

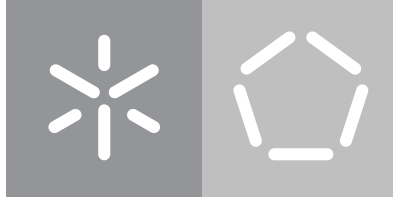


Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Edgar Agostinho da Silva Baptista

**Desenvolvimento de soluções de
condução autónoma baseadas em
sistemas dinâmicos não lineares**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Edgar Agostinho da Silva Baptista

**Desenvolvimento de soluções de
condução autónoma baseadas em
sistemas dinâmicos não lineares**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Sérgio Paulo Carvalho Monteiro

Doutor Emanuel Augusto Freitas de Sousa

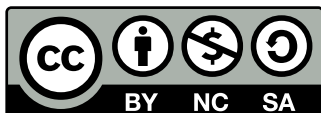
DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgual 4.0 Internacional

CC BY-NC-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.pt>

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores e coorientadores, pela colaboração e disponibilidade para me esclarecer todas e quaisquer dúvidas. Muito obrigado por todo o apoio, motivação e por me acompanharem nesta caminhada.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, por todas as oportunidades proporcionadas, pelo apoio, por me tornarem na pessoa que sou hoje. Obrigado por me possibilitarem a concretização de um grande objetivo de vida e por toda a compreensão ao longo deste percurso.

À minha namorada, que sempre me apoiou, pelas horas de escuta, de partilha e de conselhos. Obrigado pela compreensão e por sempre me teres incentivado.

A todos vós, a minha eterna gratidão.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Desenvolvimento de soluções de condução autónoma baseadas em sistemas dinâmicos não lineares

A área de pesquisa relacionada com veículos autónomos tem sido alvo de muita atenção no passado recente. Principalmente na última década, houve um grande salto no conhecimento adquirido e é prevista uma tendência crescente no desenvolvimento de soluções de condução autónoma e semiautónoma nos próximos anos. As tecnologias de condução autónoma têm a potencialidade de melhorar a segurança e eficiência do tráfego do futuro, bem como aumentar a mobilidade de pessoas com dificuldades de locomoção, desde que sejam aceites e sejam capazes de oferecer aos seus utilizadores uma experiência confortável e agradável. Para isso é importante, primeiramente, perceber como os utilizadores preferem que os veículos autónomos os conduzam e, em segundo lugar, dotar estes últimos com a capacidade de adaptação do seu estilo de condução às preferências dos seus ocupantes. Tendo tudo isto em conta, a contribuição desta dissertação é o desenvolvimento, e implementação em dois simuladores de condução, de um algoritmo de controlo longitudinal e lateral para um veículo autónomo, capaz de ajustar o seu estilo de condução, baseado em sistemas dinâmicos não lineares. Contribui também para a perceção de que a adaptação do estilo de condução permite aumentar as taxas de aceitação de soluções de mobilidade autónoma por parte das pessoas. Realizei um teste com participantes a fim de averiguar a capacidade do veículo autónomo em alterar o seu estilo de condução. Com base nos resultados obtidos, concluí que, de facto, em média, os participantes notaram o aumento da agressividade do veículo consoante o aumento da agressividade do estilo de condução.

Palavras chave: Aceitação; Condução autónoma; Sistemas dinâmicos não lineares

Abstract

Development of autonomous driving solutions based on nonlinear dynamic systems

The area of research related to autonomous vehicles has received a lot of attention in the recent past. Specially in the last decade, there has been a great leap in the knowledge acquired and a growing trend in the development of autonomous and semi-autonomous driving solutions is expected in the coming years. Autonomous driving technologies have the potential to improve the safety and efficiency of the traffic of the future, as well as increase the mobility of people with mobility difficulties, as long as it is accepted and is able to offer its users a comfortable and joyful experience. For this, it is important, first of all, to understand how users prefer autonomous vehicles to drive them and, secondly, to endow this vehicles with the capacity of adapting their driving style to the preferences of their occupants. Taking all this into account, the contribution of this dissertation was related to the development, and implementation in two driving simulators, of a longitudinal and lateral control algorithm for an autonomous vehicle, capable of adjusting its driving style, based on non-linear dynamic systems. It also contributes to the perception that adapting the driving style allows people to increase the acceptance rates of autonomous mobility solutions. A test with participants was carried out in order to ascertain the ability of the autonomous vehicle to change its driving style. Based on the results obtained, it can be concluded that, in fact, on average, the participants noticed an increase in the vehicle's aggressiveness according to the increase in the aggressiveness of the driving style.

Keywords: Acceptance; Autonomous driving; Nonlinear dynamic systems

Índice

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e Objetivos	4
1.3 Organização da dissertação	5
2 Estado da arte	7
2.1 Introdução	7
2.2 Modelos do veículo	8
2.3 Controladores de veículos autónomos	14
2.3.1 Controlador Pure Pursuit e Stanley	14
2.3.2 Controlador MPC	18
2.3.3 Controlador LQR	19
2.3.4 Redes neuronais e <i>fuzzy</i>	20
2.3.5 Controlador PID	22
2.3.6 Controlador SMC	23
2.4 Aceitação da tecnologia autónoma pelos utilizadores	26
2.5 Sistema dinâmico	28
2.5.1 Sistema dinâmico não linear	28
2.5.2 O uso de sistemas dinâmicos no controlo de um veículo autónomo	30
2.6 Discussão do estado da arte	35
3 Desenvolvimento	37
3.1 Parametrização do estilo de condução	37

3.1.1	Distância de segurança	39
3.1.2	Convergência para a distância de segurança	40
3.1.3	Magnitude de convergência para a velocidade desejada	41
3.1.4	Aceleração longitudinal máxima	42
3.1.5	Aceleração lateral máxima	43
3.1.6	Abordagem à curva	44
3.1.7	Suavidade de transição de faixa	45
3.2	Controlo do veículo	48
3.2.1	Controlo longitudinal	48
3.2.2	Controlo lateral	53
3.2.3	Manobra de ultrapassagem	58
3.3	Implementação em Matlab	61
3.3.1	Controlo longitudinal	61
3.3.2	Controlo lateral	62
3.3.3	Dinâmica do veículo	63
3.3.4	Panorama geral	67
3.4	Implementação em SILAB	69
4	Resultados	75
4.1	Controlo longitudinal	75
4.1.1	Seguimento da velocidade recomendada	76
4.1.2	Manutenção da distância de segurança	76
4.1.3	Redução da velocidade em curva	78
4.2	Controlo lateral	80
4.2.1	Anulação do desvio lateral	80
4.2.2	Seguimento da orientação da trajetória	80
4.2.3	Ultrapassagem	81
4.3	Ajuste do estilo de condução	82
4.4	Teste com participantes	87
4.4.1	Método	88
4.4.2	Procedimento	90
4.4.3	Parametrização dos três estilos de condução	90
4.4.4	Participantes	91

4.4.5	Análise e discussão dos dados	92
5	Conclusões e trabalho futuro	98
5.1	Trabalho futuro	99
	Bibliografia	101
	Anexos	110
I	Protocolo	110
II	Questionário sociodemográfico	115
III	Questionário sobre os enjoos	118
IV	Questionário final	120

Lista de Figuras

1.1	Níveis de condução autónoma (“Carros autónomos na União Europeia: da ficção científica à realidade”, 2019).	3
1.2	Principais benefícios dos veículos autónomos (“Carros autónomos na União Europeia: da ficção científica à realidade”, 2019).	4
2.1	Modelo geométrico baseado na geometria de Ackerman (Snider et al., 2009).	9
2.2	Redução do modelo cinemático de um veículo para o modelo da bicicleta (Kong et al., 2015).	10
2.3	Redução do modelo dinâmico de um veículo para o modelo da bicicleta (Xia et al., 2020).	11
2.4	Efeito da variação do parâmetro <i>look-ahead distance</i> (“Pure Pursuit Controller - MATLAB & Simulink”, s.d.).	14
2.5	Representação do funcionamento do controlador Pure Pursuit (Chen et al., 2018).	15
2.6	Representação do funcionamento do controlador Stanley (Cibooglu et al., 2017).	17
2.7	Princípio básico do MPC (Liu et al., 2018).	18
2.8	Diagrama de blocos de uma implementação do tipo supervisor. Realizado a partir de fonte (Amer et al., 2017).	21
2.9	Diagrama de blocos de uma implementação do tipo controlador. Realizado a partir de fonte (Amer et al., 2017).	21
2.10	Efeito da comutação rápida (Guldner & Utkin, 2000).	24
2.11	Representação gráfica de dois exemplos de sistemas dinâmicos. As setas indicam o sentido da progressão do valor de x à medida que o tempo evolui.	30
2.12	Representação gráfica da forma como o robô “vê” o ambiente circundante. Realizado a partir de fonte (Bicho, 1999).	31
2.13	Contribuição de cada sensor para o desvio dos obstáculos (Bicho, 1999).	32
2.14	Contribuição da componente responsável pelo movimento em direção a um alvo (Bicho, 1999).	33
2.15	Representação gráfica do sistema dinâmico do controlador longitudinal, para $\lambda > 0$	34

2.16	Retrato de fase do sistema dinâmico do controlador longitudinal.	34
3.1	Variáveis de seleção do comportamento do veículo.	39
3.2	Gráfico da variação da distância de segurança em função da velocidade do veículo.	40
3.3	Gráfico da variação da velocidade segura em função da distância em falta para alcançar a distância de segurança.	41
3.5	Gráfico do sistema dinâmico responsável por convergir a velocidade do veículo para a velocidade desejada.	43
3.6	Gráfico da variação da velocidade máxima em função da curvatura da estrada para limitação da aceleração lateral a $a_{lat\ max}$	44
3.7	Representação da variação da abordagem à curva em função do estilo de condução, para uma mesma velocidade.	45
3.8	Gráficos da variação da suavidade de transição de faixa em função da velocidade do veículo e da distância relativa ao veículo da frente.	46
3.9	Representação do efeito da variação do estilo de ultrapassagem na suavidade da transição de faixa.	47
3.10	Ilustração dos dois comportamentos do controlador.	48
3.11	Representação gráfica do sistema dinâmico para $\lambda > 0$	51
3.12	Retrato de fase do sistema dinâmico.	51
3.13	Ilustração do comportamento do controlador lateral.	53
3.14	Representação gráfica do sistema dinâmico.	55
3.15	Retrato de fase do sistema dinâmico.	55
3.16	Demonstração do comportamento do controlador lateral.	56
3.17	Ilustração do comportamento do controlador lateral.	57
3.18	Geração da trajetória de ultrapassagem em tempo real	58
3.19	Cálculo das coordenadas dos pontos da trajetória de ultrapassagem.	59
3.20	Transição entre faixas de rodagem	60
3.21	Bloco responsável pelo controlo longitudinal do veículo.	61
3.22	Blocos do subsistema do controlo longitudinal do veículo.	62
3.23	Bloco responsável pelo controlo lateral do veículo.	62
3.24	Blocos do subsistema do controlo lateral do veículo.	63
3.25	Representação do modelo cinemático do veículo.	64
3.26	Bloco responsável pela dinâmica do veículo.	65

3.27	Blocos do subsistema da dinâmica do veículo.	66
3.28	Cinemática direta e inversa do veículo.	66
3.29	Sistema de condução autónoma realizado na ferramenta Simulink do Matlab.	68
3.30	Software de simulação de condução SILAB (Wiwv GmbH-Silab, 2018).	69
3.31	Exemplo da variação do offset em função dos parâmetros calculados.	71
3.32	Exemplo da variação do deslocamento em função da distância temporal ao veículo da frente.	72
3.33	Exemplo da variação do deslocamento em função da distância após passar o veículo da frente.	73
4.1	Convergência da velocidade do veículo para o valor recomendado a partir de três velocidades iniciais diferentes.	76
4.2	Manutenção do valor da distância de segurança recomendado, em dois estilos de condução diferentes.	77
4.3	Convergência da velocidade do veículo autónomo para a velocidade do veículo da frente, em dois estilos de condução diferentes.	77
4.4	Percurso percorrido pelo veículo no teste.	78
4.5	Curvas utilizadas no cenário de teste.	78
4.6	Diminuição do valor da velocidade durante a realização de duas curvas com raio diferente.	79
4.7	Gráfico da aceleração lateral durante a realização do teste.	79
4.8	Gráfico da evolução do desvio lateral, com três diferentes desvios iniciais.	80
4.9	Gráfico da evolução das orientações da estrada e do veículo durante a realização do teste.	81
4.10	Trajetória percorrida pelo veículo autónomo durante a ultrapassagem, com dois estilos de condução diferentes.	82
4.11	Variação da transição de faixa em função do estilo de ultrapassagem.	83
4.12	Aceleração longitudinal do veículo durante a realização do teste.	84
4.13	Variação da distância relativa frontal em função do estilo de condução.	85
4.14	Aceleração lateral do veículo durante a realização de duas curvas com raios diferentes.	86
4.15	Evolução do desvio lateral em função do estilo de condução, durante a realização de duas curvas com raios diferentes.	86
4.16	Simulador de condução utilizado nos testes.	88
4.17	Cenário desenvolvido para o teste.	89
4.18	Médias, desvios padrão, máximos e mínimos das avaliações dadas pelos participantes em cada um dos troços. 1, 2, 3 e 4 - Agressivo; 5, 6, 7 e 8 - Defensivo; 9, 10, 11, e 12 - Médio.	92
4.19	Médias das avaliações dadas pelos participantes em cada um dos estilos de condução.	94

