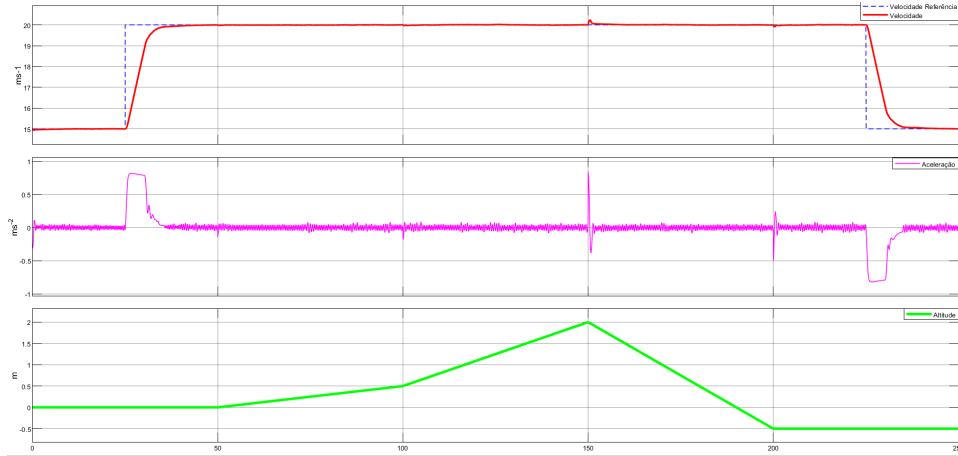


Figura 4.4: Resultado da verificação do controlador de velocidade desenvolvido no *software SIMULINK*.

Como pode ser observado na figura 4.4, o controlador é capaz de lidar bastante bem com as mudanças topográficas da estrada mantendo a velocidade do veículo sempre próxima da referência. Podemos observar que o controlador é também capaz de se adaptar a mudanças de velocidade rápidas mantendo também a velocidade próxima da referência.

### 4.1.3 Controlador de distância

O controlador de distância baseia-se num controlador ACC pois utiliza como entrada a distância entre veículos mas, ao invés de controlar a aceleração e travagem do veículo, tem como saída o plano de velocidade na qual o veículo se deve manter de forma a assegurar a distância referência. O plano de velocidade é por sua vez fornecido a um controlador de velocidade que tem como função manter dinamicamente a velocidade do veículo (figura 4.5).

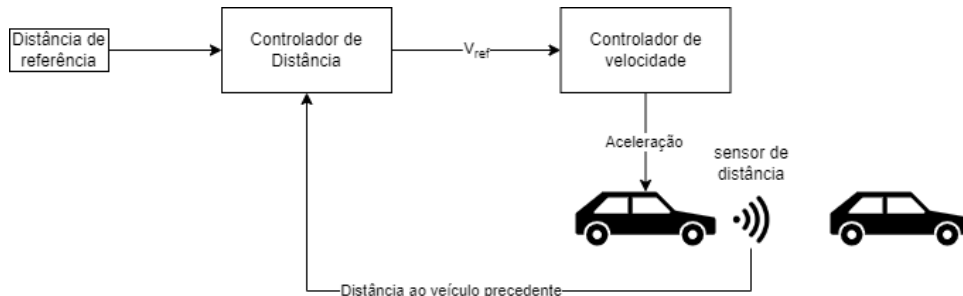


Figura 4.5: Arquitetura do controlador de um veículo seguidor.

O controlador de distância baseia-se no erro da distância entre veículos ( $d_{ref} - d$ ), na sua primeira derivada ( $\frac{de(t)}{dt}$ ) e na sua segunda derivada ( $\frac{d^2e(t)}{dt^2}$ ) e tem como saída a variação da velocidade

referência ( $\frac{dv_{ref}(t)}{dt}$ ) como pode ser observado na figura 4.6. As variáveis G1, G2 e G3 representam os ganhos de pré-processamento dos sinais de entrada e G4 o ganho de pós-processamento da variável de saída. Pode-se também observar na figura que existe um ganho de -1 na entrada do controlador, ou seja, se  $e(t)$  for negativo significa que a distância real se encontra maior que a distância referência.

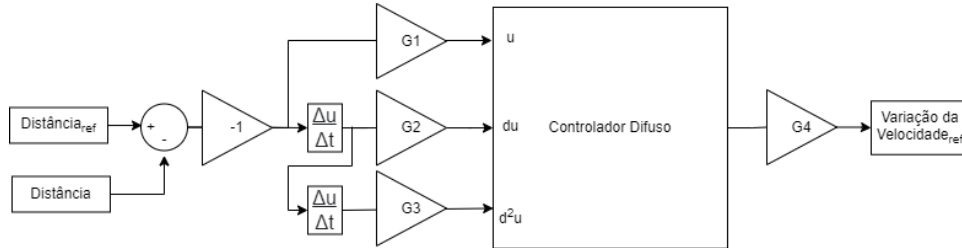


Figura 4.6: Arquitetura do controlador de distância baseado em lógica difusa.

Para as variáveis  $e(t)$ ,  $\frac{de(t)}{dt}$  e  $\frac{du(t)}{dt}$  foram também consideradas sete funções de pertinência associadas às seguintes designações linguísticas: LN, MN, SN, ZE, SP, MP e LP. As funções de pertinência, associadas a cada designação linguística das variáveis  $e(t)$ ,  $\frac{de(t)}{dt}$  e  $\frac{du(t)}{dt}$ , encontram-se apresentadas na tabela 4.1, tabela 4.4 e tabela 4.5 e representadas na figura 4.3, figura 4.7 e figura 4.8, respetivamente.

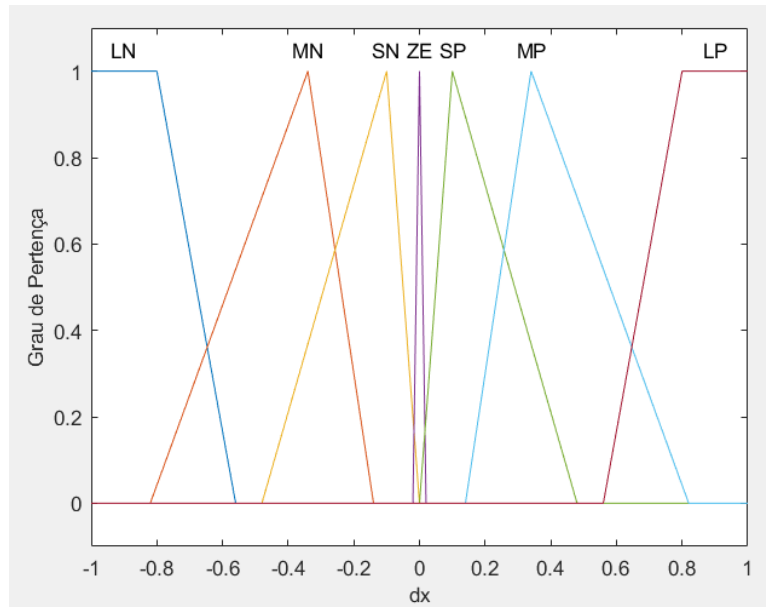


Figura 4.7: Representação gráfica das funções de pertinência das variáveis linguísticas utilizadas na variável  $\frac{de(t)}{dt}$ .

Para a variável de entrada  $\frac{d^2e(t)}{dt^2}$  são apenas consideradas três designações linguísticas: LN, ZE e LP. As funções de pertinência associadas a estas designações linguísticas encontram-se apresentadas na tabela 4.6 e representadas na figura 4.9.

Tabela 4.4: Funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas na variável  $\frac{de(t)}{dt}$ .

| Designação Linguística | Função de Pertença                                                                                                                                                         |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Large Negative</i>  | $\begin{cases} y = 1, -1 \leq x \leq -0,82 \\ y = -\frac{25}{6}x - \frac{7}{3}, -0,82 < x < -0,56 \\ y = 0, x \geq -0,56 \end{cases}$                                      |
| <i>Medium Negative</i> | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,82 \vee x \geq -0,14 \\ y = \frac{25}{12}x + \frac{41}{24}, -0,82 < x \leq -0,34 \\ y = -5x - \frac{7}{10}, -0,34 < x < -0,14 \end{cases}$ |
| <i>Small Negative</i>  | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,48 \vee x \geq 0 \\ y = \frac{50}{19}x + \frac{24}{19}, -0,48 < x \leq -0,1 \\ y = -10x, -0,1 < x < 0 \end{cases}$                         |
| <i>Zero</i>            | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,01 \vee x \geq 0,01 \\ y = 100x + 1, -0,01 < x \leq 0 \\ y = -100x + 1, 0 < x < 0,01 \end{cases}$                                          |
| <i>Small Positive</i>  | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0 \vee x \geq 0,48 \\ y = 10x, 0 < x \leq 0,1 \\ y = -\frac{50}{19}x + \frac{24}{19}, 0,1 < x < 0,48 \end{cases}$                             |
| <i>Medium Positive</i> | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0 \vee x \geq 0,48 \\ y = 5x - \frac{7}{10}, 0 < x \leq 0,2 \\ y = -\frac{25}{12}x + \frac{41}{24}, 0,2 < x < 0,48 \end{cases}$               |
| <i>Large Positive</i>  | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0,56 \\ y = \frac{25}{6}x - \frac{7}{3}, 0,56 < x < 0,82 \\ y = 1, 0,82 \leq x \leq 1 \end{cases}$                                            |

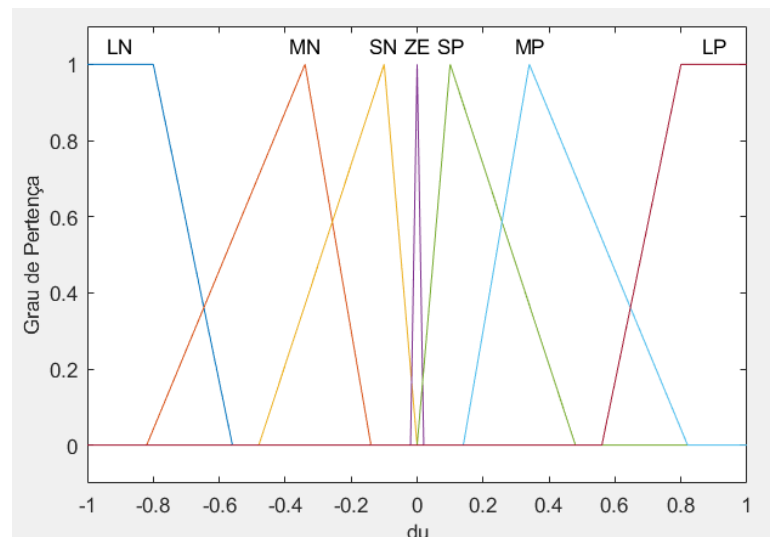
Figura 4.8: Representação gráfica das funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas na variável  $\frac{du(t)}{dt}$ .