4.20	Médias das avaliações dadas pelos participantes em cada um dos troços cuja velocidade do veículo da faixa da direita era de 70 km/h. As barras representam o erro padrão da média.	94
4.21	Médias das avaliações dadas pelos participantes em cada um dos troços cuja velocidade do veículo da faixa da direita era de 90 km/h. As barras representam o erro padrão da média.	95
I.1	Protocolo dos testes com participantes (página 1).	111
I.2	Protocolo dos testes com participantes (página 2).	112
I.3	Protocolo dos testes com participantes (página 3).	113
I.4	Protocolo dos testes com participantes (página 4).	114
II.1	Questionário sociodemográfico (página 1).	116
II.2	Questionário sociodemográfico (página 2).	117
III.1	Questionário apresentado antes e após a realização do teste de modo a verificar possíveis efeitos provocados pela simulação.	119
IV.1	Questionário final para registo dos comentários dos participantes.	121

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros que afetam o estilo de condução e de ultrapassagem do veículo autónomo.	38
4.1	Características dos troços em que o veículo autónomo apresenta um estilo de condução agressivo.	88
4.2	Características dos troços em que o veículo autónomo apresenta um estilo de condução defensivo.	89
4.3	Características dos troços em que o veículo autónomo apresenta um estilo de condução médio.	89
4.4	Avaliações dos troços de um dos participantes do teste piloto.	91
4.5	Experiência com sistemas de condução autónoma e respetiva satisfação.	92
4.6	Análise da variância (ANOVA). gl - graus de liberdade; EQM - erro quadrático médio.	96
4.7	Teste Post-Hoc. gl - graus de liberdade; EP - erro padrão.	96
4.8	Teste Post-Hoc. gl - graus de liberdade; EP - erro padrão.	97

Introdução

Neste capítulo são apresentados o enquadramento, a motivação, os objetivos e as contribuições originais desta dissertação. O enquadramento retrata a evolução geral da condução autónoma, desde os seus primórdios, e os aspetos que influenciam a sua aceitação por parte das pessoas. Em seguida, são apresentadas as motivações para a elaboração deste projeto, juntamente com a descrição dos objetivos para uma melhor estruturação do trabalho. São também descritas as contribuições originais, que irão demonstrar a relevância e enumerar os contributos desta dissertação para a resolução dos problemas atuais relacionados com este tema. No final do capítulo é exibida a estrutura da dissertação de modo a orientar os leitores ao longo do texto.

1.1 Enquadramento

O primeiro veículo movido através de um motor, inventado em 1885, escalou para uma frota global de aproximadamente um milhão de milhões de veículos, que transportam constantemente bens e pessoas (Burns, 2013). O transporte automóvel é, hoje, essencial para facilitar as interações sociais e económicas, mas os seus impactos negativos (Santos et al., 2010) estão a impedir que se alcancem os objetivos de desenvolvimento sustentável. O custo elevado dos transportes públicos ou privados para muitas pessoas (Mullen et al., 2020), a grande emissão de gases de efeito de estufa e outros poluentes (Creutzig et al., 2015) e o elevado número de mortes causadas (Bartolomeos et al., 2013) são os principais impactos negativos causados pelo atual sistema.

Os veículos autónomos têm a capacidade de se controlarem a si próprios para navegar desde um ponto

inicial até a um destino final sem nenhuma intervenção humana. Um corpo crescente de investigação atual sugere que a tecnologia de condução autónoma tem o potencial para alterar fundamentalmente o paradigma dos transportes (Al-Kanj et al., 2020) e ajudar na transição para um sistema 100% sustentável (Whitmarsh, 2012). Os avanços nos veículos autónomos prometem tornar os ambientes urbanos mais sustentáveis, reduzindo a poluição do ar (Burns, 2013), os congestionamentos do tráfego (Fagnant & Kockelman, 2014) e o risco de acidentes rodoviários (Duarte & Ratti, 2018) e aumentando o acesso à mobilidade. Além disso, o mercado de veículos autónomos está em expansão, esperando-se que venha a gerar centenas de milhares de milhões de dólares a nível mundial nos próximos anos.

As investigações relacionadas com esta tecnologia iniciaram na década de 80 (Wallace et al., 1985) e foram conduzidas por muitas universidades, centros de investigação e empresas do ramo automóvel, entre outras indústrias (Insights, 2019). De maneira a estimular o desenvolvimento de carros autónomos, a DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) organizou 3 competições com o objetivo de pôr em teste a tecnologia de condução autónoma mais recente. A primeira, intitulada DARPA Grand Challenge, foi realizada em 2004, no deserto de Mojave, nos EUA, e propunha um trajeto de 230 quilómetros que os carros tinham de percorrer em menos de 10 horas. Todos os concorrentes fracassaram nos primeiros quilómetros. No ano seguinte o desafio foi repetido. Desta vez o percurso de 210 quilómetros era mais exigente, pois continha 3 túneis estreitos e mais de 100 curvas acentuadas, mas 4 carros conseguiram completar o percurso dentro do tempo limite (Buehler et al., 2007). A terceira competição, renomeada para DARPA Urban Challenge (Buehler et al., 2009), foi realizada na Califórnia, em 2007. Os concorrentes tinham de navegar por um percurso que simulava um ambiente urbano, com uma extensão de 100 quilómetros. Este trajeto era simultaneamente partilhado com outros carros autónomos e também com carros conduzidos por pessoas. O tempo máximo para a conclusão do desafio era de 6 horas e os concorrentes tinham de obedecer às regras de trânsito locais. No final, 6 carros conseguiram cumprir o desafio.

Apesar de estas competições terem um nível de dificuldade baixo, comparativamente ao desafio do tráfego quotidiano, foram consideradas como marcos importantes para o desenvolvimento dos veículos autónomos. Ainda assim, a disponibilidade comercial de veículos equipados com esta tecnologia está ainda longe de se tornar uma realidade (Hemphill, 2020). Para isso são necessários muitos mais esforços de investigação e desenvolvimento.

Para determinar o nível de autonomia de um carro autónomo, a SAE (Society of Automotive Engineers) publicou um sistema de classificação que se baseia na percentagem de atenção e intervenção humana requerida pelo veículo. Esta classificação começa no nível 0, atribuído aos veículos que não tinha qualquer controlo sobre si mesmos, e acabava no nível 5, dado àqueles que não necessitavam de nenhuma

intervenção humana (SAE International, 2018). A figura 1.1 ilustra todos os níveis desta classificação.

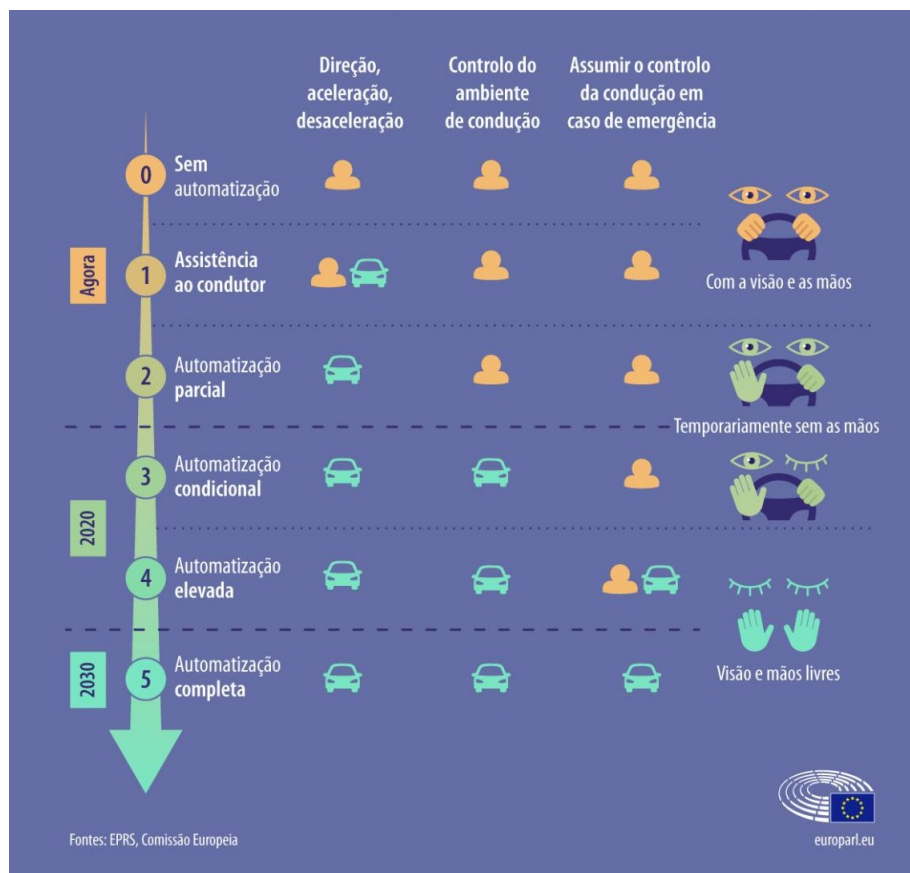


Figura 1.1: Níveis de condução autónoma (“Carros autónomos na União Europeia: da ficção científica à realidade”, 2019).

A evolução e o aperfeiçoamento dos veículos autónomos não significa necessariamente o sucesso desta tecnologia. A aceitação por parte dos utilizadores de veículos que se autocontrolam e que não aceitam intervenções humanas representa uma significativa barreira para que estes possam fazer parte do futuro dos transportes.

Dado que existem preocupações consideráveis, e compreensíveis, acerca desta tecnologia e que a mesma ainda não foi introduzida no mercado numa grande escala, é crucial compreender de forma abrangente os elementos que influenciam a aceitação das pessoas sobre a condução autónoma, de modo a que esta inovação possa triunfar.

1.2 Motivação e Objetivos

Embora não seja ainda uma tecnologia totalmente madura, a condução autónoma atrai um enorme interesse, tanto na comunidade científica como no público em geral, o que pode ser comprovado pelas variadíssimas investigações conduzidas até agora e por várias notícias que permitem antecipar a sua importância num futuro próximo. As principais motivações da condução autónoma encontram-se ilustradas na figura 1.2. A principal motivação para a realização deste projeto relaciona-se com a fomentação da aceitação das soluções de condução autónoma por parte dos utilizadores.

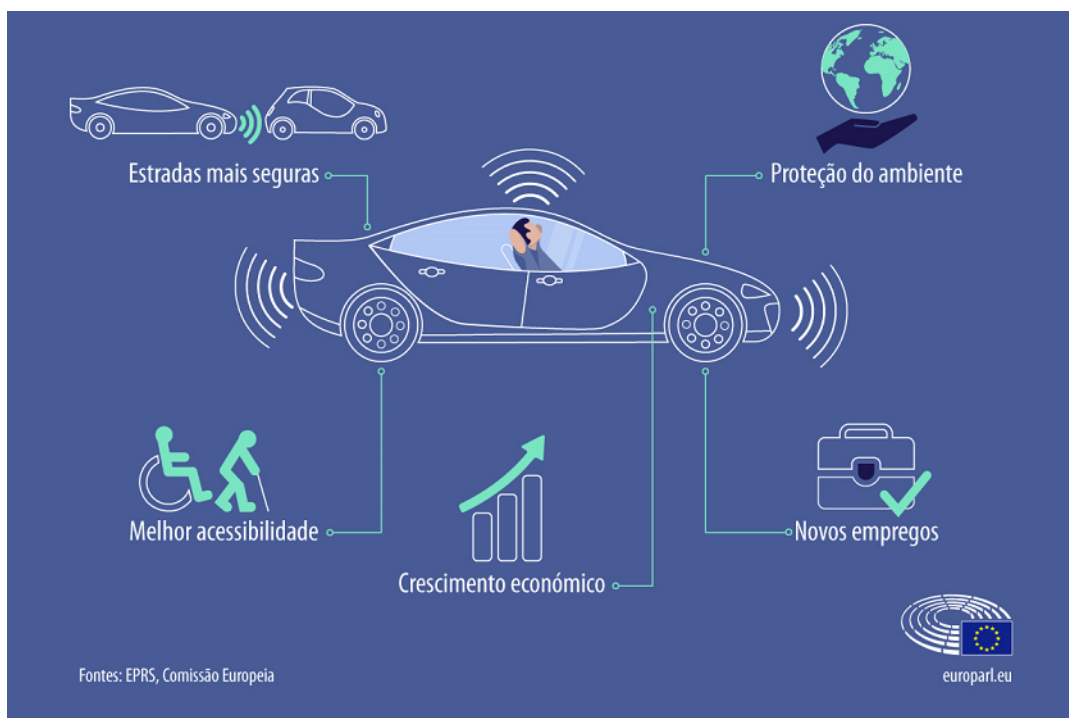


Figura 1.2: Principais benefícios dos veículos autónomos (“Carros autónomos na União Europeia: da ficção científica à realidade”, 2019).

A primeira motivação prende-se com a redução significativa do número de acidentes de viação e consequente diminuição do número de mortes. Segundo a Organização Mundial de Saúde, em 2018, morreram em todo o mundo mais de 1.35 milhões de pessoas neste tipo de acidentes (Organization et al., 2018). Esta foi a principal causa de morte de indivíduos dos 5 até aos 29 anos de idade.

A segunda motivação tem a ver com a diminuição dos congestionamentos de tráfego e da emissão de gases poluentes e tóxicos. O setor dos transportes é atualmente responsável por 18% das emissões totais de monóxido de carbono e por 28% das emissões totais de óxidos de azoto, entre outros (European Environment Agency, 2019). Estes são gases que agravam o aquecimento global, um dos maiores problemas atualmente da nossa sociedade que necessita de ser urgentemente resolvido.

A terceira motivação envolve aumentar a aceitação de soluções de condução autónoma por parte

das pessoas. Existem algumas preocupações relacionadas com esta tecnologia que fazem com que os potenciais utilizadores resistam à sua adoção e, por isso, é importante desenvolver, desde já esforços, no sentido de aumentar as taxas de aceitação.

Os objetivos desta dissertação passam por desenvolver um algoritmo capaz de controlar longitudinal e lateralmente um veículo, baseado em sistemas dinâmicos não lineares, implementando uma abordagem *behavior-based*. Outro objetivo é que este algoritmo seja parametrizável, para ajuste do estilo de condução pretendido, de modo a que no futuro seja possível optar por um comportamento em estrada mais defensivo ou mais agressivo.

Para conseguir isso, foi necessário cumprir as seguintes tarefas:

- **Desenvolvimento do modelo do veículo**

Nesta etapa do estudo foi definido, primeiramente, o modelo cinemático a utilizar e, posteriormente, implementado o mesmo em simulação para se observar o comportamento real do veículo.

- **Desenvolvimento do algoritmo de controlo**

Para cumprir esta fase foi necessário desenvolver um algoritmo baseado em sistemas dinâmicos não lineares, para o controlo da trajetória do veículo. O algoritmo é parametrizável de modo a ser possível alterar o estilo da condução do veículo.

- **Exportação das arquiteturas para o ambiente SILAB**

Aqui foi necessário portar o controlador desenvolvido no objetivo anterior para um novo ambiente de simulação - SILAB. Para isso, serão necessárias adaptações.

- **Aferição da solução**

Nesta etapa final foram conduzidos estudos com diferentes utilizadores para verificar como varia a sua perceção relativamente aos diferentes estilos de condução do sistema autónomo.

1.3 Organização da dissertação

Após este capítulo introdutório, é analisado o estado da arte das tecnologias de condução autónoma, no que respeita aos controladores de trajetória, aos modelos matemáticos dos veículos e à aceitação de veículos autónomos pelos utilizadores.

Segue-se o capítulo do desenvolvimento, onde é explicada a teoria que baseia os controladores e o modelo cinemático desenvolvidos, bem como os algoritmos da manobra de ultrapassagem e do ajuste do estilo de condução. Além disso, é mostrada a implementação realizada tanto no Matlab como no SILAB.

O capítulo dos testes e resultados está dividido em quatro secções: controlo longitudinal, controlo lateral, ajuste do estilo de condução e testes com participantes. A primeira secção exhibe todos os testes que foram realizados para a validação do controlador longitudinal, a segunda mostra os testes realizados para validar o controlador lateral, a terceira serve para testar o comportamento do veículo sob diferentes estilos de condução e a quarta descreve os testes feitos com os participantes e análise dos resultados.

Por fim, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

Estado da arte

2.1 Introdução

Esta revisão de literatura começa por focar-se no controlo da trajetória do módulo de controlo e na realização do modelo do veículo, clarificando o conhecimento que existe atualmente na literatura.

Passa então a destacar a pesquisa existente até ao momento sobre a aceitação de soluções de condução autónoma. São abordados os principais fatores que afetam a aceitação de tecnologias de condução autónoma, bem como as formas que permitem melhorar a sua confiabilidade.

A primeira secção apresenta uma introdução sobre a história, a necessidade e as vantagens dos veículos autónomos, bem como uma breve elucidação sobre o seu funcionamento. Na secção 2 são descritos os modelos do veículo geralmente usados no desenvolvimento do controlador. Na terceira secção são revistas as principais estratégias de controlo de trajetória usadas na literatura. Na quarta secção são enumerados os principais desafios atualmente enfrentados no desenvolvimento do módulo de controlo de veículos autónomos. A quinta secção aborda a aceitação por parte das pessoas quando confrontadas com futuras tecnologias de mobilidade autónoma. Na sexta e última secção são apresentadas as conclusões gerais desta revisão de literatura.

2.2 Modelos do veículo

A modelação do veículo tem um papel muito importante em dois aspetos. Um deles é para a simulação. No desenvolvimento de um controlador, a etapa de simulação é crucial dado que é nela que são investigadas as suas propriedades e afinados os seus parâmetros para atingir o melhor desempenho do controlador. Para isso é usado o modelo do veículo para simular os seus comportamentos sob o efeito do controlador desenvolvido. O segundo aspeto prende-se com a lei de controlo da trajetória que é muitas vezes derivada da representação matemática do sistema do veículo.

Em geral, os carros são classificados como sistemas não holonómicos dado que nem todos os graus de liberdade são controláveis. Os graus de liberdade de um carro são os movimentos nas duas coordenadas cartesianas e a orientação. No entanto, apenas a translação longitudinal, através da sua velocidade, e a orientação, através do ângulo das rodas, são controláveis (Katrakazas et al., 2015).

Analisando a literatura acerca do controlo da trajetória de um veículo autónomo, é notório que grande parte das investigações usam o modelo da bicicleta, em vez do modelo completo do carro, de modo a desenvolver o controlador. O modelo da bicicleta consiste na redução do modelo do carro a uma configuração de duas rodas, uma em cada um dos eixos traseiro e dianteiro, assumindo um comportamento semelhante para as rodas da esquerda e da direita.

As abordagens mais comuns à modelação podem dividir-se em três classes, nomeadamente (por ordem de complexidade): geométrica, cinemática e dinâmica. Cada uma delas apresenta benefícios e finalidades dependendo do uso e das propriedades que se deseja estudar (Amer et al., 2017).

O modelo geométrico baseia-se na relação entre as dimensões do veículo, o raio de viragem e o raio de curvatura da estrada percorrida pelo veículo durante a realização da manobra. Apenas considera a dimensão e as posições do veículo durante as manobras, sem ter em conta a sua velocidade e aceleração. O modelo assume uma relação geométrica direta entre o ângulo da roda da frente e a curvatura que a roda de trás irá descrever, mediada pelo raio de curvatura (R) e a distancia entre eixos (L).

Este modelo é a base do controlador Pure Pursuit (J. Wit et al., 2004), um dos mais populares no controlo da trajetória.

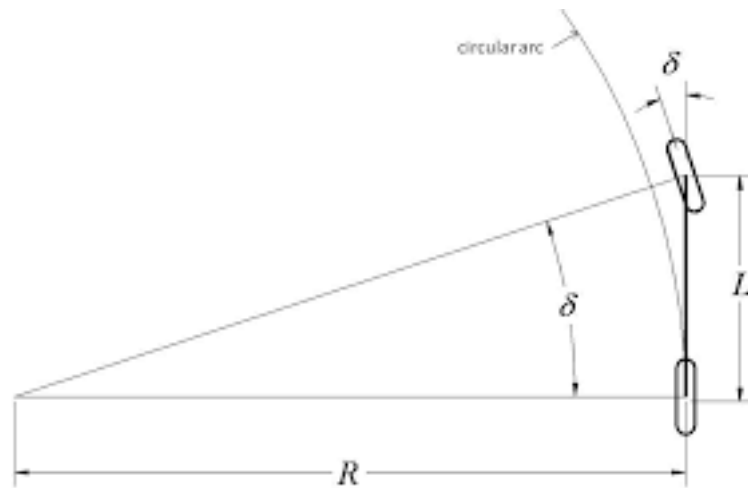


Figura 2.1: Modelo geométrico baseado na geometria de Ackerman (Snider et al., 2009).

A partir da figura 2.1 é possível ver que o ângulo de curva é dado pela equação 2.1.

$$\delta = \arctan\left(\frac{L}{R}\right) \quad (2.1)$$

Outro controlador do mesmo gênero é o Stanley, que será abordado na seção 2.3.1.

Contrariamente aos modelos geométricos, o modelo cinemático descreve o movimento do veículo com base na sua posição e velocidade. Não tem, no entanto, em consideração as forças aplicadas no veículo, pois só os modelos dinâmicos consideram este aspeto (Amer et al., 2017). Este modelo pode ser encontrado frequentemente na literatura devido à sua simplicidade e eficiência na inclusão de variáveis importantes para a representação do movimento do veículo.

Embora seja sempre usado juntamente com o modelo geométrico para se desenvolver o algoritmo do controlador, este modelo também é frequentemente usado para simular a posição, velocidade e aceleração do veículo.

Existem diversas abordagens utilizadas na literatura no desenvolvimento e representação da cinemática do veículo. Um modelo cinemático simples, proposto por Kong et al. (2015), encontra-se retratado na figura 2.2. Como foi dito anteriormente, neste modelo assume-se apenas uma roda por eixo.

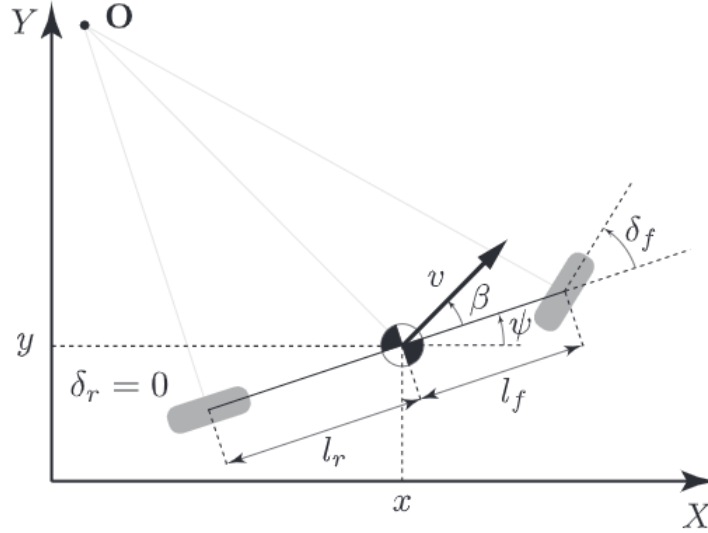


Figura 2.2: Redução do modelo cinemático de um veículo para o modelo da bicicleta (Kong et al., 2015).

Aqui, v representa a velocidade total do veículo, δ_f é o ângulo de viragem das rodas frontais do veículo com base nas coordenadas locais e ψ é a direção do veículo com referência nas coordenadas globais.

Baseado na figura 2.2, pode-se assumir v_X e v_Y como as duas componentes de v , representadas nos eixos X e Y do referencial global. Estas componentes, bem como a velocidade de rotação sobre o eixo z , $\dot{\psi}$, e o ângulo entre o vetor da velocidade e o eixo longitudinal do veículo, β , podem ser deduzidos através das equações 2.2.

$$\begin{aligned}
 v_X &= v * \cos(\psi + \beta) \\
 v_Y &= v * \sin(\psi + \beta) \\
 \dot{\psi} &= \frac{v}{l_r} \sin(\beta) \\
 \beta &= \arctan\left(\frac{l_r}{l_r + l_f} \tan(\delta_f)\right)
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Os modelos cinemáticos são pouco apropriados para situações em que se pretenda que o veículo atinja velocidades mais elevadas, dado que não têm em conta o efeito de derrapagem das rodas na direção do veículo (Dixit et al., 2018). Apesar disso, este modelo é capaz de seguir com sucesso a trajetória desejada em velocidades citadinas. Por outro lado, outros estudos estenderam o modelo cinemático da bicicleta incluindo o ângulo de deslizamento lateral de cada uma das rodas para ter em consideração terrenos mais escorregadios (Lucet et al., 2015).

Contrariamente ao modelo cinemático, o modelo dinâmico descreve o movimento do veículo relativamente à sua posição, velocidade e aceleração considerando as forças internas, a energia ou o momento do sistema. As forças aplicadas nos pneus e a massa do veículo são tidas em conta, bem como relações

geométricas e cinemáticas. O método mais comum para derivar o modelo matemático do comportamento dinâmico do veículo é a equação Newtoniana de movimentos (Amer et al., 2017). No plano longitudinal, o modelo geralmente contém os movimentos de translação lateral, y , e longitudinal, x , de rotação em torno do eixo z , ψ , e a sua velocidade angular, r . A figura 2.3 mostra a representação esquemática do modelo dinâmico reduzido do veículo.