Tabela 4.5: Funções de pertença das variáveis linguísticas utilizadas na variável  $\frac{du(t)}{dt}$ .

| Designação Linguística | Função de Pertença                                                                                                                                                       |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Large Negative         | $\begin{cases} y = 1, -1 \leq x \leq -0,82 \\ y = -\frac{25}{6}x - \frac{7}{3}, -0,82 < x < -0,56 \\ y = 0, x \geq -0,56 \end{cases}$                                    |
| Medium Negative        | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,82    x \geq -0,14 \\ y = \frac{25}{12}x + \frac{41}{24}, -0,82 < x \leq -0,34 \\ y = -5x - \frac{7}{10}, -0,34 < x < -0,14 \end{cases}$ |
| Small Negative         | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,48    x \geq 0 \\ y = \frac{50}{19}x + \frac{24}{19}, -0,48 < x \leq -0,1 \\ y = -10x, -0,1 < x < 0 \end{cases}$                         |
| Zero                   | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,02    x \geq 0,02 \\ y = 50x + 1, -0,02 < x \leq 0 \\ y = -50x + 1, 0 < x < 0,02 \end{cases}$                                            |
| Small Positive         | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0    x \geq 0,48 \\ y = 10x, 0 < x \leq 0,1 \\ y = -\frac{50}{19}x + \frac{24}{19}, 0,1 < x < 0,48 \end{cases}$                             |
| Medium Positive        | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0    x \geq 0,48 \\ y = 5x - \frac{7}{10}, 0 < x \leq 0,2 \\ y = -\frac{25}{12}x + \frac{41}{24}, 0,2 < x < 0,48 \end{cases}$               |
| Large Positive         | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0,56 \\ y = \frac{25}{6}x - \frac{7}{3}, 0,56 < x < 0,82 \\ y = 1, 0,82 \leq x \leq 1 \end{cases}$                                          |

Tabela 4.6: Funções de pertença das variáveis linguísticas utilizada na variável  $\frac{d^2e(t)}{dt^2}$ .

| Designação Linguística | Função de Pertença                                                                                                                                |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Large Negative         | $\begin{cases} y = 1, -1 \leq x \leq -0,75 \\ y = -\frac{4}{3}x, -0,75 < x < 0 \\ y = 0, x \geq 0 \end{cases}$                                    |
| Zero                   | $\begin{cases} y = 0, x \leq -0,15    x \geq 0,15 \\ y = \frac{20}{3}x + 1, -0,15 < x \leq 0 \\ y = -\frac{20}{3}x + 1, 0 < x < 0,15 \end{cases}$ |
| Large Positive         | $\begin{cases} y = 0, x \leq 0 \\ y = \frac{4}{3}x, 0 < x < 0,75 \\ y = 1, 0,75 \leq x \leq 1 \end{cases}$                                        |

No controlador de distância em específico, existem três variáveis de entrada, o erro ( $e(t)$ ), a primeira derivada do erro ( $\frac{de(t)}{dt}$ ) e a segunda derivada do erro ( $\frac{d^2e(t)}{dt^2}$ ) e uma variável de saída, a variação da velocidade referência ( $\frac{du(t)}{dt}$ ). Esta repartição resultou assim num conjunto de 147

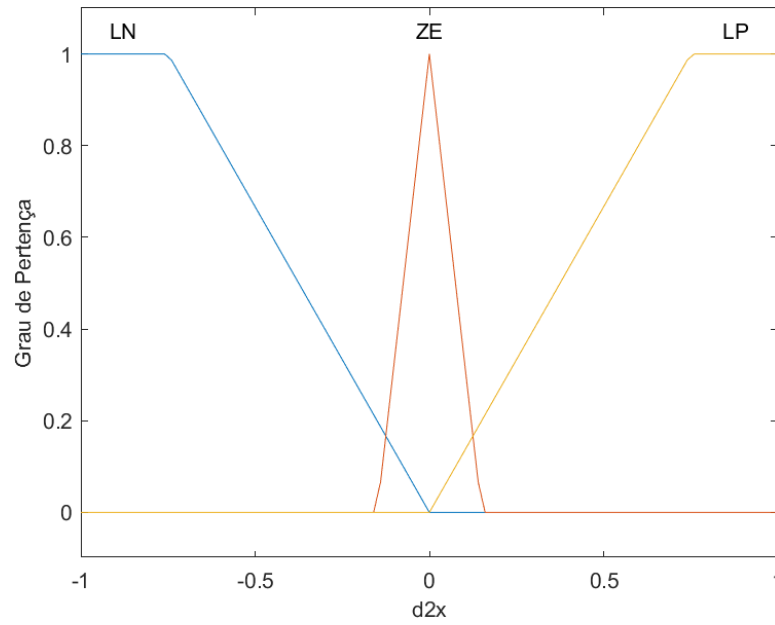


Figura 4.9: Representação gráfica das funções de pertinência das variáveis linguísticas utilizadas na variável  $\frac{d^2e(t)}{dt^2}$ .

regras baseadas na regra geral apresentada equação (4.2) que pode ser observado na tabela 4.7.

$$IF \quad e(t) = \dots \quad AND \quad \frac{de(t)}{dt} = \dots \quad AND \quad \frac{d^2e(t)}{dt^2} \quad THEN \quad \frac{du(t)}{dt} = \dots \quad (4.2)$$

#### 4.1.3.1 Verificação do controlador de distância

Após implementar o modelo do controlador de distância no *SIMULINK*, existe a necessidade de comprovar se o seu funcionamento é o esperado. Com esse objetivo foi utilizado um perfil de testes semelhante ao utilizado na verificação do controlador de velocidade, onde existe o controlo de um pelotão de dois veículos. O veículo líder recebeu o mesmo plano de velocidade que na verificação do controlador de velocidade, já o veículo seguidor utilizou uma distância de referência fixa de 20 m. As características de ambos os veículos utilizados na verificação encontram-se descritas na tabela 4.8. A missão de condução desenvolvida decorreu sem qualquer tipo de limitações de velocidade.

Como pode ser observado na figura 4.10, o controlador é capaz de lidar bastante bem com as mudanças topográficas da estrada mantendo a distância ao veículo à sua frente constante. Podemos observar que o controlador é também capaz de se adaptar a mudanças de velocidade rápidas mantendo também a distância ao veículo da frente.

Tabela 4.7: Regras difusas para controlo de distância.

| $\frac{du(t)}{dt}$     |    |                    |    | $e(t)$ |    |    |    |    |    |    |
|------------------------|----|--------------------|----|--------|----|----|----|----|----|----|
|                        |    |                    |    | LN     | MN | SN | ZE | SP | MP | LP |
| $\frac{d^2u(t)}{dt^2}$ | LN |                    | LN | LN     | LN | LN | LN | LN | MN | MN |
|                        |    |                    | MN | LN     | LN | LN | MN | MN | MN | SN |
|                        |    |                    | SN | LN     | LN | MN | MN | MN | SN | ZE |
|                        |    |                    | ZE | LN     | MN | MN | SN | SN | ZE | SP |
|                        |    |                    | SP | LN     | MN | MN | SN | ZE | SP | SP |
|                        |    |                    | MP | MN     | MN | SN | ZE | SP | SP | MP |
|                        |    |                    | LP | MN     | SN | ZE | SP | SP | MP | LP |
|                        |    |                    | LN | LN     | LN | MN | MN | SN | SN | ZE |
|                        | ZE | $\frac{de(t)}{dt}$ | MN | LN     | MN | MN | SN | SN | ZE | SP |
|                        |    |                    | SN | MN     | MN | SN | SN | ZE | SP | SP |
|                        |    |                    | ZE | MN     | SN | SN | ZE | SP | SP | MP |
|                        |    |                    | SP | SN     | SN | ZE | SP | SP | MP | MP |
|                        |    |                    | MP | SN     | ZE | SP | SP | MP | MP | LP |
|                        |    |                    | LP | ZE     | SP | SP | MP | MP | LP | LP |
|                        |    |                    | LN | LN     | MN | SN | SN | ZE | SP | MP |
|                        |    |                    | MN | MN     | SN | SN | ZE | SP | MP | MP |
|                        | LP |                    | SN | SN     | SN | ZE | SP | MP | MP | LP |
|                        |    |                    | ZE | SN     | ZE | SP | SP | MP | MP | LP |
|                        |    |                    | SP | ZE     | SP | MP | MP | MP | LP | LP |
|                        |    |                    | MP | SP     | MP | MP | MP | LP | LP | LP |
|                        |    |                    | LP | MP     | MP | LP | LP | LP | LP | LP |

Tabela 4.8: Parâmetros dos veículos utilizados na verificação do controlador de distância.

| Veículo  | Massa [kg] | $\tau$ [s] | $K_d$ [ $\frac{kg}{m}$ ] | $d_m$ [N] |
|----------|------------|------------|--------------------------|-----------|
| Líder    | 1445       | 0,2        | 0,44                     | 352       |
| Seguidor | 1960       | 0,25       | 0,47                     | 390       |

## 4.2 Modelo de controlo difuso com comunicação

### 4.2.1 Arquitetura de controlo

A arquitetura de controlo estudada nesta dissertação consiste num *platooning* baseado em ACC e com recurso comunicação V2V, onde o veículo líder é controlado por um controlador que tem como objetivo seguir uma velocidade referência. Os restantes veículos do pelotão utilizam numa arquitetura de controlo composta por três camadas. A camada mais baixa compreende um controlador de velocidade, igual ao utilizado no líder, cujo objetivo é acelerar ou travar o veículo de forma a manter a velocidade igual à velocidade referência. A velocidade referência pode ser obtida por duas camadas diferentes, pelo controlador da camada imediatamente acima, um controlador de distância que, se a comunicação com o líder for impossível ou o veículo se encontrar demasiado próximo do veículo à sua frente, funciona como um ACC normal mantendo a distância entre veículos igual a  $d_{ref}$ , ou pela camada superior, também um controlador de distância que, no caso

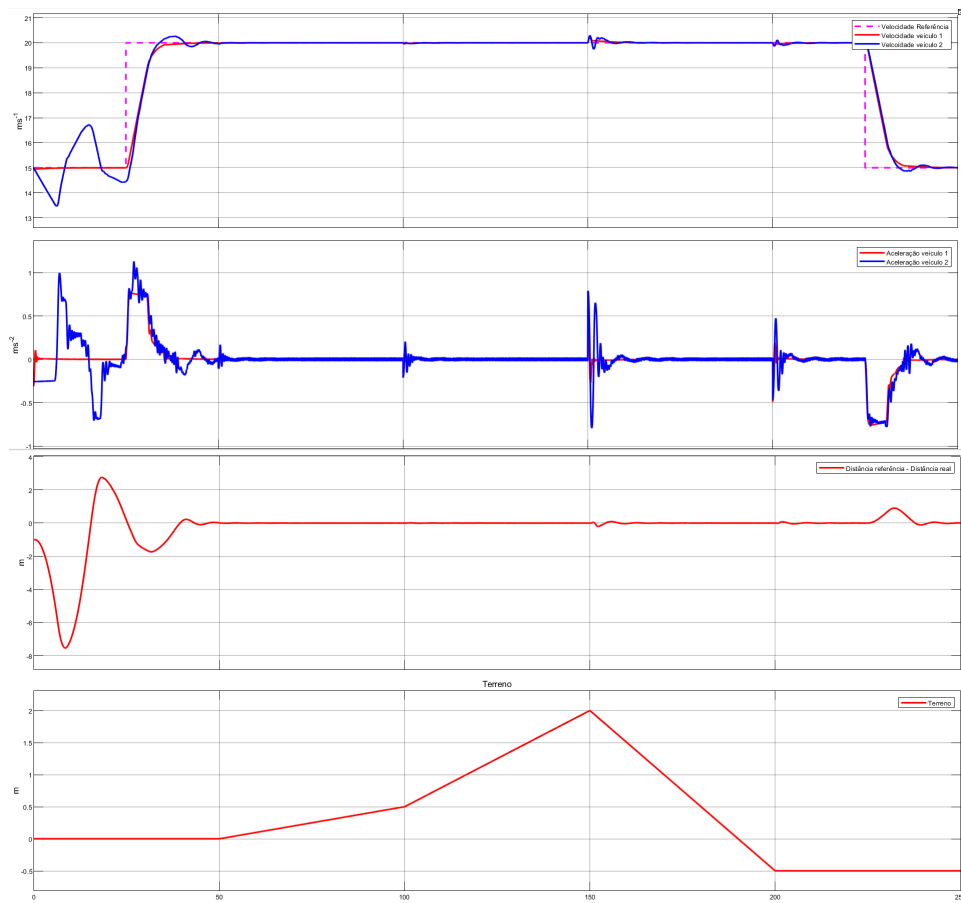


Figura 4.10: Resultado da verificação do controlador de distância desenvolvido no software *SIMULINK*.

de a comunicação com o líder ser possível, calcula o plano de velocidade a que o veículo deve seguir de forma a manter a distância  $d$  ( $d = d_{ref} \times i$ ) ao veículo líder (figura 4.11).