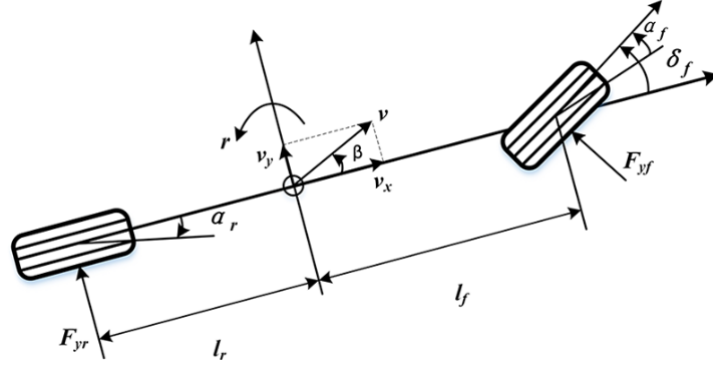


Figura 2.3: Redução do modelo dinâmico de um veículo para o modelo da bicicleta (Xia et al., 2020).

As equações de movimento para o modelo dinâmico reduzido do veículo (Amer et al., 2017) são:

$$\begin{aligned}
 F_{xr} + F_{xf} \cos \delta + F_{yf} \sin \delta &= m_b a_x \\
 F_{yr} - F_{xf} \sin \delta + F_{yf} \cos \delta &= m_b a_y \\
 F_{yr} l_r + [F_{xf} \sin \delta + F_{yf} \cos \delta] l_f &= I_{CG} \ddot{\psi} \\
 \dot{X} &= \dot{x} \cos \psi - \dot{y} \sin \psi \\
 \dot{Y} &= \dot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Aqui m_b representa a massa do veículo, I_{CG} o momento de inércia da massa em torno do eixo z , a_x e a_y as acelerações longitudinal e lateral, respetivamente, e ψ o ângulo da orientação do veículo. A posição das rodas do veículo é identificada através de f e r , referindo-se ao eixo frontal ou traseiro, respetivamente.

As equações mostram que o principal factor externo contribuinte são as forças nos pneus, pois são a principal fonte de perturbações externas. Estas forças aplicadas nos pneus provêm do contacto com a superfície da estrada, que causam deformações no pneu durante a execução de diferentes manobras. Embora estas forças sejam não lineares, é comum linearizar o modelo dinâmico assumindo que são aplicadas forças lineares. Esta abordagem é viável se o ângulo de viragem, δ , for pequeno. Vários estudos utilizaram esta abordagem anteriormente (Lucet et al., 2015). Nas equações 2.4 é mostrado como se procede a esta linearização.

$$F_x = C_x s \quad (2.4)$$

$$F_y = C_y \alpha$$

Aqui C_x e C_y representam, respetivamente, a rigidez longitudinal e lateral do pneu nas curvas e α e s simbolizam os ângulos de deslizamento lateral e longitudinal, respetivamente.

Por outro lado, os modelos cinemáticos não lineares modelam também o pneu para simular as forças longitudinais e laterais geradas em cada roda. Isto aproxima a simulação da resposta do veículo com a realidade, especialmente a velocidades elevadas e com variações maiores do ângulo de viragem. Esta abordagem pode ser encontrada em vários artigos (Falcone et al., 2007). A maioria deles usa o modelo do pneu *Pacejka* (Bakker et al., 1987). Na equação 2.5, a função P pode representar uma força ou um momento resultantes de um parâmetro de deslizamento, x , nomeadamente F_x , F_y ou F_z .

$$P(x) = D \sin [C \arctan (B(x + S_h) - E(B(x + S_h) - \arctan B(x + S_h)))] + S_v \quad (2.5)$$

Aqui os parâmetros B , C , D , E , S_h e S_v simbolizam os fatores de rigidez, de forma, de pico e de curvatura e as propriedades de deslocamento horizontal e vertical, respetivamente.

Outra abordagem alternativa é o método Euler-Lagrange (Fukao et al., 2000). Ao contrário do método Newtoniano, este foca-se nas variações das energias potencial e cinética provenientes de perturbações externas no sistema. Este método raramente é utilizado devido às derivações complexas que pode acarretar.

Como foi visto, a maioria dos estudos encontrados na literatura usa modelos lineares geométricos ou cinemáticos para representar o comportamento do veículo. Nestes modelos, o efeito dinâmico do ambiente envolvente, como as forças de atrito e o deslizamento dos pneus, é desprezado. Alguns estudos, embora utilizem modelos dinâmicos, não têm em conta as não linearidades das forças aplicadas nos pneus, apesar de serem a principal fonte de perturbações no controlo longitudinal e lateral do veículo, especialmente a altas velocidades. Os efeitos das perturbações internas, como os binários do motor e do travão, as interações do sistema da transmissão e as forças de atrito, também são raramente considerados na simulação do comportamento do veículo. Este tipo de modelo pode conter um alto nível de complexidade, mas a importância do conhecimento destes efeitos durante a etapa de desenvolvimento do controlador não deve ser subestimada. Em suma, embora tenha sido argumentado em alguns artigos que um modelo mais simples é suficiente para simular o comportamento do veículo em condições pouco complexas, a utilização de um modelo não linear, considerando um modelo realista do pneu e perturbações externas e internas, representa certamente um desafio para o desenvolvimento de um modelo mais robusto e completo.

Cada abordagem tem diferentes propósitos e por isso deve ser escolhida com base nos requisitos do controlador a desenvolver, tais como o grau de realismo pretendido na simulação do comportamento do veículo, a necessidade de analisar o seu comportamento fora da região de operação linear ou ainda a capacidade computacional disponível.

2.3 Controladores de veículos autônomos

O controlo da trajetória de um veículo autônomo tem como principais objetivos calcular o ângulo do volante e o input no acelerador ou travão necessários para controlar a direção e a velocidade do veículo, guiando-o ao longo de um percurso predefinido. Esta secção apresenta os métodos e estratégias disponíveis na literatura para o controlo da trajetória de um veículo autônomo.

2.3.1 Controlador Pure Pursuit e Stanley

Estes controladores são baseados no modelo geométrico do veículo revisto anteriormente. Caracterizam-se por serem bastante simples e estáveis. As suas características principais, bem como algumas das publicações na literatura científica que os abordam, são descritas nesta secção.

O controlador *pure pursuit* é o controlador geométrico mais popular dentre os existentes e baseia-se na geometria de Ackerman, como mostra a figura 2.5. O nome deve-se ao seu funcionamento, pois o veículo persegue um ponto em movimento ao longo do tempo.

Neste método é definida uma *look-ahead distance*, para que seja encontrado o ponto da trajetória mais próximo e calculado o erro de orientação do veículo. A distância *look-ahead* é uma das propriedades ajustáveis deste controlador e representa o quão longe, ao longo do trajeto, o veículo deve "olhar", a partir da sua posição, para calcular os comandos de velocidade angular. A alteração deste parâmetro pode influenciar a forma com que o veículo segue a trajetória: um valor baixo pode fazer com que o carro convirja rapidamente para o caminho, mas também pode provocar oscilações em torno do mesmo; um valor elevado evitará essas oscilações indesejadas mas fará com que a aproximação ao trajeto seja mais lenta e que as curvas sejam mais alargadas. Estes comportamentos estão ilustrados na figura 2.4.

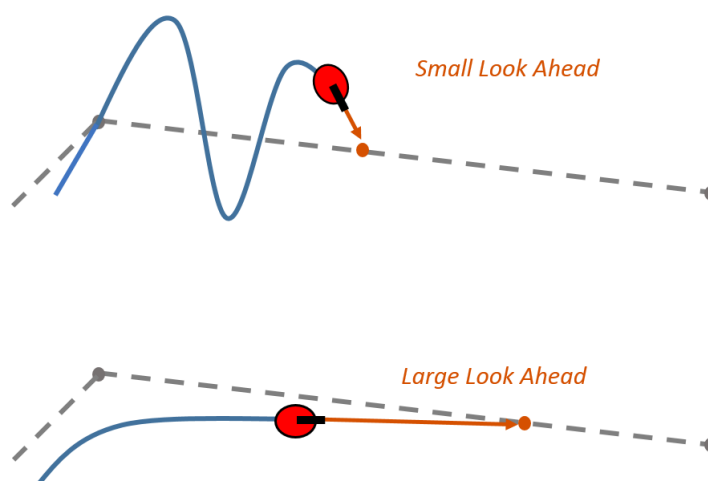


Figura 2.4: Efeito da variação do parâmetro *look-ahead distance* ("Pure Pursuit Controller - MATLAB & Simulink", s.d.).

Este controlador pode ser visto como um aprofundamento do controlador *Follow the carrot*. A melhoria do *Pure Pursuit* em relação ao *Follow the carrot* consiste no ajuste de uma curva suave de aproximação ao ponto que o veículo deve seguir, reduzindo possíveis variações bruscas na direção do veículo do método (J. S. Wit, 2000). A figura 2.5 ilustra o funcionamento deste controlador.

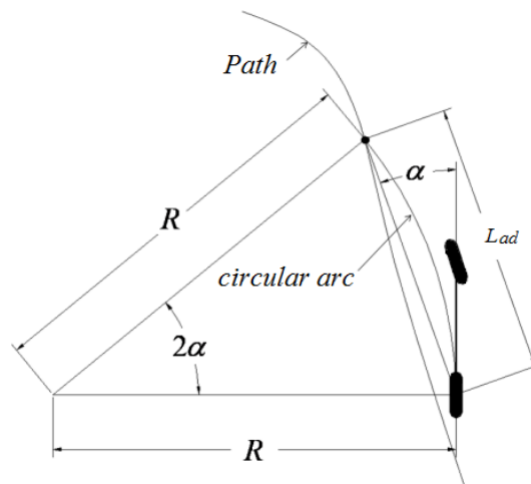


Figura 2.5: Representação do funcionamento do controlador Pure Pursuit (Chen et al., 2018).

A equação 2.6 pode ser derivada da figura 2.5.

$$R = \frac{l_d}{2 \sin \alpha} \quad (2.6)$$

Com isto é possível calcular o ângulo das rodas frontais, aplicando a equação 2.6 na equação 2.1:

$$\delta = \arctan\left(\frac{L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{2Le_y}{l_d^2}\right) \quad (2.7)$$

Na equação 2.7 é possível ver que o ângulo gerado para a direção do veículo varia em função da *look-ahead distance*, l_d , e do erro lateral, e_y .

A implementação deste controlador pode ser encontrada na literatura desde os anos 60, usado inicialmente para o controlo da trajetória de mísseis (Scharf et al., 1969). Wallace et al. (1985) foram os primeiros a aplicar este controlador num robô móvel, juntamente com um algoritmo de visão que mantinha o robô centrado no caminho. Um relatório técnico de Coulter (1992) descreveu detalhadamente a implementação deste controlador num veículo autónomo e enunciou as principais características deste método, cuja eficiência e fiabilidade são influenciadas pela *look-ahead distance*. Jianhui et al. (2018) propuseram, mais recentemente, uma estratégia de controlo baseada neste controlador, em que se analisou a influência do atraso de tempo do modelo cinemático do veículo para a previsão dinâmica.

Devido á sua popularidade, este controlador tem servido como referência para validar novos controladores propostos em novas investigações.

Como mencionado anteriormente, o principal desafio associado a este controlador é a escolha do parâmetro *look-ahead distance*, dado que é necessário obter um compromisso entre estabilidade e desempenho do algoritmo (Snider et al., 2009). Sob condições de baixa velocidade e estradas pouco sinuosas o controlador apresenta um bom desempenho. No entanto, quando a estrada possui grandes curvaturas e a velocidade é mais elevada, as características dinâmicas têm um impacto significativo no desempenho destes controladores. Com isto em mente, J. Yang et al. (2017) projetaram um controlador Stanley para lidar com o problema das curvas acentuadas.

Foram também propostas melhorias deste método, nomeadamente no ajuste dinâmico do parâmetro *look-ahead distance*. Para isso, Ollero et al. (1994) utilizaram redes *fuzzy* baseadas na curvatura da trajetória e na velocidade do veículo. Zhao et al. (2018) propuseram uma estratégia para o controlo adaptativo da distância *look-ahead*, baseada no algoritmo de otimização por enxame de partículas (*particle swarm optimization*). Raffo et al. (2009) desenvolveram um controlador preditivo não linear baseado em modelo (MPC em inglês), que apresentou um bom compromisso entre desempenho e custo computacional.

“Stanley” é um controlador geométrico usado num veículo autónomo desenvolvido pela universidade de Stanford que ganhou a segunda edição do DARPA Grand Challenge (Buehler et al., 2007). Esta abordagem de seguimento da trajetória consiste numa função de realimentação não linear do desvio lateral e do erro de orientação da trajetória e do veículo, medido do centro do eixo dianteiro até o ponto de trajetória mais próximo. Em (Vivek et al., 2019) é apresentado um controlador básico considerando estas duas propriedades, mostrado em 2.8.

$$\delta(t) = \psi(t) + \arctan\left(\frac{k \cdot e(t)}{v(t)}\right) \quad (2.8)$$

Aqui, ψ é o erro entre as orientações da trajetória e do veículo, e é o desvio lateral medido desde o centro do eixo frontal até ao ponto mais próximo da trajetória, v é a velocidade instantânea, δ é o ângulo das rodas em relação às coordenadas locais e k representa o ganho do desvio lateral, como é ilustrado na figura 2.6.

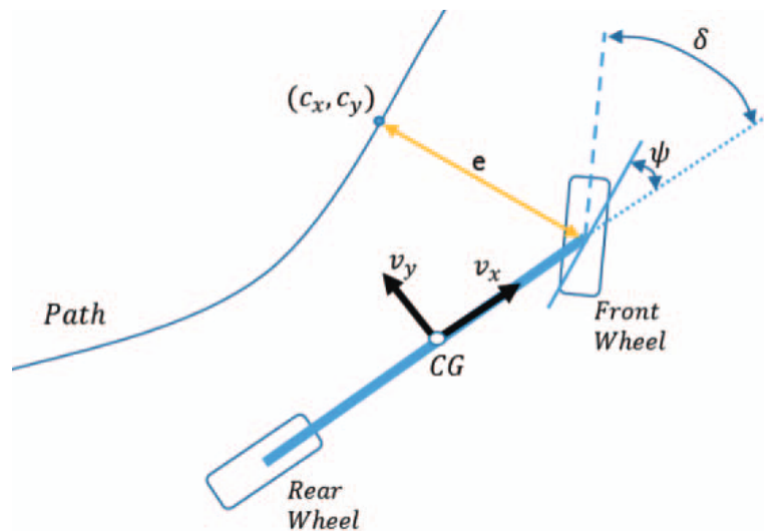


Figura 2.6: Representação do funcionamento do controlador Stanley (Cibooglu et al., 2017).

Este método pode ser encontrado em vários estudos, principalmente depois do seu sucesso na competição da DARPA. Zhu et al. (2016) propuseram uma melhoria a este método, baseada em programação dinâmica neuronal (*neural dynamic programming* em inglês), que consistia no ajuste adaptativo do parâmetro k tendo em conta a relação entre o estado atual do veículo e o caminho desejado. Hoffmann et al. (2007) implementaram uma versão mais robusta deste controlador, considerando a dinâmica do veículo. Deste modo, a equação de cálculo do ângulo das rodas frontais passou a incluir novas variáveis, nomeadamente o ângulo *yaw* em regime permanente relativo a uma trajetória de curvatura constante, ψ_{ss} , o erro entre as velocidades angulares de *yaw* do veículo, r , e da trajetória, r_{traj} , e um termo de correção da direção para compensar o atraso e o *overshoot* do seu atuador.

Dado que o controlador Stanley é puramente reativo, J. Yang et al. (2017) utilizaram a relação logarítmica entre a velocidade do veículo e o ponto mais próximo da trajetória para calcular a posição do ponto futuro da trajetória desejado. Com isso, o controlador usa esse ponto em vez do ponto mais próximo da trajetória para melhorar a eficiência do método Stanley. Snider et al. (2009) desenvolveram e compararam, em simulação, vários tipos de controladores, nomeadamente geométricos, cinemáticos e dinâmicos, bem como um controlador ótimo, em três diferentes percursos. O estudo concluiu que o controlo do método Stanley teve um desempenho melhor em comparação com os outros controladores, apesar da sua simplicidade.

Em suma, pode-se dizer que os controladores geométricos permitem controlar trajetórias com algoritmos menos complexos e poucas variáveis de estado. No entanto, este tipo de controladores negligencia os efeitos da dinâmica do veículo, o que é crucial em manobras com mudanças rápidas na direção do veículo.

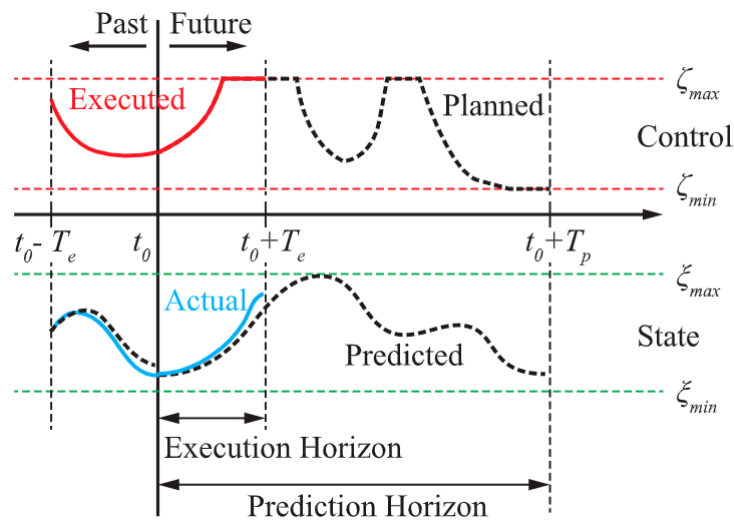


Figura 2.7: Princípio básico do MPC (Liu et al., 2018).

2.3.2 Controlador MPC

O controlador preditivo baseado em modelo (model predictive controller em inglês) é um poderoso controlador de feedback de estado que utiliza o modelo matemático do veículo para prever o seu estado futuro dentro de um horizonte limitado, chamado horizonte de previsão. Este método envolve processos de otimização de modo a encontrar o valor ideal para as entradas dos atuadores do veículo que satisfaçam os objetivos e restrições desejados (Kayacan et al., 2015). Os seus detalhes podem ser encontrados em (Liu et al., 2018) e estão ilustrados na figura 2.7.

O desenvolvimento e aplicação de controladores preditivos têm sido vastamente investigados devido ao aumento da disponibilidade de processadores mais rápidos, que podem lidar com algoritmos mais complexos. O desenvolvimento deste controlador para o controlo da trajetória pode ser encontrado em várias publicações. Uma das mais conhecidas é a de Ollero e Amidi (1991) que propõe um controlador preditivo generalizado para minimizar uma função de custo, que contém o erro entre os ângulos de rotação previsto e desejado das rodas direcionáveis. Os mesmos autores acabaram mesmo por implementar este método alguns anos mais tarde (Ollero et al., 1999). Liu et al. (2018) propuseram um método de controlo MPC com discretização do modelo de iteração variável, de forma a lidar com a dinâmica do deslizamento e inclinação dos veículos autónomos a velocidades altas.

Em (Falcone et al., 2007) foi implementado um controlo preditivo baseado em modelo para prever o ângulo de rotação ideal das rodas para que o veículo seguisse uma trajetória desejada e se desviasse dos obstáculos, usando sistemas de prototipagem rápida dSPACE. Estes sistemas de desenvolvimento flexíveis permitem desenvolver e otimizar controladores de uma forma prática (dSpace, s.d.). Dois modelos foram utilizados: um modelo não linear e um modelo linear variante no tempo. O controlador preditivo

baseado no modelo não linear usou um algoritmo de otimização não linear para minimizar a função de desempenho quadrática, enquanto que o controlador baseado num modelo linear variante no tempo usou o problema de otimização quadrática convexa. Simotwo et al. (2019) propuseram um controlador MPC adaptativo e utilizaram um modelo linear de planta, atualizado a cada iteração, para resolver um problema de otimização.

A elevada complexidade destes controladores exige elevados recursos computacionais, principalmente para a solução do problema de otimização em tempo real. Embora seja possível reduzir o horizonte ou o tempo de cálculo de cada iteração, de modo a diminuir o custo de processamento, a precisão e a confiança podem ficar comprometidas. Com vista a reduzir os custos de computação, Beal (2011) implementou um controlador preditivo baseado em modelo que podia resolver o problema de otimização e a implementação do controlador em menos de dois milissegundos. Além disso, foram utilizados métodos meta-heurísticos para resolver o problema de otimização do controlador. Merabti et al. (2016) implementaram três tipos de algoritmos de otimização meta-heurísticos para resolver o problema de otimização do controlador preditivo baseado em modelo não linear proposto para o controlo da trajetória de um robô móvel. Os algoritmos usados denominam-se otimização da colónia de formigas (*Ant Colony Optimization* em inglês), pesquisa gravitacional (*Gravitational Search Algorithm* em inglês) e otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* em inglês). O desempenho destes foi comparado e verificou-se que o último foi o melhor, pois convergiu mais rapidamente para a solução ideal usando menos recursos de computação. Assim sendo, um algoritmo de otimização meta-heurístico eficiente pode ser uma solução para a exigência computacional destes controladores.

A maioria dos estudos existentes na literatura utiliza uma função de custo fixa, que é inconsistente com as condições das estradas que variam no tempo. Além disso, uma função de custo fixa diminui o conforto do passageiro quando o veículo está longe da trajetória. Para moderar este fenómeno, X. Wang et al. (2018) propuseram uma função de custo adaptativa na estratégia para o problema de otimização.

2.3.3 Controlador LQR

O Regulador Quadrático Linear (*linear quadratic regulator* em inglês) é uma das mais populares teorias de controlo ótimo e a sua lei de controlo tem como base a realimentação linear do estado. Este controlador é fácil de projetar e demonstra um melhor desempenho que os controladores geométricos dado que consideram as dinâmicas do veículo. Este método é amplamente utilizado para o seguimento de trajetórias. A sua equação de controlo está descrita na equação 2.9.

$$\delta = k_1 y_e + k_2 \psi_e + \delta_d \quad (2.9)$$

Aqui, y_e representa o desvio lateral, ψ_e simboliza o erro entre as orientações e δ_d é o ângulo das rodas frontais desejado. k_1 e k_2 são ganhos que são calculados com recurso a uma função de custo, descrita na equação 2.10, onde u e y são a entrada e a saída, respetivamente, e Q e R representam os pesos.

$$J = \sum y(k)^T Q y(k) + u(k)^T R u(k) \quad (2.10)$$

Os métodos mais usados para derivar a lei de controlo podem ser encontrados em (Rajamani, 2012). Em (Sharp et al., 2000) são apresentados o modelo matemático e o controlador ótimo. Este controlador era baseado na teoria de controlo ótimo de previsão (*optimal preview control*) para sistemas lineares em tempo discreto, que amostra vários valores tais como os erros de previsão do trajeto, o erro de atitude e o erro lateral da posição e converte-os no ângulo de direção desejado. Este método foi demonstrado mais tarde pelo mesmo autor em (Sharp, 2005) num veículo autónomo e mostrou ter um desempenho excelente no seguimento da trajetória, apresentando robustez contra variações na dinâmica do veículo. Hu et al. (2015) analisaram a relação entre a orientação esperada e a orientação da trajetória e propuseram uma estratégia de controlo baseada na combinação da orientação e do ângulo de escorregamento das rodas frontais. Em (Zhang & Zhu, 2019) é apresentado um controlador LQR com base na deteção visual da estrada.

Os controladores ótimos podem fornecer uma estrutura simples, $u = -kx$, comparativamente a outros controladores, onde u é o sinal de controlo, k representa o ganho do controlador e x simboliza o vetor de estados do veículo. A determinação de k é feita na etapa de desenvolvimento do controlador. No entanto, podem existir controladores que fazem ajustes dos seus ganhos em tempo real. Os controladores ótimos são na sua generalidade desenvolvidos a partir de sistemas lineares, o que pode limitar a capacidade do controlador dentro das regiões de operação de linearidade.

2.3.4 Redes neuronais e fuzzy

Os controladores tradicionais requerem um conhecimento profundo do processo envolvido durante o seu projeto e afinação. Além disso, no caso de controladores baseados em modelo, os parâmetros físicos do sistema, bem como os seus modelos, precisam ser conhecidos antes de projetar um controlador adequado. Estes controladores também têm como desvantagem o facto de só funcionarem num determinado cenário

e não se adaptarem a condições variáveis, a não ser que sejam reajustados manualmente sempre que alguma condição se altere.

Recentemente, estratégias de controlo baseadas em aprendizagem têm ganho cada vez mais destaque pois não possuem as desvantagens referidas anteriormente. Estes controladores não requerem um conhecimento profundo do sistema a controlar e são mais fáceis de implementar. Embora o processo de aprendizagem seja computacionalmente bastante dispendioso, esta etapa pode ser realizada offline por uma única vez e, após isso, o modelo treinado pode ser incorporado na arquitetura do sistema do veículo autónomo para implementação em tempo real.

As redes neuronais e as redes *fuzzy* são usadas neste tipo de controladores devido à sua habilidade de fazer com que o controlador tome decisões rápidas. Os controladores inteligentes que usam estas duas abordagens podem ser classificados em dois tipos, nomeadamente supervisor e controlador. Nas implementações do tipo supervisor os algoritmos de tomada de decisão são usados para ajustar parâmetros seleccionados no controlador principal. Nas implementações do tipo controlador, o algoritmo é usado como sendo o controlador principal que decide como controlar o sistema do veículo. Esta classificação é espelhada nas figuras 2.8 e 2.9.