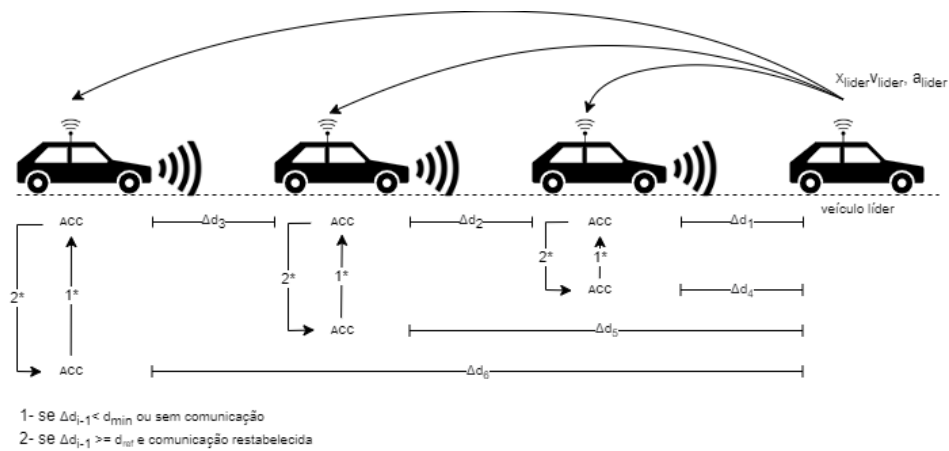


Figura 4.11: Arquitetura de controlo baseada em lógica difusa com comunicação.



## Capítulo 5

# Resultados das simulações

Neste capítulo são descritos os diversos cenários em que o controlador desenvolvido foi testado e também apresentados os resultados das simulações nesses mesmos cenários. Todas as diferentes simulações utilizaram um pelotão de seis veículos que têm os seus parâmetros representados na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros dos veículos do pelotão utilizado na verificação do modelo de controlo.

| Veículo | Massa [kg] | $\tau$ [s] | $K_d$ [ $\frac{kg}{m}$ ] | $d_m$ [N] |
|---------|------------|------------|--------------------------|-----------|
| 1       | 1445       | 0,2        | 0,44                     | 352       |
| 2       | 1960       | 0,25       | 0,47                     | 390       |
| 3       | 1170       | 0,3        | 0,5                      | 360       |
| 4       | 2000       | 0,2        | 0,52                     | 400       |
| 5       | 5000       | 0,3        | 0,55                     | 423       |
| 6       | 6000       | 0,25       | 0,5                      | 380       |

De forma a customizar os controladores a cada um dos veículos foram utilizados ganhos de pré e pós processamento. O *tunning* deste valores foi obtido através de um processo iterativo. Estes ganhos podem ser observados na tabela 5.2.

A topografia neste cenário consiste numa estrada com 0% de inclinação. No primeiro teste em terreno plano, a velocidade referência toma inicialmente o valor de 15 m/s e aos 100 segundos passa para 25 m/s, simulando uma rápida aceleração do veículo. Aos 175 segundos passa novamente para 15 m/s, de forma a simular uma travagem repentina. A distância referência é mantida a 20 metros durante todo o teste. Os resultados desta simulação podem ser observados na figura 5.1 e na figura 5.3.

O segundo teste consistiu na simulação de uma paragem de emergência na qual o pelotão se encontra a 33 m/s e começa a desacelerar para 0 m/s aos 100 segundos. Os resultados deste teste podem ser observados na figura 5.2 e na figura 5.4.

Tabela 5.2: Ganhos de pré e pós processamento utilizados nos controladores.

| Veículos | Ganho controlador de Velocidade |         |        | Ganhos controlador de Distância |         |           |        |
|----------|---------------------------------|---------|--------|---------------------------------|---------|-----------|--------|
|          | $e(t)$                          | $de(t)$ | $u(t)$ | $e(t)$                          | $de(t)$ | $d^2e(t)$ | $u(t)$ |
| 1        | 0.75                            | 1.5     | 10000  |                                 |         | -         |        |
| 2        | 0.75                            | 1.5     | 10000  | 0.2                             | 0.05    | 0.5       | 3.9    |
| 3        | 0.75                            | 1.5     | 10000  | 0.2                             | 0.05    | 0.5       | 3.52   |
| 4        | 0.75                            | 1.5     | 10000  | 0.2                             | 0.05    | 0.5       | 3.52   |
| 5        | 0.75                            | 1.5     | 20000  | 0.2                             | 0.05    | 0.5       | 3.52   |
| 6        | 0.75                            | 1.5     | 15000  | 0.2                             | 0.05    | 0.5       | 3.9    |

## 5.1 Estrada plana

### 5.1.1 Resultados do pelotão sem comunicação

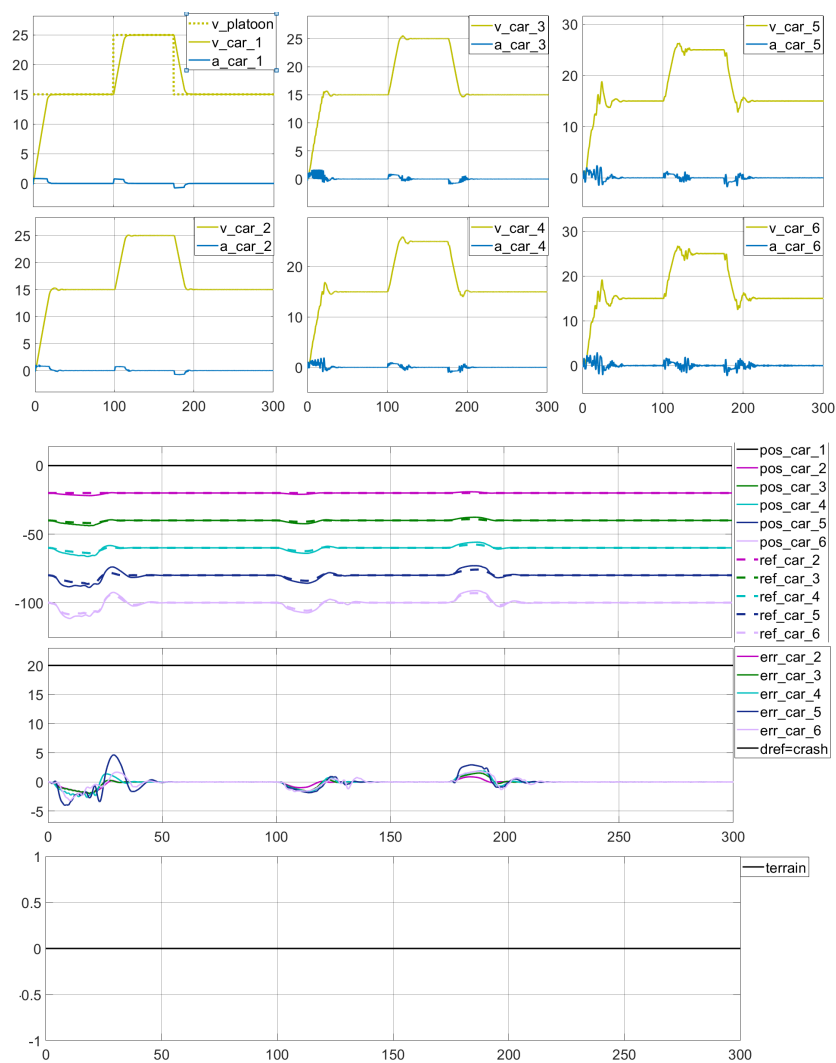


Figura 5.1: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação num terreno plano.

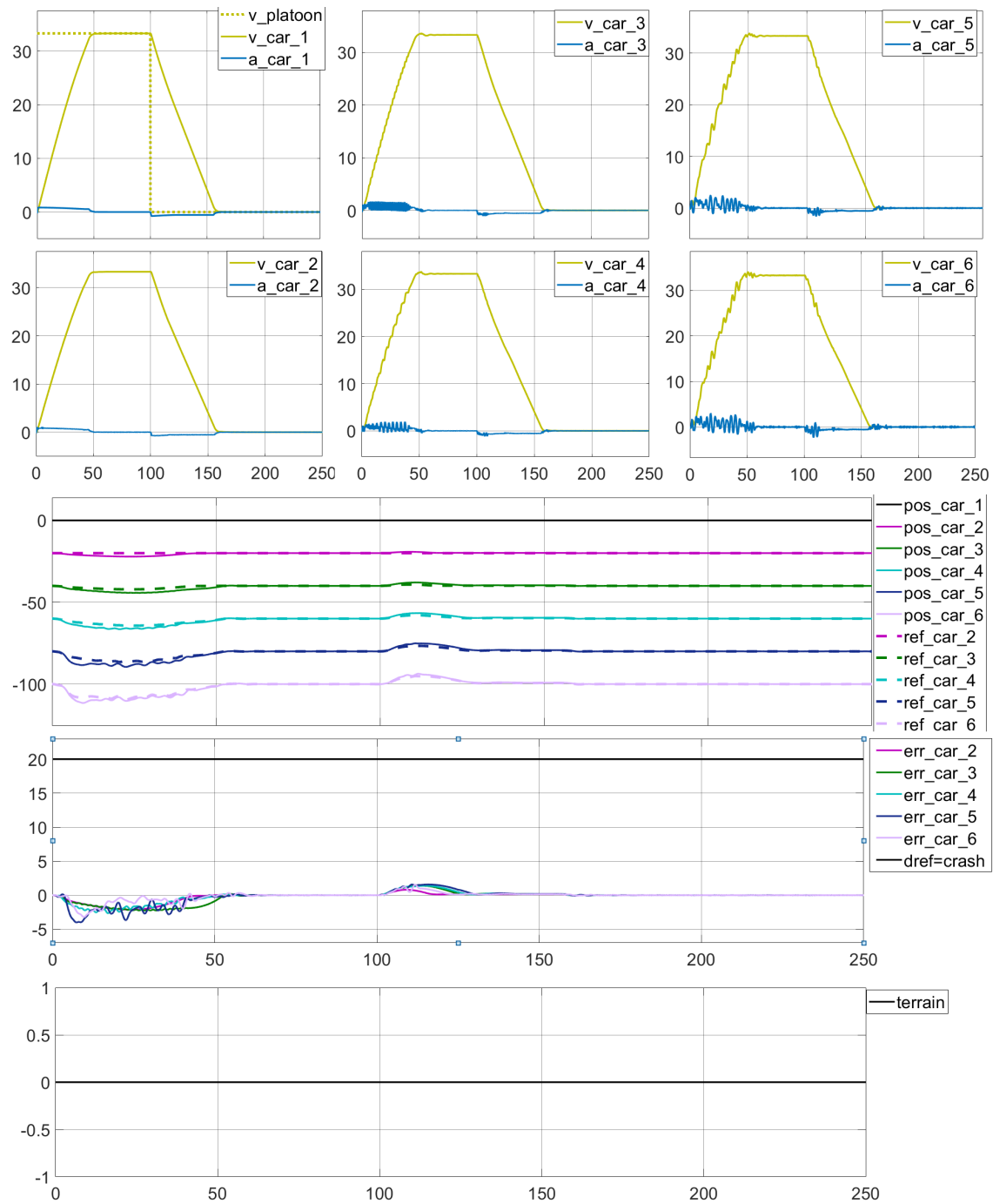


Figura 5.2: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência num terreno plano.

Tabela 5.3: Resposta de um pelotão sem comunicação a mudanças de velocidade num plano.

|                       |                              | Veículo |       |       |       |      |      |
|-----------------------|------------------------------|---------|-------|-------|-------|------|------|
|                       |                              | 1       | 2     | 3     | 4     | 5    | 6    |
| Aumento de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 12.3    | 16.3  | 16.35 | 15.14 | 14   | 14.2 |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.13  | 0.78  | 1.3   | 1.81 | 2.3  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.3    | 14.11 | 18.05 | 21    | 28.3 | 34.9 |
| Redução de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 11.18   | 16.19 | 15.66 | 15.2  | 15.2 | 14.9 |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.03  | 0.3   | 0.6   | 0.7  | 1.1  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.24   | 14    | 13.95 | 19.8  | 22   | 28   |

De seguida, nas tabelas 5.3 e 5.4 podem ser observadas as respostas à mudança de velocidade e à travagem de emergência, respetivamente.

Tabela 5.4: Resposta de um pelotão sem comunicação a uma paragem de emergência num plano.

|                       |                     | Veículos |    |    |    |    |    |
|-----------------------|---------------------|----------|----|----|----|----|----|
|                       |                     | 1        | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
| Paragem de emergência | Tempo de subida (s) | 47       | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 |

### 5.1.2 Resultados do pelotão com comunicação

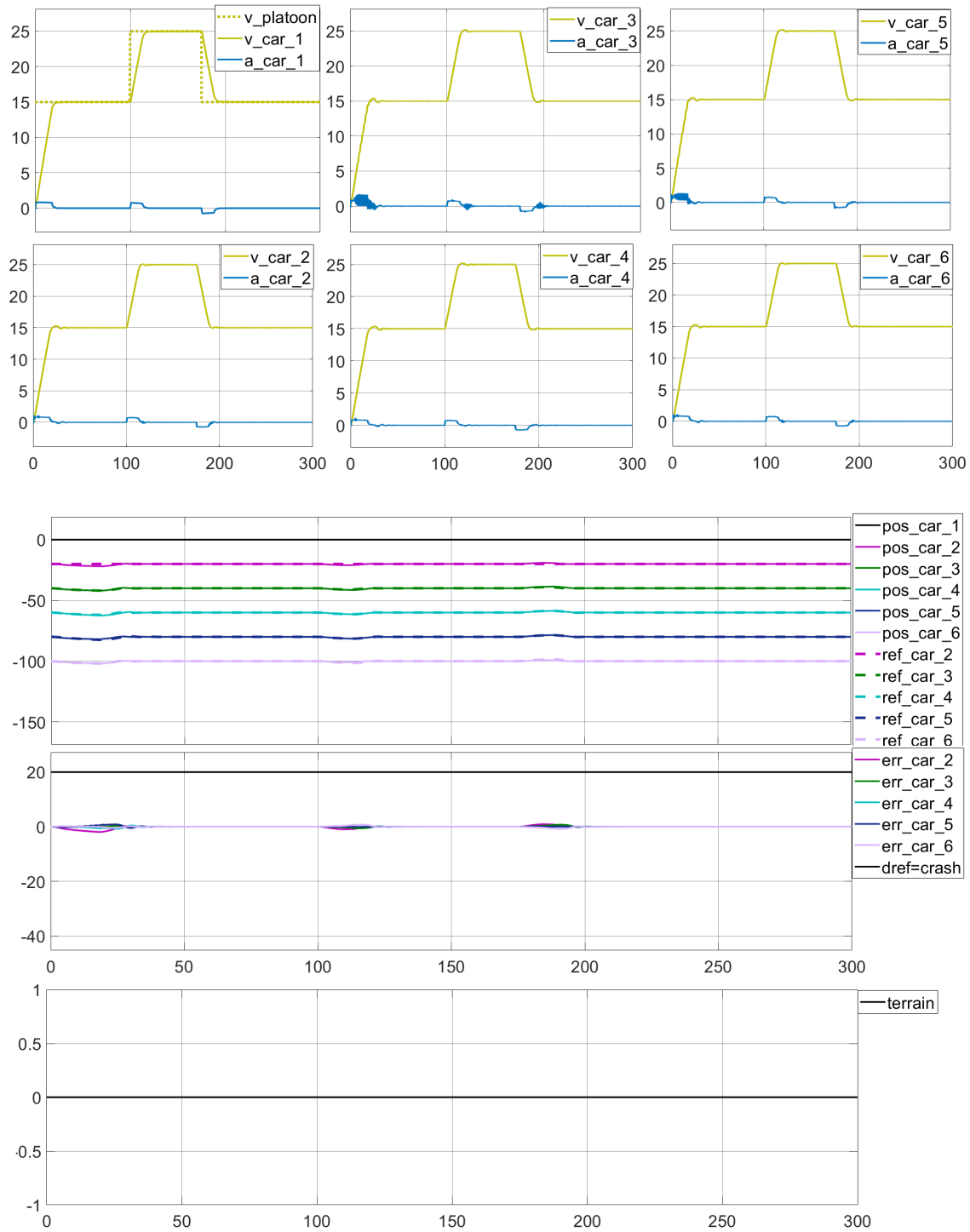


Figura 5.3: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação num terreno plano.

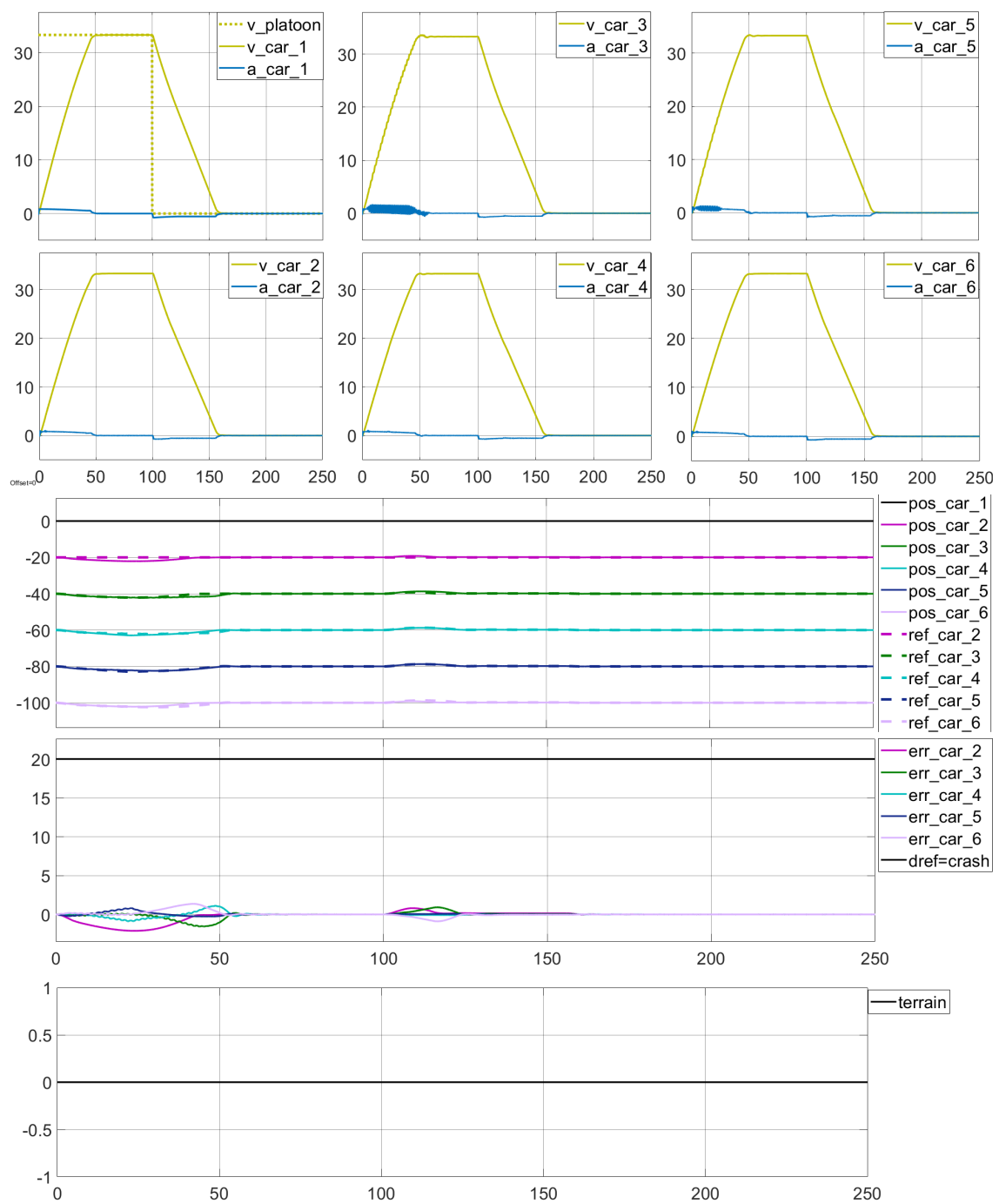


Figura 5.4: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência num terreno plano.

Tabela 5.5: Resposta de um pelotão com comunicação a mudanças de velocidade num plano

|                       |                              | Veículo |       |      |      |      |      |
|-----------------------|------------------------------|---------|-------|------|------|------|------|
|                       |                              | 1       | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Aumento de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 12.3    | 16.3  | 16.3 | 16.4 | 16.9 | 16.9 |
|                       | comunicação (m/s)            | -       | 0.13  | 0.2  | 0.2  | 0.2  | 0.12 |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.3    | 14.11 | 19.5 | 19.5 | 19.5 | 15   |
| Redução de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 11.18   | 16.19 | 16.3 | 16   | 16.3 | 16.3 |
|                       | comunicação (m/s)            | -       | 0.03  | 0.2  | 0.15 | 0.2  | 0.05 |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.24   | 14    | 19.2 | 15.2 | 19.5 | 13.4 |

De seguida, nas tabelas 5.5 e 5.6 podem ser observadas as respostas à mudança de velocidade e à travagem de emergência, respetivamente.

Tabela 5.6: Resposta de um pelotão com comunicação a uma paragem de emergência num plano.

|                       |                     | Veículos |    |      |      |      |      |
|-----------------------|---------------------|----------|----|------|------|------|------|
|                       |                     | 1        | 2  | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Paragem de emergência | Tempo de subida (s) | 47       | 47 | 46.9 | 46.9 | 46.9 | 46.9 |

## 5.2 Subida de uma encosta

A topografia neste cenário consiste numa estrada inicialmente plana que, aos 75 segundos passa para uma estrada com uma inclinação de 7% e aos 225 segundos regressa a uma inclinação de 0%. No primeiro teste na subida de uma encosta, o perfil de velocidade referência e distância referência utilizado é igual ao utilizado para o teste em estrada plana. Os resultados desta simulação podem ser observados na figura 5.5 e na figura 5.7.

O segundo teste consistiu na simulação de uma paragem de emergência na qual o pelotão se encontra a 33 m/s e começa a desacelerar para 0 m/s aos 75 segundos. Os resultados deste teste podem ser observados na figura 5.6 e na figura 5.8.

## 5.2.1 Resultados do pelotão sem comunicação

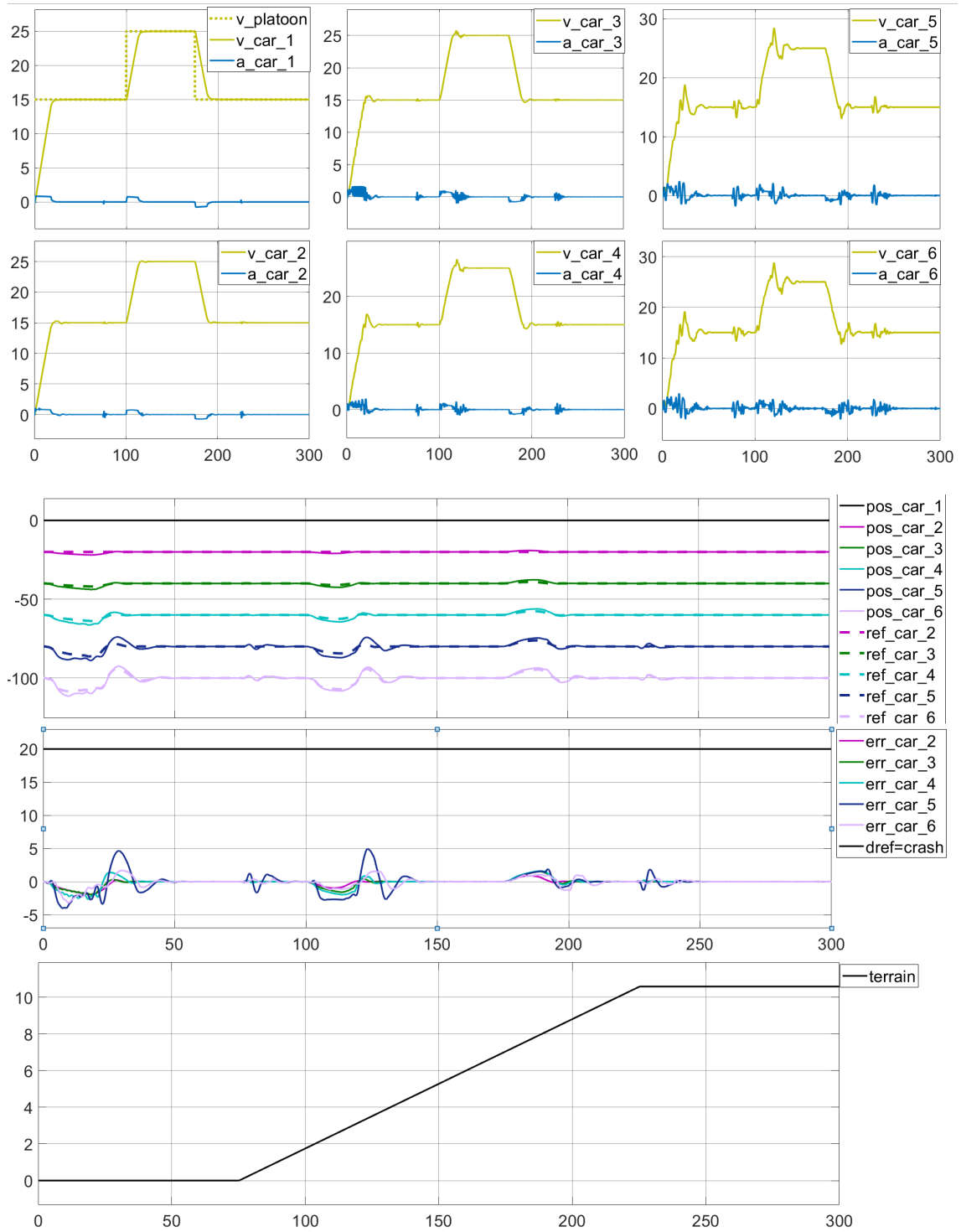


Figura 5.5: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação da subida de uma encosta.