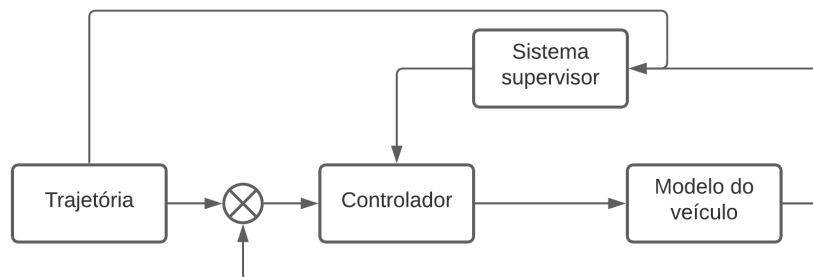


Figura 2.8: Diagrama de blocos de uma implementação do tipo supervisor. Realizado a partir de fonte (Amer et al., 2017).

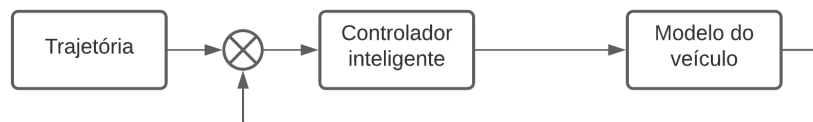


Figura 2.9: Diagrama de blocos de uma implementação do tipo controlador. Realizado a partir de fonte (Amer et al., 2017).

Uma implementação do tipo controlador pode ser vista em (Luo et al., 2016), que usa sistemas *fuzzy*. Este controlador calcula a velocidade desejada com base na distância entre o veículo e um ponto escolhido

na trajetória. No entanto, a maioria dos controladores inteligentes com redes neuronais ou redes *fuzzy* na literatura utilizam a implementação do tipo supervisor.

Ping et al. (2010) propuseram um controlador adaptativo realimentado pela velocidade angular de *yaw*, que utiliza um sistema *fuzzy*. Esta abordagem consistia em duas malhas de controlo. Uma delas utilizava um controlador PID para controlar o erro lateral e a outra aplicava um controlador proporcional para controlar a velocidade angular de *yaw*. Uma abordagem semelhante foi usada por X. Yang et al. (1998), que usa redes neuronais, aplicando um algoritmo inteligente para ajustar em tempo real os parâmetros para lidar com mudanças nas condições de operação.

Taghavifar (2019) propôs um método de compensação não linear baseado no modelo de uma rede neural autorregressiva para compensar as não linearidades do veículo.

Apesar dos controladores baseados em aprendizagem oferecerem uma solução robusta, o processo de os projetar e desenvolver pode ser uma tarefa complexa e trabalhosa pois necessitam de ser previamente treinados para tomarem decisões adequadas. Os algoritmos podem ainda ser programados para aprender continuamente ao longo do tempo, o que pode requerer maior poder computacional a bordo. Em suma, estas estratégias de controlo baseadas em aprendizagem parecem ser uma alternativa tentadora às tradicionais. No entanto, ainda há um longo caminho para atingir esse objetivo, pois estes controladores não são, ainda, confiáveis. Quando apresentados a um cenário nunca antes visto, eles podem gerar ações erráticas com base nos recursos aprendidos. (Sorniotti et al., 2017).

2.3.5 Controlador PID

O controlador PID é uma abordagem muito comum em aplicações industriais devido aos seus princípios e projeto simples. Consiste num mecanismo de realimentação em que o erro entre a resposta atual e a pretendida é usado para definir uma atuação na variável de controlo. Esta atuação é função de três termos (Proporcional, Integral e Derivativo) calculados em função do erro. Tem como vantagem não exigir conhecimento do modelo do sistema, o que o torna ainda mais popular. Tipicamente, o ângulo das rodas frontais pode ser calculado através da equação 2.11, em que δ representa o ângulo das rodas, y_d representa a posição lateral desejada, y simboliza a posição lateral atual e K_P , K_I e K_D , são os ganhos proporcional, integral e derivativo, respetivamente (Li et al., 2016).

$$\delta = K_P(y_d - y) + K_I \int (y_d - y) + K_D \frac{d(y_d - y)}{dt} \quad (2.11)$$

Entre os exemplos de utilização de controladores deste tipo (para controlo de trajetória) encontra-se o de Hoffmann et al. (2007), que aplicaram um controlador PI para determinar os níveis de acelerador e

travão para controlar a velocidade do veículo. O controlador PI mostrou ser vulnerável a vibrações e às bandas mortas dos atuadores (intervalos de valores da variável de atuação que não induzem nenhuma resposta no atuador). Estes problemas são resolvidos empregando o método de comutação, abordado em (Gerdes & Hedrick, 1999). Em (Park et al., 2015) foi proposta um controlador PID para determinar o ângulo das rodas do veículo, usando um algoritmo para compensar a banda morta do atuador e melhorar o desempenho e a estabilidade do controlador. Kanarat (2004) mostrou que veículos com controlador PID apresentam mau desempenho nos casos em que o veículo parte de estados iniciais diferentes. Com isso em mente, Abatari e Tafti (2013) apresentaram um controlador PID com recurso a sistemas *fuzzy*, usados para ajustar os ganhos PID, que mostrou uma melhor taxa de convergência a partir de qualquer estado inicial, em comparação a um PID convencional.

Este controlador é particularmente simples de ser implementado, mas a afinação dos seus parâmetros pode ser uma tarefa difícil. Para um sistema que varia rapidamente, como é o caso de um veículo, uma determinada configuração de parâmetros pode ser adequada dentro de uma certa região de operação mas desadequada fora dessa mesma região. Essa falta de robustez é geralmente resolvida através de uma regra adaptativa que ajusta automaticamente e em tempo real os parâmetros do controlador com base nas condições alteradas. Esta abordagem chama-se controlo PID adaptativo e pode ser visto em (Han et al., 2017) e (Al-Mayyahi et al., 2015). Han et al. (2017) propuseram um controlador PID adaptativo baseado em redes neuronais. Al-Mayyahi et al. (2015) apresentam um controlador cujos ganhos são ajustados por um algoritmo de optimização por enxame de partículas (PSO).

No entanto, as características lineares do controlador PID apresentam alguns problemas quando os seus ganhos são ajustados em tempo real. Consequentemente, ajustar os ganhos do controlador de forma automática e apropriada tornou-se a parte mais difícil e importante do projeto deste tipo de controladores (Nie et al., 2018). Muitos métodos foram propostos para tornar esse trabalho moroso mais fácil. Alguns dos métodos mais utilizados são a adição de sistemas *fuzzy*, implementado em (Abatari & Tafti, 2013), e o algoritmo de optimização por enxame de partículas, em (Al-Mayyahi et al., 2015).

2.3.6 Controlador SMC

Os controladores por modo deslizante (sliding mode controller em inglês) são métodos muito usados em sistemas de controlo não lineares devido à sua forte robustez face a incertezas nos parâmetros, perturbações externas, perturbações causadas por não linearidades e condições complexas de condução. Podem ainda ser integrados com outras estratégias de controlo, compensando as fraquezas de cada um (He et al., 2019). O “modo deslizante” refere-se ao movimento do sistema conforme ele desliza ao

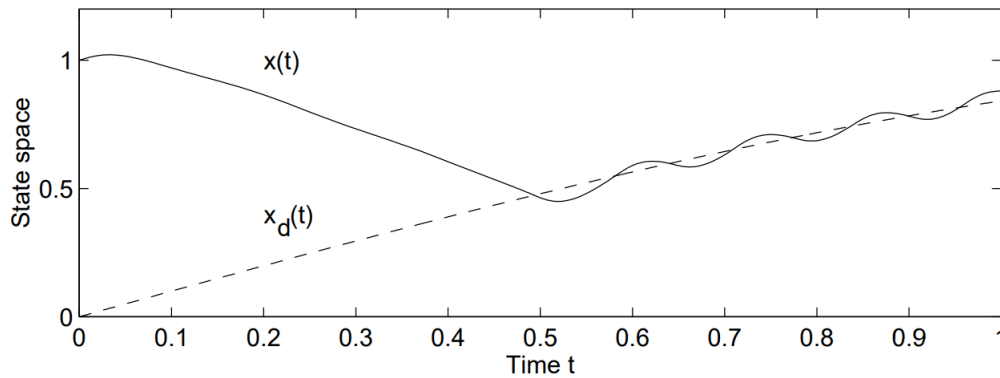


Figura 2.10: Efeito da comutação rápida (Guldner & Utkin, 2000).

longo dos limites da estrutura de controlo. A lei de controlo usa uma estratégia de comutação rápida de maneira a levar e manter a trajetória de estado do sistema nas superfícies deslizantes escolhidas (Liu et al., 2011), como pode ser visto na figura 2.10. Devido à comutação rápida, a oscilação do sinal de controlo é inevitável, o que, com o atraso e as imperfeições dos atuadores, pode provocar danos no sistema físico, perdas de energia e perturbações indesejadas (Khalil, 2002).

Este controlador encontra-se implementado em muitas pesquisas sobre controlo de trajetória de veículos autónomos. Os problemas causados pela sua comutação rápida e as soluções para eles propostas encontram-se endereçados nas seguintes publicações: J. Wang et al. (2008) propuseram uma função de saturação na lei de controlo, L. Guo et al. (2014) introduziram um algoritmo de comutação baseado em redes neuronais e, mais tarde, os mesmos autores, em (J. Guo et al., 2017), adicionaram uma técnica baseada na lógica *fuzzy*.

Apesar do controlador SMC ter um excelente desempenho no seguimento do caminho, é um desafio utilizá-lo em veículos autónomos dado que o método de linearização precisa fazer com que as variáveis controladas se mantenham sempre próximas às de referência (Martin et al., 2013). Além disso, este controlador induz geralmente acelerações laterais consideráveis (Cao et al., 2017).

Como foi visto, o controlo longitudinal e lateral é particularmente importante para assegurar que uma trajetória é, de facto, seguida e a velocidade é controlada. Isto minimizará os erros da orientação e do desvio lateral, estes que são os principais objetivos de um controlador de trajetória. Rupp e Stolz (2017) implementaram cinco controladores diferentes: Stanley, LQR, SMC, Fuzzy e MPC. Os resultados da simulação e comparação de cada um deles na realização de uma ultrapassagem a 120 km/h mostraram que o controlador MPC apresentou um comportamento suave, com os menores erros de desvio lateral e orientação.

Apesar do planeamento da trajetória poder ser capaz de fornecer ao controlador uma trajetória suave para o veículo autónomo seguir, desenvolver um controlador que não se baseie apenas nessa trajetória

fornecida é um desafio desta área para tornar o controlador mais resistente a possíveis erros e falhas. Um dos mais importantes desafios nesta etapa é dotar o controlador com a capacidade de navegar nas condições mais adversas, nomeadamente em curvas fechadas e em vários tipos de estradas com diferentes condições de trânsito. Os controladores mais simples são altamente dependentes da variação dos seus parâmetros. Por outro lado, os controladores adaptativos oferecem boa adaptabilidade a diferentes estradas e manobras, mas são normalmente mais exigentes computacionalmente. Posto isto, o desafio prende-se em encontrar uma solução que alie bom desempenho e baixo esforço.

Todos os controladores discutidos acima foram validados em ambientes bem controlados onde as variações de parâmetros do sistema e as incertezas dos fatores externos são reduzidos ao mínimo. O método de seleção da estratégia de controlo é baseado nos requisitos do sistema e nas propriedades das variáveis de estado que devem ser controladas.

2.4 Aceitação da tecnologia autónoma pelos utilizadores

Os veículos autónomos têm como objetivo principal substituir, pelo menos parcialmente, a função do condutor. Posto isto, a experiência de utilização de um veículo mudará drasticamente. No entanto, apesar de ser esperado que os veículos autónomos tragam um conjunto considerável de vantagens para a sociedade em geral, esta tecnologia vem, naturalmente, acompanhada de alguns inconvenientes não intencionais previstos que necessitam de serem abordados.

A inserção de tecnologia autónoma nos transportes é uma questão complexa, que gera potenciais preocupações (Kelkel, 2015; Koopman & Wagner, 2017; Sadvandi & Halkias, 2019), tais como:

- Eliminação de postos de trabalho;
- Dilemas éticos;
- Riscos para acidentes específicos;
- Falhas no sistema;
- Violação de informações pessoais;
- Problemas legais;
- Violação do seu sistema de segurança.

Deste modo, não se sabe ainda se as pessoas aceitarão e utilizarão os veículos autónomos intensivamente no futuro. Vários estudos foram conduzidos nos últimos anos sobre a aceitação de veículos autónomos para ajudar a entender melhor os receios dos utilizadores e aperfeiçoar a tecnologia, aumentando assim a sua aceitação.