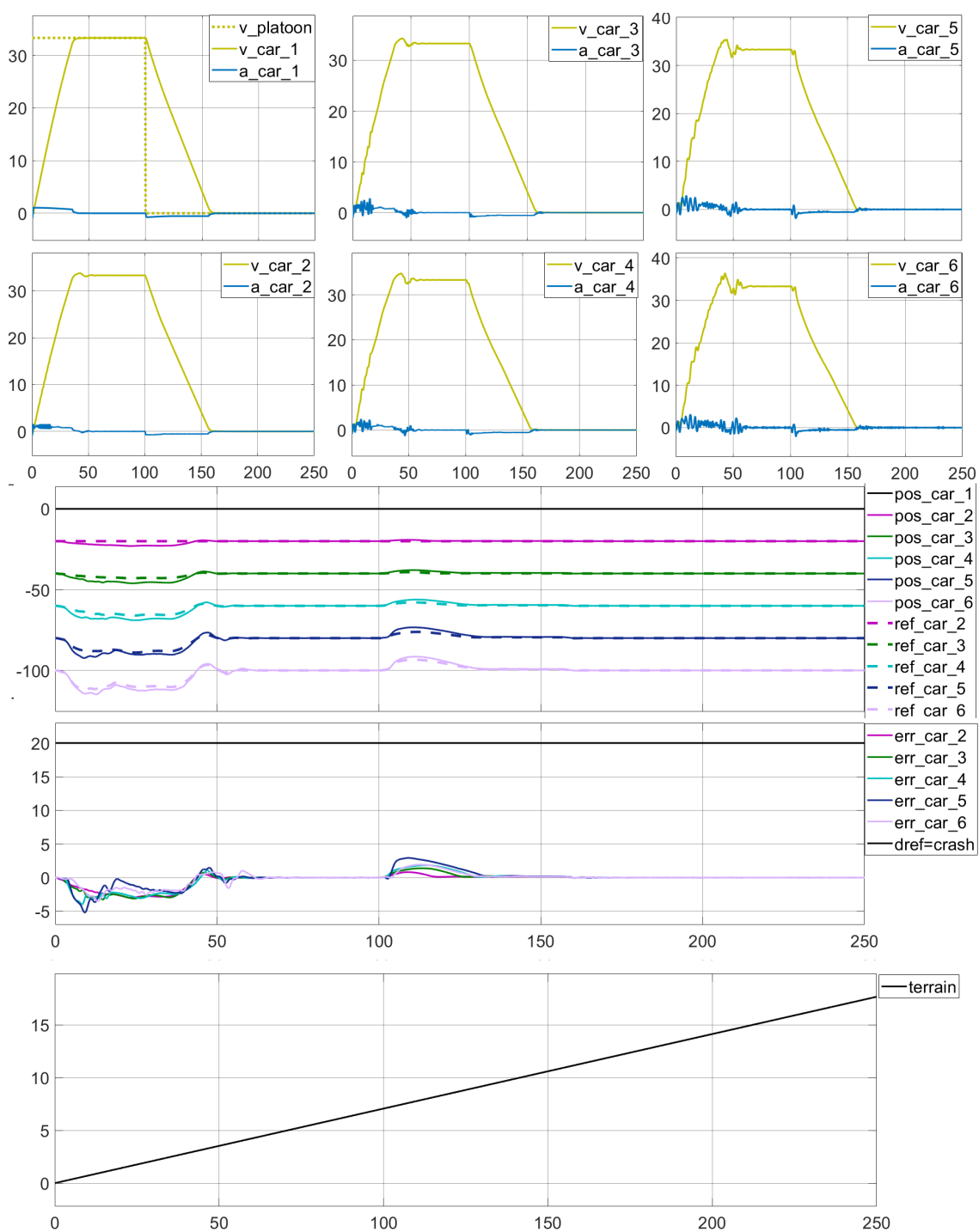


Figura 5.6: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência durante a subida de uma encosta.

De seguida, nas tabelas 5.7 e 5.8 podem ser observadas as respostas à mudança de velocidade e à travagem de emergência, respetivamente.

Tabela 5.7: Resposta de um pelotão sem comunicação a mudanças de velocidade numa subida.

|                       |                              | Veículo |      |      |      |      |      |
|-----------------------|------------------------------|---------|------|------|------|------|------|
|                       |                              | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Plano para subida     | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.14 | 0.23 | 0.48 | 1.6  | 1.7  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | -       | -    | 1.6  | 3    | 9    | 15.4 |
| Aumento de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 12.3    | 15.1 | 14.9 | 14.9 | 14.7 | 14.7 |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.12 | 0.78 | 1.54 | 3.4  | 3.8  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.51   | 14   | 20.3 | 26   | 35.6 | 36.7 |
| Redução de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 11.4    | 15.8 | 15.4 | 15.8 | 15   | 14.9 |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.04 | 0.4  | 0.8  | 1.9  | 2.3  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.6    | 13.9 | 13.9 | 20.1 | 25.9 | 31.8 |
| Subida para plano     | <i>comunicação</i> (m/s)     | 0.12    | 0.2  | 0.2  | 0.6  | 1.8  | 1.8  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | -       | 1.5  | 4    | 7.2  | 17   | 18   |

Tabela 5.8: Resposta de um pelotão sem comunicação a uma paragem de emergência numa subida.

|                       |                     | Veículos |      |      |      |    |      |
|-----------------------|---------------------|----------|------|------|------|----|------|
|                       |                     | 1        | 2    | 3    | 4    | 5  | 6    |
| Paragem de emergência | Tempo de subida (s) | 46.5     | 46.5 | 46.5 | 46.5 | 46 | 45.7 |

### 5.2.2 Resultados do pelotão com comunicação

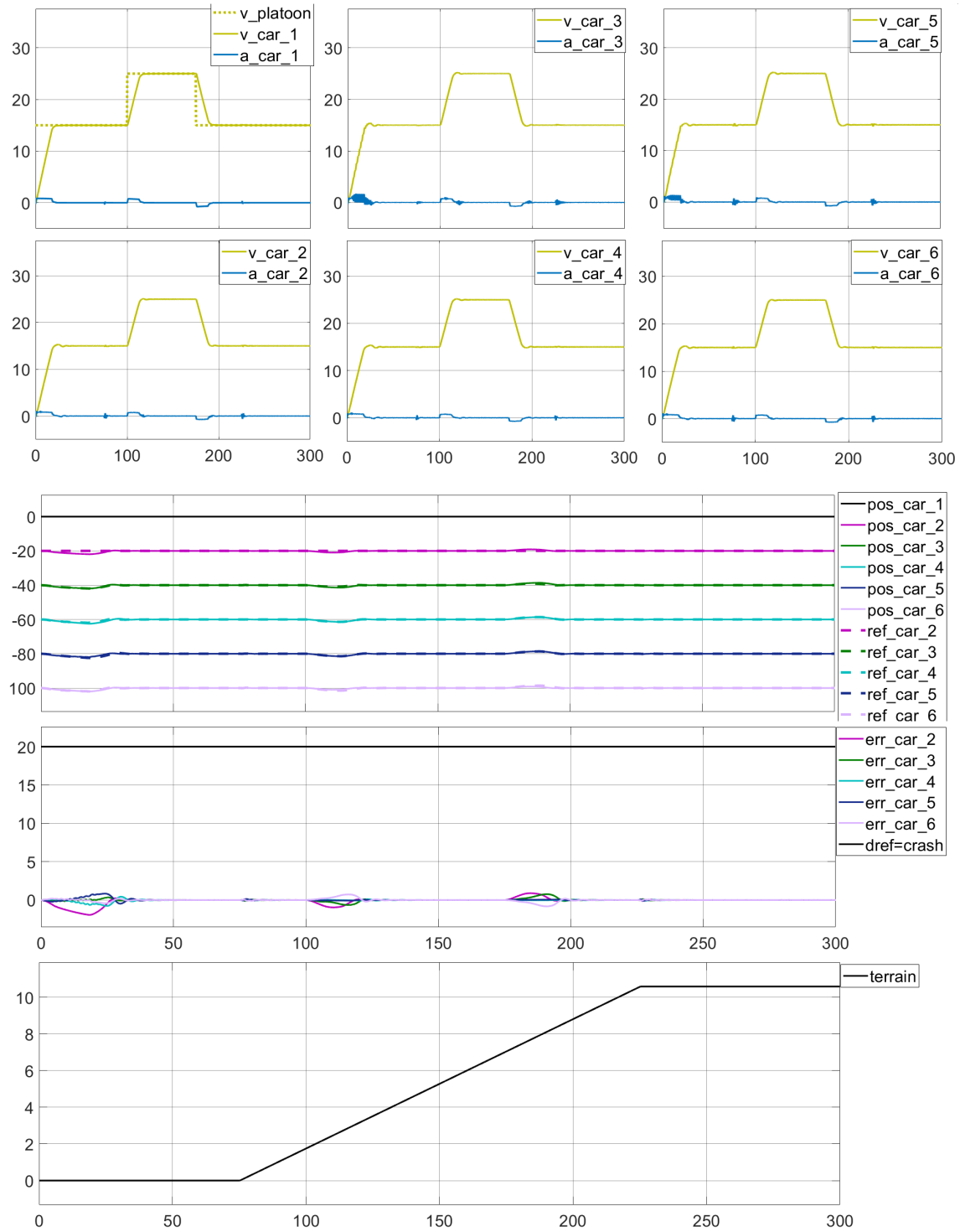


Figura 5.7: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação da subida de uma encosta.

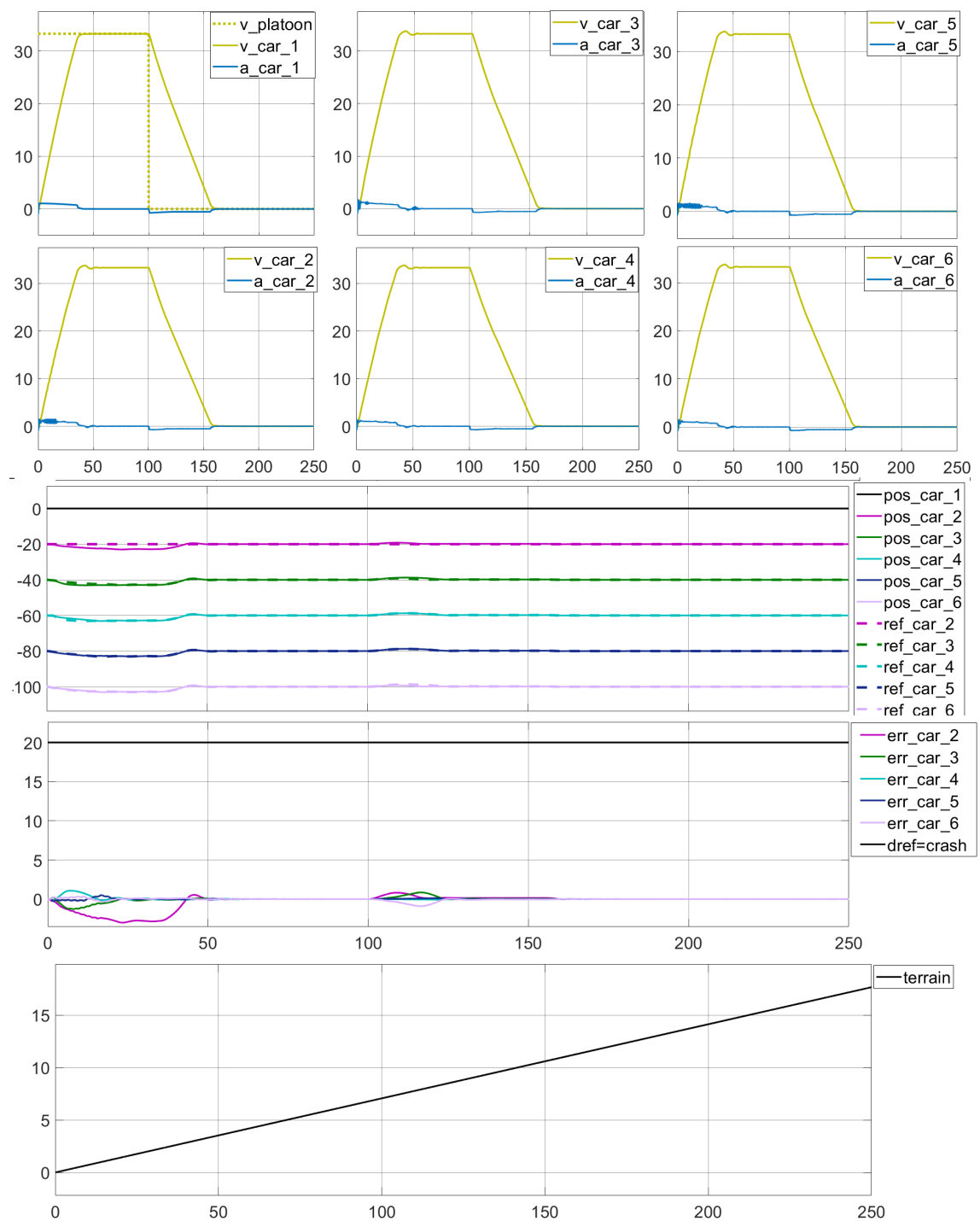


Figura 5.8: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência durante a subida de uma encosta.

De seguida, nas tabelas 5.9 e 5.10 podem ser observadas as respostas à mudança de velocidade e à travagem de emergência, respetivamente.

Tabela 5.9: Resposta de um pelotão sem comunicação a mudanças de velocidade numa subida.

|                       |                              | Veículo |      |      |      |      |      |
|-----------------------|------------------------------|---------|------|------|------|------|------|
|                       |                              | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Plano para subida     | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.14 | 0.1  | 0.18 | 0.32 | 0.23 |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | -       | -    | -    | -    | 5    | 2    |
| Aumento de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 12.3    | 15.1 | 16.2 | 16.3 | 16.1 | 16.2 |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.12 | 0.2  | 0.17 | 0.2  | 0.12 |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.51   | 14   | 20.5 | 15   | 19.5 | 14.9 |
| Redução de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 11.4    | 15.8 | 16.2 | 16.3 | 16.4 | 16.7 |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.04 | 0.1  | 0.16 | 0.15 | 0.1  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.6    | 13.9 | 14.4 | 14.5 | 15   | 14.9 |
| Subida para plano     | <i>comunicação</i> (m/s)     | 0.12    | 0.2  | 0.19 | 0.18 | 0.3  | 0.23 |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | -       | 1.5  | -    | -    | 3.5  | 2    |

Tabela 5.10: Resposta de um pelotão com comunicação a uma paragem de emergência numa subida.

|                       |                     | Veículos |      |    |    |    |    |
|-----------------------|---------------------|----------|------|----|----|----|----|
|                       |                     | 1        | 2    | 3  | 4  | 5  | 6  |
| Paragem de emergência | Tempo de subida (s) | 46.7     | 46.7 | 48 | 48 | 48 | 47 |

### 5.3 Descida de uma encosta

A topografia neste cenário consiste numa estrada inicialmente plana que, aos 75 segundos passa para uma estrada com uma inclinação de -7% e aos 225 segundos regressa a uma inclinação de 0%. No primeiro teste na subida de uma encosta, o perfil de velocidade referência e distância referência utilizado é igual ao utilizado para o teste em estrada plana. Os resultados desta simulação podem ser observados na figura 5.9 e na figura 5.11.

O segundo teste consistiu na simulação de uma paragem de emergência na qual o pelotão se encontra a 33 m/s e começa a desacelerar para 0 m/s aos 100 segundos. Os resultados deste teste podem ser observados na figura 5.10 e na figura 5.12.

### 5.3.1 Resultados do pelotão sem comunicação

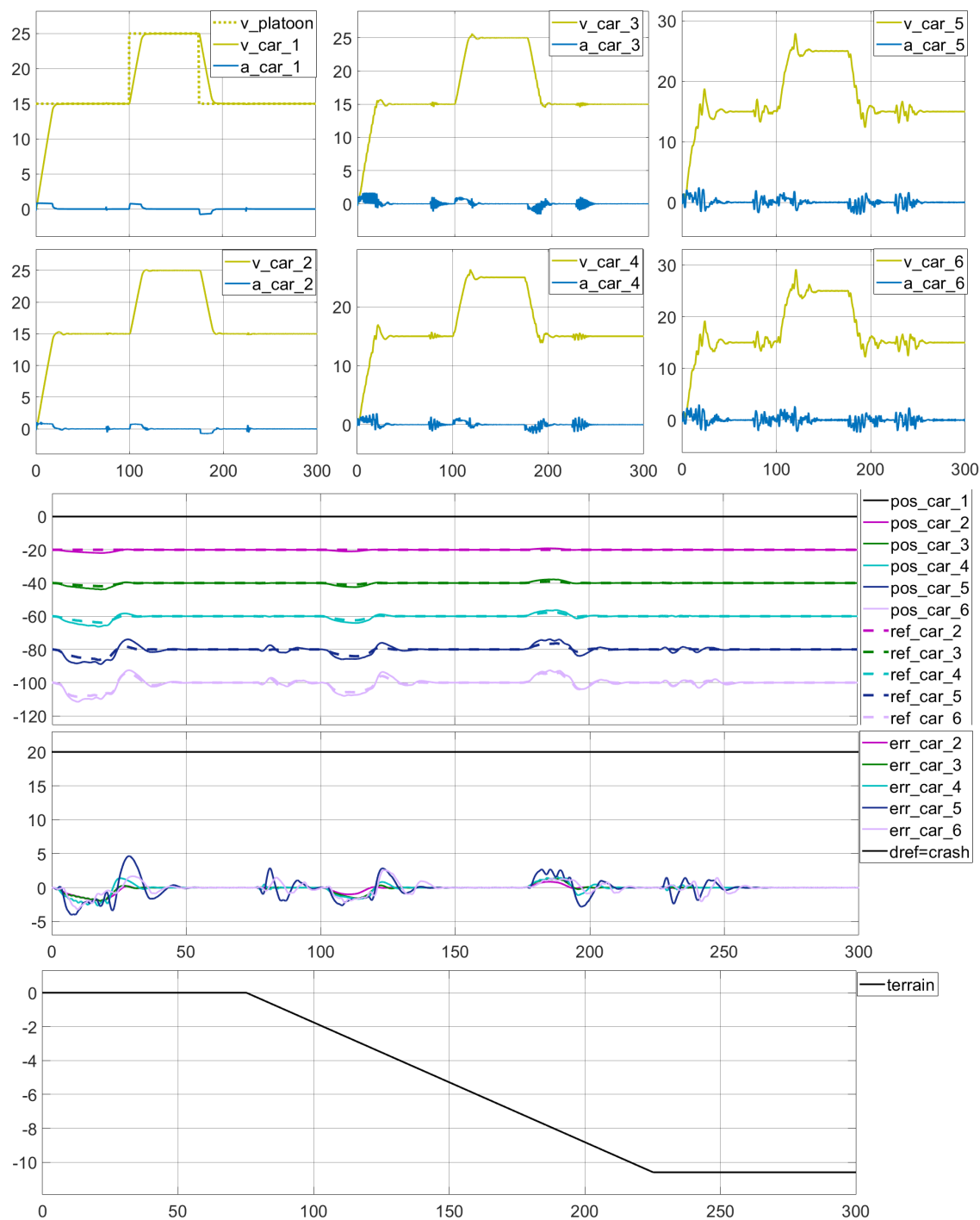


Figura 5.9: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação da descida de uma encosta.

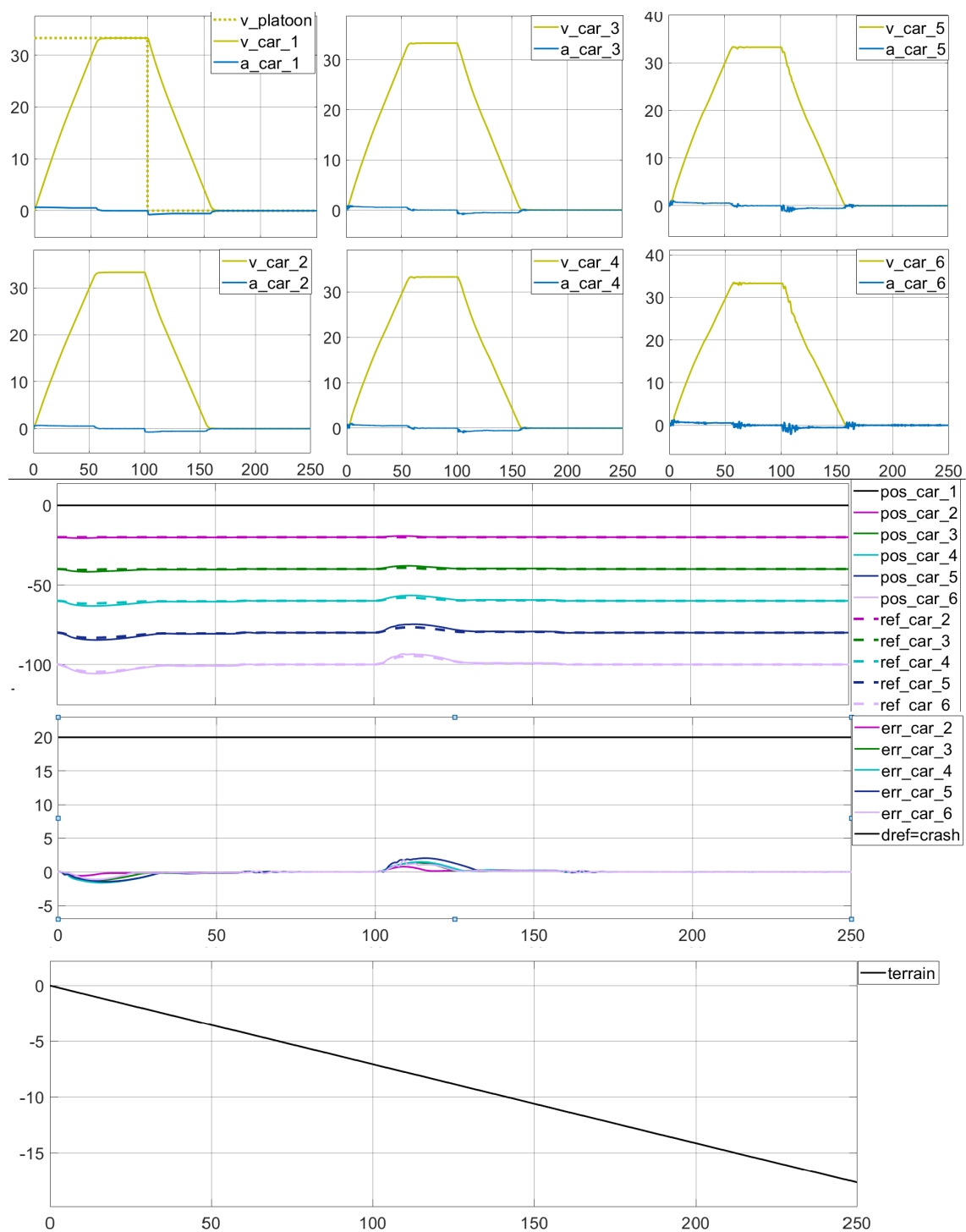


Figura 5.10: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência durante a descida de uma encosta.