Um estudo conduzido por Hulse et al. (2018) analisa a perceção dos utilizadores, classificando-os em várias categorias demográficas, tais como idade e género. É demonstrado que os jovens do género masculino têm uma maior apetência em aceitar novas tecnologias, dado que se considera que eles são mais abertos a correrem riscos.

Noutro estudo, levado a cabo por Kyriakidis et al. (2015), revela que os indivíduos do género masculino costumam preocupar-se menos com falhas no sistema do que as mulheres, no entanto são mais propensos a desconfiarem das possíveis questões de responsabilidade.

As pessoas com uma idade mais avançada tendem a interessar-se menos por veículos autónomos dado que estão menos dispostas a aprender a usá-los devido a questões de falta confiança (Bansal &

Kockelman, 2017). Em relação às pessoas que possuem maiores rendimentos, estas tendem a preocupar-se mais com as questões de responsabilidade do que com as questões de controlo (Daziano et al., 2017) e estão, naturalmente, mais dispostas a pagar o preço extra de um carro com tecnologia autónoma do que indivíduos com rendimentos mais limitados (Kyriakidis et al., 2015). Kyriakidis e colegas também referem que as pessoas mais ambientadas com sistemas de *cruise control* nos seus carros são mais propensas a aceitar veículos autónomos pois têm mais confiança nos recursos de condução automatizada.

Alguns estudos abordam também os aspetos psicológicos dos utilizadores para determinar o nível de aceitação de veículos autónomos. Um deles é a busca por sensações, nomeadamente adrenalina, associada normalmente a uma condução mais arriscada e veloz. Este grupo de pessoas oferece mais resistência à aceitação de veículos autónomos, dado que, ao abdicar do controlo do carro, perdem as sensações que lhes eram transmitidas pelos carros tradicionais, para além do facto de os veículos autónomos tenderem a praticar uma condução bastante segura (Cho et al., 2017). Neste último estudo também é investigada a relação entre a experiência do utilizador e os níveis da classificação de autonomia (SAE International, 2018). Constatou-se que, quanto maior o nível de autonomia de um veículo, menor é a experiência de utilização e a aceitação do utilizador.

Basu et al. (2017) propuseram a hipótese de que, quando conduzidos por um veículo autónomo, os utilizadores preferem um estilo de condução significativamente mais defensivo do que aquele que eles têm quando conduzem, uma vez que a experiência de ser passageiro é diferente da de ser condutor. De maneira a testá-la realizou um estudo num simulador que submeteu 15 participantes a quatro estilos de condução diferentes: o deles próprios, um defensivo, um agressivo e um estilo de condução de outro participante. Durante as experiências os participantes não tinham conhecimento do estilo de condução usado em cada momento. Quando perguntados sobre qual dos quatro estilos seria mais parecido com o deles, 80% dos participantes indicaram um estilo que eram mais defensivo em relação ao seu próprio. Foi também percebido que a maioria preferiu esse mesmo estilo de condução. Isto levou a crer que os utilizadores não querem que os veículos autónomos conduzam como eles conduzem, mas sim como eles imaginam que conduzem. Além disto, também concluíram que os participantes preferiram estilos de condução diferentes consoante a tarefa a realizar pelo veículo.

Um teste conduzido por Sheng et al. (2021), com 18 utilizadores conduzidos por um veículo autónomo com um estilo de condução defensivo e agressivo, mostra que os utilizadores confiam mais na condução defensiva do que na agressiva, devido à sua maior previsibilidade. No entanto, embora em minoria, alguns participantes indicaram que se sentiram mais confiantes quando o veículo autónomo assumiu uma condução mais agressiva.

2.5 Sistema dinâmico

Um sistema dinâmico é um sistema cujo estado evolui ao longo do tempo, seguindo uma regra bem definida, e é dependente de instantes de tempo anteriores. Dito isto, compreende-se que um sistema dinâmico é composto por duas partes: um vetor de estado e uma regra.

O vetor de estado é o conjunto dos valores que descrevem totalmente o estado do sistema num determinado instante de tempo. O número de elementos constituintes deste vetor é proporcional à complexidade do sistema.

A segunda parte de um sistema dinâmico é a regra que define como o vetor de estado evoluirá com o tempo. A regra consiste numa função que recebe o estado atual do sistema e, com isso, dita qual será o seu estado no próximo instante de tempo, ou seja dita como evoluirá o estado do sistema ao longo do tempo.

A evolução de um sistema dinâmico pode ser em tempo discreto ou em tempo contínuo. No primeiro caso, o sistema é modelado por equações de diferenças e aplica-se quando os estados variam em instantes isolados. No segundo caso, o sistema é modelado por equações diferenciais, sendo utilizadas em situações que variam continuamente ao longo do tempo (Scheinerman, 2012).

Os sistemas dinâmicos podem ser agrupados em duas categorias: lineares e não lineares. Esta dissertação apenas se focará na segunda categoria, dado que é a base dos algoritmos de controlo a desenvolver.

2.5.1 Sistema dinâmico não linear

Por definição, um sistema é não linear quando a variação resultante na saída não é proporcional à variação aplicada na entrada. No caso dos sistemas dinâmicos, estes são considerados não lineares se pelo menos uma das funções que define o comportamento do sistema é não linear. Por serem mais abundantes, este tipo de sistemas é alvo de grande interesse e estudo em diversas áreas.

As funções não lineares são mais complexas que as funções lineares e, muitas vezes, não permitem uma análise analítica. Além disso, os comportamentos que este tipo de sistemas pode adotar são, em termos práticos, quase ilimitados. Como se torna difícil encontrar soluções exatas para estas funções, é necessário encontrar uma outra maneira de as analisar.

Uma das abordagens passa por tentar linearizar o sistema em torno do ponto nominal de operação, de modo a que se possam aplicar posteriormente as ferramentas matemáticas para a análise de sistemas lineares. No entanto, esta técnica apresenta algumas limitações, nomeadamente, o facto de a linearização em torno de um determinado ponto de operação apenas permitir prever o comportamento do sistema

não linear na vizinhança do mesmo e, ainda, o facto de existir riqueza e complexidade num sistema não linear que não se podem descrever a partir de modelos lineares.

Outro método muito comum passa por efetuar uma análise ao comportamento qualitativo dos sistemas dinâmicos não lineares, em vez de tentar encontrar soluções exatas, o que muitas vezes se torna incomportável e, por vezes, impossível. A teoria qualitativa de sistemas dinâmicos, introduzida por *Poincaré* nos finais do século XIX, tornou possível identificar determinantes do seu comportamento, como por exemplo, os seus pontos de equilíbrio, a sua evolução face a perturbações no seu estado e o seu estado final, quando o tempo tende para infinito, tendo em conta as condições iniciais (Strogatz, 1994).

Um ponto de equilíbrio consiste num estado fixo do sistema dinâmico, isto é, um estado em que o sistema não varia no tempo pois encontra-se em equilíbrio. Para encontrar os pontos de equilíbrio do sistema deve-se encontrar os zeros da derivada da função regra do sistema.

Porém, o facto do sistema estar em equilíbrio não significa que esse estado seja estável. Existem três tipos de estabilidade: se após uma perturbação o estado do sistema voltar a convergir para o ponto de equilíbrio, então o ponto de equilíbrio é assintoticamente estável, também chamado de atrator; se após uma perturbação o estado do sistema não converge nem diverge, então esse ponto de equilíbrio diz-se marginalmente estável; se após uma perturbação o estado do sistema afastar-se/divergir do ponto de equilíbrio então este é instável, também denominado repulsor. Matematicamente, a análise da estabilidade dos pontos de equilíbrio de um sistema dinâmico não linear é feita calculando a segunda derivada da função regra do sistema dinâmico nos pontos de equilíbrio: se o resultado for um valor negativo, o ponto de equilíbrio é assintoticamente estável; se o resultado for positivo, o ponto de equilíbrio é instável; se o resultado for nulo, o ponto de equilíbrio é marginalmente estável.

A rapidez com que o estado do sistema converge para, ou diverge do, ponto de equilíbrio depende do valor absoluto da constante de tempo. Quanto menor for esse valor, mais rapidamente o sistema reage, e vice-versa (Scheinerman, 2012).

Também é possível compreender o comportamento de um sistema dinâmico através da sua representação e análise gráfica.

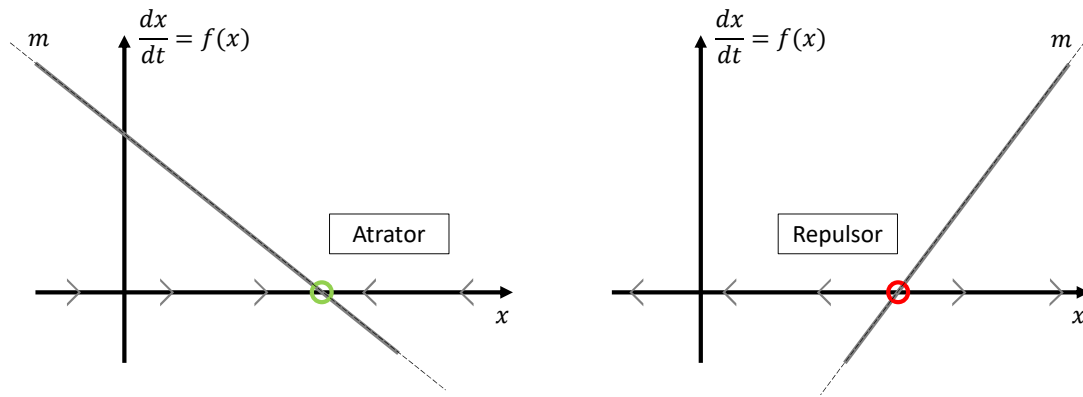


Figura 2.11: Representação gráfica de dois exemplos de sistemas dinâmicos. As setas indicam o sentido da progressão do valor de x à medida que o tempo evolui.

Como é observável na figura 2.11, o sistema dinâmico representado à esquerda possui apenas um ponto de equilíbrio, assinalado com uma bola verde, pois é o único ponto em que intersepta o eixo das abcissas. Esse ponto de equilíbrio é assintoticamente estável, dado que o declive, m , da função nesse ponto é negativo. Seja x_0 a condição inicial de x . Se x_0 estiver à esquerda do ponto de equilíbrio, o valor de x irá aumentar até convergir com o ponto de equilíbrio. Pelo contrário, se x_0 estiver à direita do ponto de equilíbrio, o valor de x irá diminuir até convergir com o ponto de equilíbrio. Como, qualquer que seja a condição inicial, x é sempre atraído pelo ponto de equilíbrio, este é denominado de atrator. Quanto mais negativo foi o valor m , maior será a rapidez de convergência para o atrator, qualquer que seja a condição inicial de x .

À direita encontra-se representado outro sistema dinâmico que, também, apenas possui um ponto de equilíbrio, assinalado com uma bola vermelha. Esse ponto de equilíbrio é instável, dado que o declive, m , da função nesse ponto é positivo. Se x_0 estiver à esquerda do ponto de equilíbrio, o valor de x irá diminuir, afastando-se do ponto de equilíbrio. Pelo contrário, se x_0 estiver à direita do ponto de equilíbrio, o valor de x irá aumentar, afastando-se do ponto de equilíbrio. Como, qualquer que seja a condição inicial, x diverge sempre do ponto de equilíbrio, este é denominado de repulsor. Quanto mais positivo foi o valor m , maior será a rapidez de divergência do repulsor, qualquer que seja a condição inicial de x .

É com base na teoria qualitativa de sistemas dinâmicos que irão ser desenvolvidas, analisadas e implementadas as propostas para os sistemas dinâmicos não lineares responsáveis pelo controlo longitudinal e lateral para veículos autónomos, um dos objetivos desta dissertação.

2.5.2 O uso de sistemas dinâmicos no controlo de um veículo autónomo

Na tarefa de condução autónoma, o veículo deve ser capaz de manter uma determinada velocidade e seguir a orientação da estrada sem se afastar dela.

Bicho (1999) demonstrou um robô autônomo, equipado com sete sensores de infravermelhos e cinco microfones, capaz de se desviar de obstáculos detetados pelos sensores de infravermelhos e alcançar alvos definidos através de fontes de som captadas pelos microfones. O comportamento do robô é gerado com recurso a sistemas dinâmicos não lineares.

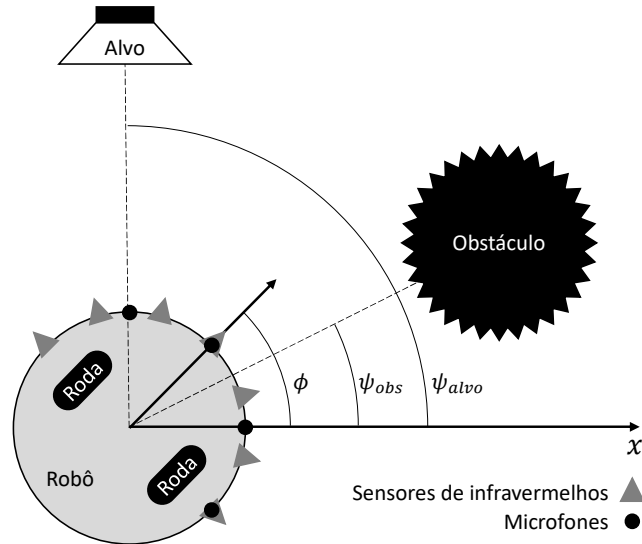


Figura 2.12: Representação gráfica da forma como o robô ‘vê’ o ambiente circundante. Realizado a partir de fonte (Bicho, 1999).