De seguida, nas tabelas 5.11 e 5.12, podem ser observadas as respostas à mudança de velocidade e à travagem de emergência, respetivamente.

Tabela 5.11: Resposta de um pelotão sem comunicação a mudanças de velocidade numa descida.

|                       |                              | Veículo |       |      |      |       |       |
|-----------------------|------------------------------|---------|-------|------|------|-------|-------|
|                       |                              | 1       | 2     | 3    | 4    | 5     | 6     |
| Plano para subida     | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.15  | 0.4  | 0.7  | 2     | 2.1   |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | -       | -     | 6    | 10   | 20.5  | 23    |
| Aumento de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 10.9    | 16.3  | 15   | 15.1 | 15.55 | 15.56 |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.1   | 0.65 | 1.25 | 2.8   | 4.1   |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 12.8    | 14.7  | 29.9 | 21.8 | 35    | 35.4  |
| Redução de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 12      | 14.95 | 15   | 15   | 14.2  | 14.3  |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.15  | 0.45 | 1.05 | 2.55  | 2.6   |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.2    | 14.4  | 21.5 | 25   | 34.8  | 38.5  |
| Subida para plano     | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.15  | 0.4  | 0.7  | 1.9   | 2.56  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | -       | -     | 8.7  | 12   | 24    | 25    |

Tabela 5.12: Resposta de um pelotão sem comunicação a uma paragem de emergência numa descida.

|                       |                     | Veículos |      |      |      |      |      |
|-----------------------|---------------------|----------|------|------|------|------|------|
|                       |                     | 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Paragem de emergência | Tempo de subida (s) | 47.1     | 47.1 | 47.3 | 47.3 | 46.3 | 46.3 |

### 5.3.2 Resultados do pelotão com comunicação

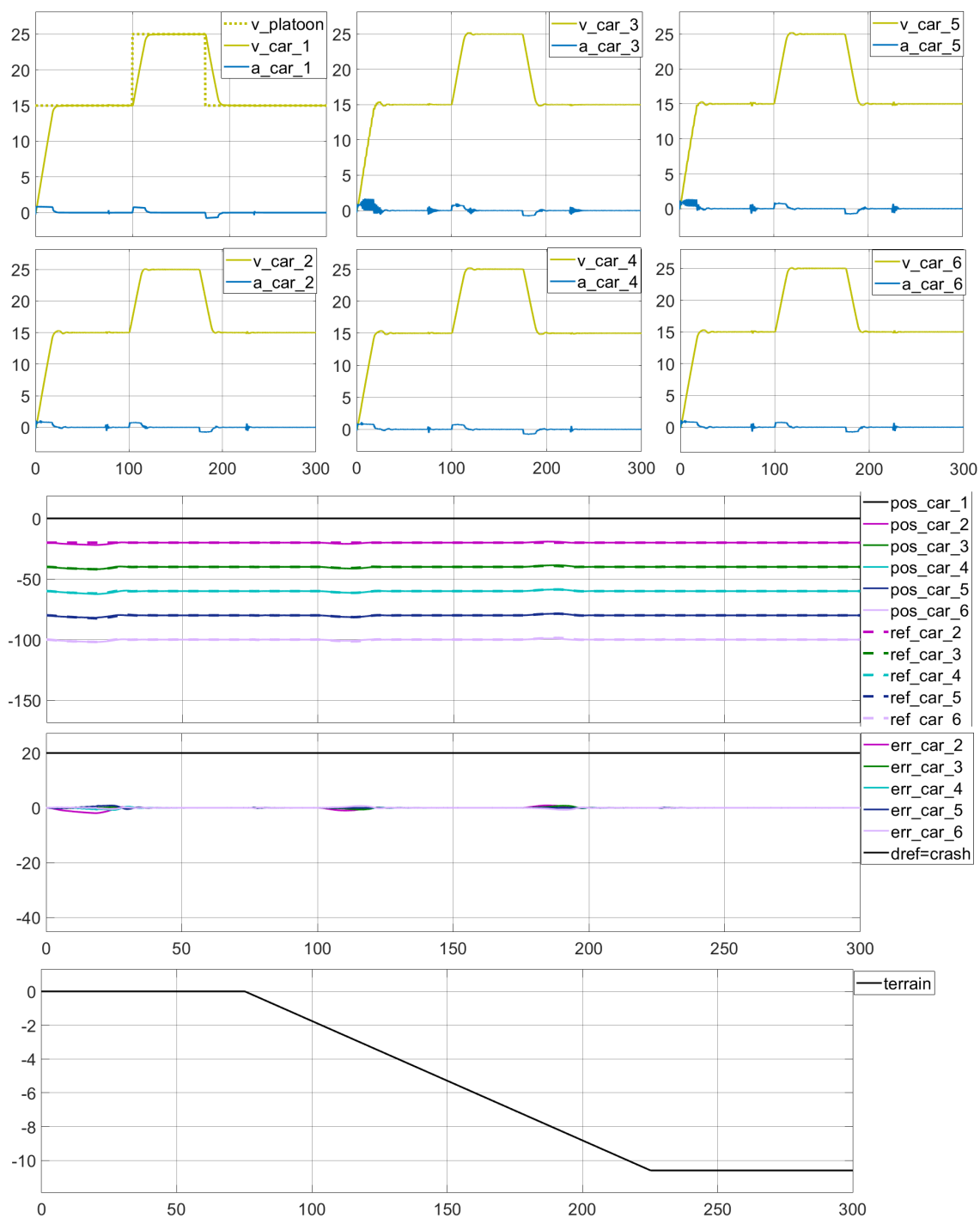


Figura 5.11: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação da descida de uma encosta.

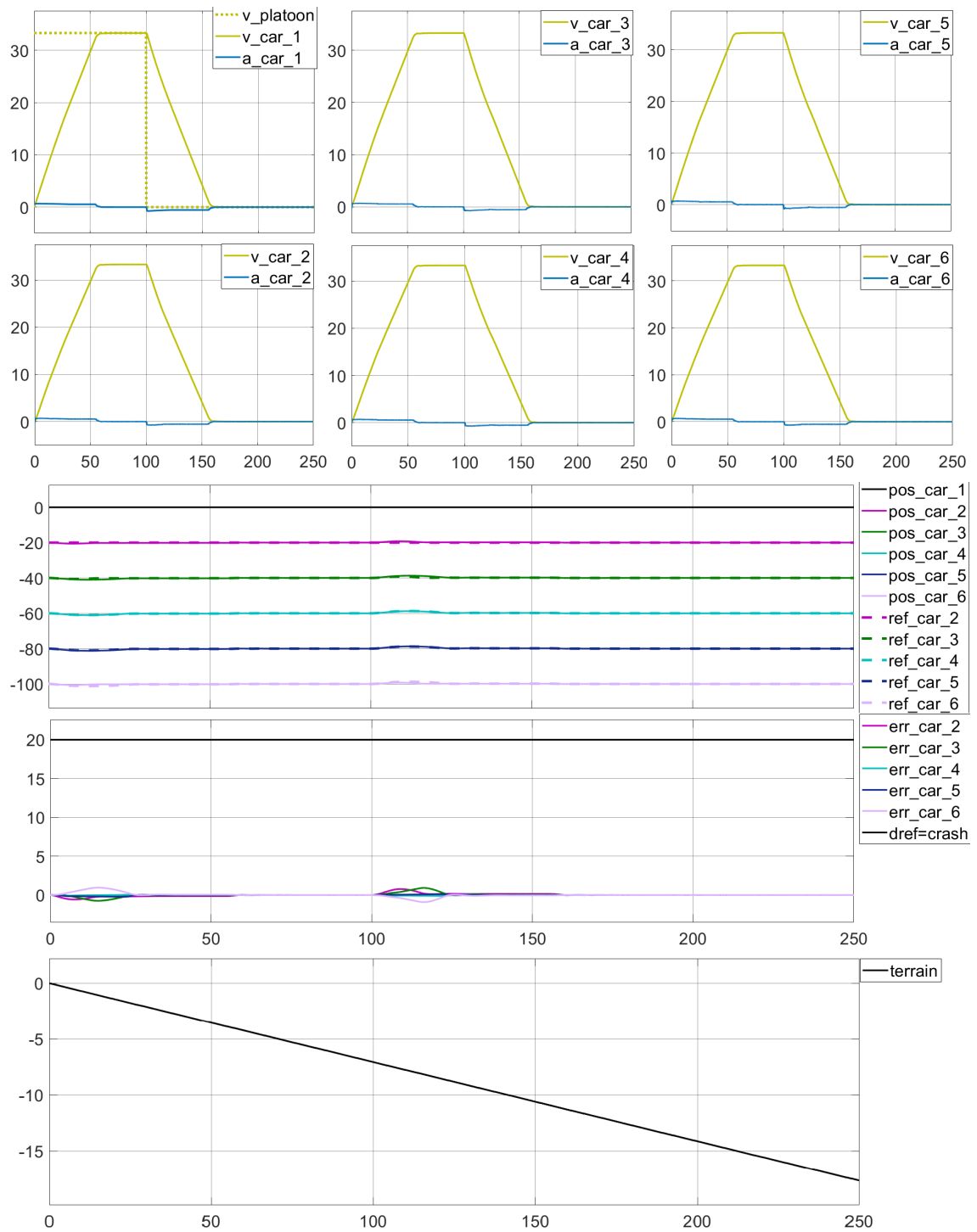


Figura 5.12: Velocidade ( $m/s$ ), aceleração ( $m/s^2$ ), posição em relação ao veículo precedente ( $m$ ), erro na distância ( $m$ ) e altitude ( $m$ ) medidas na simulação de uma paragem de emergência durante a descida de uma encosta.

De seguida, nas tabelas 5.13 e 5.14, podem ser observadas as respostas à mudança de velocidade e à travagem de emergência, respetivamente.

Tabela 5.13: Resposta de um pelotão com comunicação a mudanças de velocidade numa descida.

|                       |                              | Veículo |       |       |       |      |       |
|-----------------------|------------------------------|---------|-------|-------|-------|------|-------|
|                       |                              | 1       | 2     | 3     | 4     | 5    | 6     |
| Plano para subida     | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.15  | 0.14  | 0.18  | 0.25 | 0.22  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | -       | -     | -     | -     | 3.4  | 1.9   |
| Aumento de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 10.9    | 16.3  | 16    | 16.2  | 16   | 16.15 |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.1   | 0.2   | 0.17  | 0.18 | 0.1   |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 12.8    | 14.7  | 15    | 15.1  | 15   | 14.7  |
| Redução de velocidade | Tempo de Subida (s)          | 12      | 14.95 | 16.22 | 16.34 | 16.1 | 16.6  |
|                       | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.15  | 0.18  | 0.15  | 0.2  | 0.09  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | 14.2    | 14.4  | 15.2  | 15    | 19.2 | 15    |
| Subida para plano     | <i>comunicação</i> (m/s)     | -       | 0.15  | 0.09  | 0.17  | 0.31 | 0.28  |
|                       | Tempo de Estabelecimento (s) | -       | -     | -     | -     | 3.4  | 1.7   |

Tabela 5.14: Resposta de um pelotão com comunicação a uma paragem de emergência numa descida.

|                       |                     | Veículos |      |      |      |      |      |
|-----------------------|---------------------|----------|------|------|------|------|------|
|                       |                     | 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Paragem de emergência | Tempo de subida (s) | 47.1     | 47.1 | 46.8 | 46.8 | 46.8 | 46.8 |

## 5.4 Conclusão

Como pode ser observado nas figuras, os testes foram concluídos sem ser observado nenhum embate entre veículos. Apesar deste facto, no controlo sem comunicação pode ser observado um acumular de perturbações na velocidade dos veículos, principalmente no veículo 5 e 6, resultando num grande erro de distância do veículo da frente. Os maiores erros foram observados nos testes em descida, onde se pode observar um desvio da distância de referência de 10.8 metros aos 48.34 segundos. Este fenómeno resulta não só do acumular de perturbações, mas também da simplificação do modelo do veículo, no qual a variação da aceleração positiva e aceleração negativa podem tomar os mesmos valores, o que não é o mais fiel à realidade.

Já o método de controlo com recurso a comunicação comprovou a sua superioridade na resposta às mudanças de velocidade ao eliminar a propagação dos erros ao longo do pelotão mantendo o desvio da distância referência sempre abaixo dos 5 metros.



## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho futuro

### 6.1 Conclusão

Nesta dissertação, foi proposto, desenvolvido, testado e analisado um controlador difuso baseado no sistema de apoio à condução ACC sem recurso a comunicação.

Inicialmente foi desenvolvido um modelo matemático que representasse a dinâmica de um veículo. Existiu a necessidade de uma grande simplificação da realidade pois o funcionamento do motor, dos travões e da transmissão são bastante complexos. Após ser desenvolvido, o modelo foi implementado e testado na ferramenta *SIMULINK*.

De seguida foram projetados os controladores de distância e velocidade com base em lógica difusa e, após o teste dos controladores, foi desenvolvida a arquitetura de controlo por camadas. A arquitetura foi por sua vez aplicada a um pelotão de 6 veículos e, de forma iterativa, foram calculados os ganhos de pré e pós processamento. Este método revelou-se pouco eficiente pois para além de ser bastante demorado existe a possibilidade de encontrar uma solução local e não a solução ótima.

A estratégia sem comunicação estudada e aplicada aos seis veículos de características variadas obteve resultados razoáveis no controlo dos quatro primeiros veículos do pelotão mas, em todos os testes, é possível observar um acumular de perturbações inseridas e amplificadas pelo controlador de cada veículo, que em alguns casos atinge os 10 m de erro, impossibilitaria o controlo de pelotões com maior número de veículos. Um dos fatores que pode ter proporcionado este resultado foi o baixo número de iterações utilizado no processo para obter os ganhos de pré e pós processamento.

A estratégia de controlo com recurso a comunicação comprovou ser capaz de retificar a acumulação de erros visíveis nos últimos veículos do pelotão. Apesar de esta estratégia ser bastante superior à sem comunicação, introduz uma muito maior complexidade ao sistema de controlo como atrasos, falhas e erros na comunicação. Este método requer também a implementação de um protocolo de comunicação global de forma a tornar possível a comunicação entre veículos de diferentes fabricantes.

Apesar de podermos concluir que a arquitetura inicialmente testada não seria aplicável em grandes pelotões sem recurso a alguma forma de comunicação, podemos deduzir a eficácia do uso

de controladores difusos nos sistemas de *Cruise Control* e *Adaptive Cruise Control*, que pode ser vantajoso para outro tipo de arquiteturas de controlo como o *Extended Adaptive Cruise Controller* ou o *Cooperative Adaptive Cruise Controller*.

Embora os bons resultados do controlador com recurso a comunicação V2V, trata-se de um estudo de prospeção na utilização da lógica difusa no controlo de pelotões logo, seria pretensiosa a comparação deste estudo com outros estudos no mesmo tema.

## 6.2 Trabalho futuro

O trabalho realizado nesta dissertação alcançou os objetivos inicialmente pretendidos. No entanto, um trabalho futuro deve ser realizado de forma a investigar mais a fundo a eficácia do controlo desenvolvido. Deve ser utilizado um modelo matemático mais realista dos veículos do pelotão, mais concretamente, deve ser separado o sistema de aceleração do sistema de travagem. Deve também introduzir-se a variação do atrito aerodinâmico nos veículos, dependente da distância a que se encontram do veículo da frente e de trás. De forma a obter resultados mais concretos da eficácia do sistema deve também ser introduzido no modelo uma forma de calcular os consumos energéticos de cada veículo. A simulação deve também ter em conta fatores como a interrupção, falha ou atraso na comunicação V2V. Desta forma, passa a ser possível a comparação realista dos resultados obtidos no controlo com outros métodos de controlo estudados.

Apesar da eficácia do controlador com recurso a comunicação V2V existe um grande custo temporal no cálculo dos ganhos no pré-processamento e pós-processamento dos valores *crisp*. pois trata-se de um processo iterativo lento e tedioso. Com o objetivo de simplificar e tornar mais eficaz, deve ser utilizado outro processo para o cálculo dos ganhos.

# Referências

- [1] Motorisation rates in the eu, by country and vehicle type, 02 2021. URL: <https://www.acea.auto/figure/motorisation-rates-in-the-eu-by-country-and-vehicle-type/>.
- [2] NASA. The causes of climate change, 03 2022. URL: <https://climate.nasa.gov/causes/>.
- [3] Hannah Ritchie e Max Roser. Emissions by sector, 2020. URL: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.
- [4] Mit mathematics | traffic modeling. URL: <https://math.mit.edu/traffic/>.
- [5] D. Iozsa, C. Stan, e L. Ilea. Study on the influence of the convoy rolling over aerodynamic resistance. Em *Study on the influence of the convoy rolling over aerodynamic resistance*, volume 252. Institute of Physics Publishing, 10 2017. doi:10.1088/1757-899X/252/1/012035.
- [6] The project | platooning ensemble. URL: <https://platooningensemble.eu/project>.
- [7] Dimitar Driankov. *An Introduction to Fuzzy Control*. 01 1993. doi:10.1007/978-3-662-11131-4.
- [8] Erik Hellström, Maria Ivarsson, Jan Åslund, e Lars Nielsen. Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. *Control Engineering Practice*, 17:245–254, 2 2009. doi:10.1016/j.conengprac.2008.07.005.
- [9] Wenjing Cao, Tsuyoshi Yuno, e Taketoshi Kawabe. Pulse and glide strategy analysis based on engine operating point during pulse mode. *European Journal of Control*, 65:100629, 5 2022. doi:10.1016/j.ejcon.2022.100629.
- [10] Shaobing Xu, Shengbo Eben Li, Xiaowu Zhang, Bo Cheng, e Huei Peng. Fuel-optimal cruising strategy for road vehicles with step-gear mechanical transmission. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(6):3496–3507, 2015. doi:10.1109/TITS.2015.2459722.
- [11] Valerio Turri. *Look-ahead control for fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning*. Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology, 2018.
- [12] Rikard Ohlsén e Erik Sten. Optimal platooning of heavy-duty vehicles. Tese de mestrado, Linköping University, Vehicular Systems, 2018. Dubbelklassat examensarbete, elektroteknik och maskinteknik.

- [13] Louis A. Pipes. An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24(3):274–281, 1953.
- [14] W. Levine e M. Athans. On the optimal error regulation of a string of moving vehicles. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11(3):355–361, 1966. doi:10.1109/TAC.1966.1098376.
- [15] Kai ching Chu. Decentralized control of high-speed vehicular strings. *Transportation Science*, 8(4):361–384, 1974. URL: <http://www.jstor.org/stable/25767760>.
- [16] Shahab Sheikholeslam e Charles A. Desoer. Longitudinal control of a platoon of vehicles. Em *1990 American Control Conference*, páginas 291–296, 1990. doi:10.23919/ACC.1990.4790743.
- [17] A. Vahidi e A. Eskandarian. Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 4(3):143–153, 2003. doi:10.1109/TITS.2003.821292.
- [18] Assad Alam. *Fuel-efficient heavy-duty vehicle platooning*. Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- [19] J. K. Hedrick, D. McMahon, V. Narendran, e D. Swaroop. Longitudinal vehicle controller design for ivhs system. Em *1991 American Control Conference*, volume 3, páginas 3107–3112. Publ by American Automatic Control Council, 1991. doi:10.23919/acc.1991.4791980.
- [20] R. Rajamani e C. Zhu. Semi-autonomous adaptive cruise control systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 51(5):1186–1192, 2002. doi:10.1109/TVT.2002.800617.
- [21] Xiao-Yun Lu e J. Hedrick. Practical string stability for longitudinal control of automated vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 41, 01 2004.
- [22] Xiao-Yun Lu e Steve Shladover. Integrated acc and cacc development for heavy-duty truck partial automation. Em *2017 American Control Conference (ACC)*, páginas 4938–4945, 2017. doi:10.23919/ACC.2017.7963720.
- [23] Klas Lindsten e Gustav Ling. Model predictive control using neural networks a study on platooning without intervehicular communications, 07 2017. URL: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1123255/FULLTEXT01.pdf>.
- [24] Jihan Ryu e J. Christian Gerdes. Integrating Inertial Sensors With Global Positioning System (GPS) for Vehicle Dynamics Control . *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 126(2):243–254, 08 2004. URL: <https://doi.org/10.1115/1.1766026>, arXiv:[https://asmedigitalcollection.asme.org/dynamicsystems/article-pdf/126/2/243/5779941/243\\_1.pdf](https://asmedigitalcollection.asme.org/dynamicsystems/article-pdf/126/2/243/5779941/243_1.pdf), doi:10.1115/1.1766026.
- [25] Md Whaiduzzaman, Mehdi Sookhak, Abdullah Gani, e Rajkumar Buyya. A survey on vehicular cloud computing. *Journal of Network and Computer Applications*, 40:325–344, 2014. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804513001793>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2013.08.004>.
- [26] Dirk van Dooren, Sebastian Schiessl, Adam Molin, James Gross, e Karl Henrik Johansson. Safety analysis for controller handover in mobile systems. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):10090–10095, 2017. 20th IFAC World Congress. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317324035>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1782>.

- [27] J.K. Hedrick, Donn McMahon, V. Narendran, e Swaroop Darbha. Longitudinal vehicle controller design for ivhs systems. Em *1991 American Control Conference*, volume 3, páginas 3107 – 3112, 07 1991. doi:10.23919/ACC.1991.4791980.
- [28] Valerio Turri, Oscar Flärdh, Jonas Mårtensson, e Karl H. Johansson. Fuel-optimal look-ahead adaptive cruise control for heavy-duty vehicles. Em *2018 Annual American Control Conference (ACC)*, páginas 1841–1848, 2018. doi:10.23919/ACC.2018.8431494.
- [29] Steven Shladover, Xiao-Yun Lu, Shiyan Yang, Hani Ramezani, John Spring, Christopher Nowakowski, David Nelson, Deborah Thompson, Aravind Kailas, e Brian Mcauliffe. Cooperative adaptive cruise control (cacc) for partially automated truck platooning: Final report, 2018.
- [30] X Lu, S Shladover, S Bergquist, A Kailas, D Thompson, Group North, America Hanson, e O Altan. Truck partial automation -integrated acc and cacc.
- [31] C. C. Chien e P. Ioannou. Automatic vehicle-following. Em *1992 American Control Conference*, volume 2, páginas 1748–1752. Publ by American Automatic Control Council, 1992. doi:10.23919/acc.1992.4792410.
- [32] Ayumu Doi, Tetsuro Butsuen, Tadayuki Niibe, Takeshi Takagi, Yasunori Yamamoto, e Hirofumi Seni. Development of a rear-end collision avoidance system with automatic brake control. *JSAE Review*, 15(4):335–340, 1994. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/038943049490216X>.
- [33] Yasuhiko Fujita, Kenji Akuzawa, e Makoto Sato. Radar brake system. *JSAE Review*, 16(1):113, 1995.
- [34] Ellen van Nunen, Dimitrios Tzempetis, Gerald Koudijs, Henk Nijmeijer, e Mark van den Brand. Towards a safety mechanism for platooning. Em *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, páginas 502–507, 2016. doi:10.1109/IVS.2016.7535433.
- [35] Ellen van Nunen, Francesco Esposto, Arash Khabbaz Saberi, e Jan-Pieter Paardekooper. Evaluation of safety indicators for truck platooning. Em *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, páginas 1013–1018, 2017. doi:10.1109/IVS.2017.7995847.
- [36] H. Pacejka. *Tire and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann, 01 2012. doi:10.1016/C2010-0-68548-8.