Na figura 2.12 está representada a variável comportamental do sistema. A orientação do robô, em relação a um referencial fixo no mundo, está representada por ϕ . As variáveis ψ_{alvo} e ψ_{obs} identificam as orientações do alvo e do obstáculo, vistos a partir da posição do robô. O robô deve seguir a orientação do alvo e afastar-se da orientação do obstáculo. O comportamento é gerado fornecendo continuamente valores para a orientação do veículo. A série temporal destes valores é obtida a partir das soluções de um sistema dinâmico, representado na equação 2.12.

$$\frac{d\phi}{dt} = f_{obs}(\phi) + f_{alvo}(\phi) \quad (2.12)$$

A componente do sistema dinâmico responsável pelo desvio do robô dos obstáculos, f_{obs} , é uma força com um repulsor na orientação em que um obstáculo é detetado, ψ_{obs} . A equação 2.13 representa essa componente do sistema dinâmico. Nela, λ_i representa a magnitude de repulsão da contribuição de cada um dos sensores e σ_i diz a gama angular sobre a qual uma força repulsiva exerce o seu efeito. Cada sensor de infravermelhos contribui com uma força com um repulsor centrado na direção para o qual aponta, $\psi_{obs,i}$, tal como é mostrado na figura 2.13.

$$f_{obs} = \sum_{i=1}^7 f_{obs,i} = \sum_{i=1}^7 \lambda_i (\phi - \psi_{obs,i}) e^{-\frac{(\phi - \psi_{obs,i})^2}{2\sigma_i^2}} \quad (2.13)$$

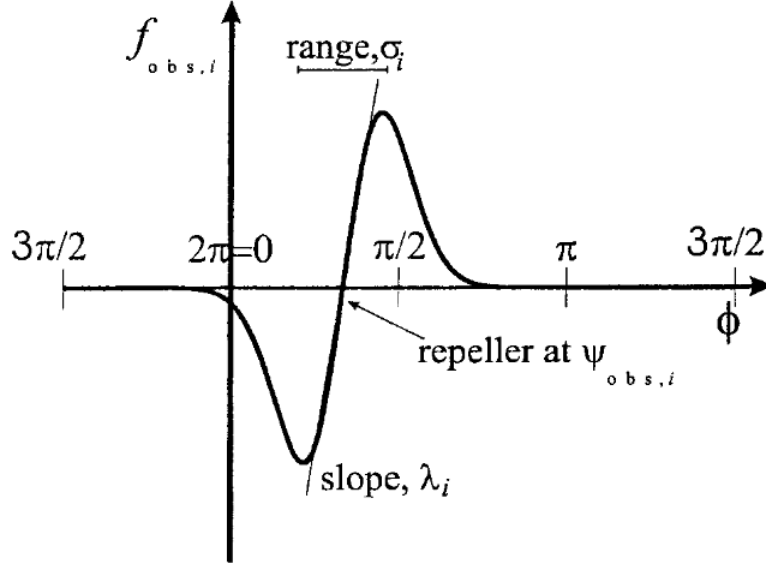


Figura 2.13: Contribuição de cada sensor para o desvio dos obstáculos (Bicho, 1999).

A componente do sistema dinâmico responsável pela movimentação em direção ao alvo, f_{alvo} , é uma força com um atrator na orientação do alvo, ψ_{alvo} . A equação 2.14 representa essa componente do sistema dinâmico. Nela, λ_{alvo} representa a magnitude de atração do atrator. A figura 2.14 encontra-se representada essa componente.

$$f_{alvo} = \begin{cases} -\lambda_{alvo}(\phi - \psi_{alvo}), & \text{se } \psi_{alvo} - \frac{\pi}{2} < \phi \leq \psi_{alvo} + \frac{\pi}{2} \\ \lambda_{alvo}(\phi - \psi_{alvo} - \pi), & \text{se } \psi_{alvo} + \frac{\pi}{2} < \phi \leq \psi_{alvo} + \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (2.14)$$

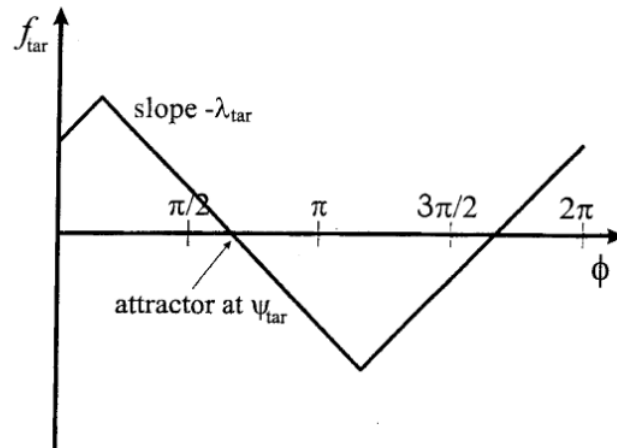


Figura 2.14: Contribuição da componente responsável pelo movimento em direção a um alvo (Bicho, 1999).

Monteiro e Bicho (2002) usaram sistemas dinâmicos não lineares para projetar uma arquitetura de controlo para navegação autónoma em formação de uma equipa de três robôs. Os robôs mostraram capacidade para navegar numa formação triangular e, ao mesmo tempo, desviarem-se dos obstáculos.

Louro et al. (2019) desenvolveram um empilhador autónomo para aplicações em ambiente industrial partilhado com pessoas, com foco nas manobras de recolha e entrega de paletes. O sistema de navegação autónoma implementado no empilhador era semelhante ao descrito acima. Uma característica desta implementação é que, durante a navegação propriamente dita, a orientação alvo era a orientação da parede mais próxima, de modo a que o empilhador navegasse paralelamente a ela. Para manter um determinado afastamento da parede, são utilizadas duas componentes: uma para afastá-lo da parede e outra para o aproximar. A soma das duas permite uma convergência para uma determinada distância da parede. O projeto desenvolvido nesta dissertação tem por base alguns dos conceitos usados neste artigo.

Nesta dissertação são utilizados dois sistemas dinâmicos: um responsável por calcular a aceleração longitudinal do veículo, cujo ponto fixo será a velocidade que se pretende que o veículo siga; e outro encarregue de determinar a velocidade angular da sua orientação, cujo ponto fixo será a orientação do veículo que o faz seguir a estrada, sem se afastar do seu centro.

A título de exemplo, nas figuras 2.15 e 2.16, estão representados o sistema dinâmico usado para controlar a aceleração longitudinal do veículo e o retrato de fase do sistema, respetivamente.

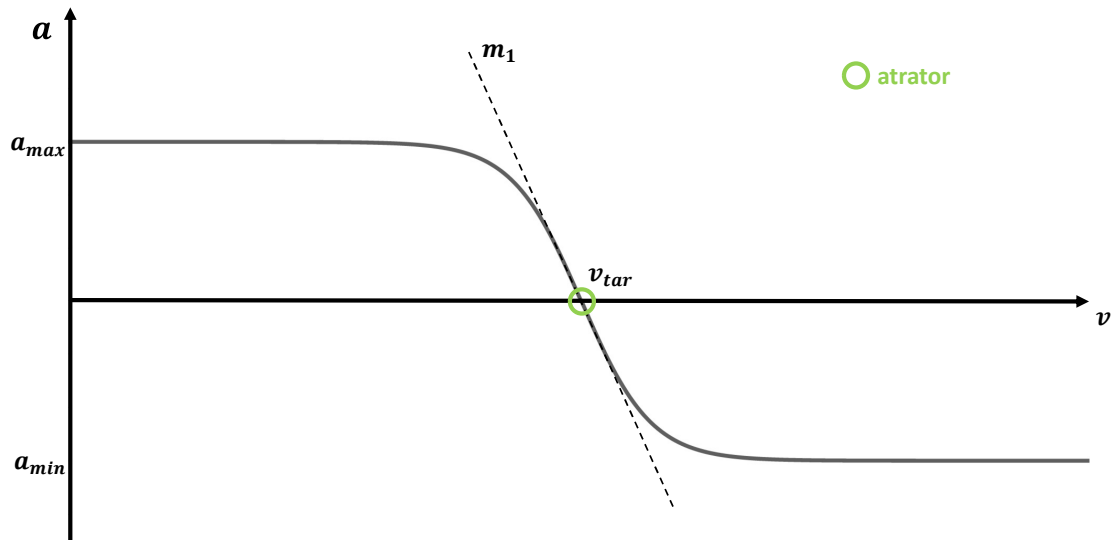


Figura 2.15: Representação gráfica do sistema dinâmico do controlador longitudinal, para $\lambda > 0$.

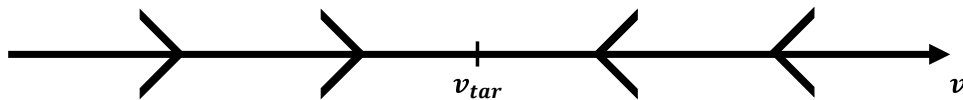


Figura 2.16: Retrato de fase do sistema dinâmico do controlador longitudinal.

Como pode ver-se, existe um atrator colocado no valor da velocidade pretendida, v_{tar} , que atrairá a velocidade do veículo para o seu valor. A rapidez com que a convergência acontece é ditada pelo valor do declive da função no ponto de equilíbrio, m_1 . As regras de controlo desenvolvidas para estes controladores, bem como os pressupostos em que elas se baseiam, são apresentadas na secção 3.2.

2.6 Discussão do estado da arte

A tecnologia de condução autónoma evoluiu muito desde as primeiras implementações na década de 80. Com iniciativas de algumas agências promotoras da investigação e do desenvolvimento, como a DARPA, foi possível cativar o interesse de mais empresas e avançar mais rapidamente.

Esta revisão de literatura abordou o estado da arte sobre o controlo da trajetória deste tipo de veículos, cobrindo as etapas de modelação do veículo e de desenvolvimento e implementação da estratégias de controlo frequentemente utilizadas.

Na modelação do veículo analisaram-se três classes de modelos. Verificou-se que os modelos mais simples não tinham em conta os comportamentos dinâmicos do veículo. No entanto, os modelos mais completos tinham a desvantagem de necessitarem de maiores recursos de computação.

No que toca ao desenvolvimento e implementação do controlador, na maioria dos estudos citados, foram desenvolvidos controladores do tipo geométrico devido à facilidade da sua configuração e implementação. Contudo, estes requerem um ajuste específico dos seus parâmetros para o modelo do veículo utilizado, o que os torna menos robustos. Observou-se que os controlador MPC podem ser as melhores alternativas, mas implicam algoritmos mais complexos e exigentes. Isto abre caminho à introdução dos controladores baseados em sistemas dinâmicos não lineares, pois são algoritmos que aliam uma baixa necessidade de recursos computacionais e a implementação de comportamentos eficientes e inteligentes. Este tipo de abordagem foi ainda pouco explorado na área da condução autónoma, embora sejam utilizados com frequência no conceito da robótica, lacuna que este projeto pretende explorar.

Sendo que o ideal neste módulo de controlo é fazer com que o veículo autónomo consiga navegar nas condições mais desafiantes e transmitir, em todas elas, uma sensação de robustez e confiança aos seus utilizadores, é necessário encontrar algoritmos que consigam aliar estas duas capacidades. Esta revisão de literatura abordou também os estudos realizados sobre a aceitação desta tecnologia pelos utilizadores, detalhando os fatores que mais influenciam a adoção de veículos autónomos. A adesão do público a esta nova solução pode ser o principal entrave à sua difusão. Foi referido que a perda do prazer de condução, a abdicação do controlo e a falta de confiança nestes veículos são os grandes determinantes para o seu acolhimento. Deste modo, é essencial que os algoritmos de controlo consigam também ajustar o estilo de condução do veículo, permitindo devolver algum controlo ao utilizador e ajudar à sua aceitação.

Os principais contributos desta revisão são a descrição e análise do estado atual da tecnologia de condução autónoma, nomeadamente no que ao módulo de controlo diz respeito, demonstrando ao mesmo tempo as etapas necessárias do seu desenvolvimento; e apresentar e discutir a extensão da pesquisa sobre os fatores que afetam a aceitação de soluções de condução autónoma por parte das pessoas.

Concluindo, os carros autónomos são, provavelmente, os sistemas inteligentes mais avançados desenvolvidos até hoje. No entanto, ainda existe um longo caminho a percorrer para ser possível alcançar o nível máximo da classificação de autonomia e para anular os principais fatores que afetam a aceitação dos utilizadores.

Desenvolvimento

3.1 Parametrização do estilo de condução

A confiabilidade de um sistema de automação influencia significativamente a experiência do utilizador e é um determinante da aceitação. Um veículo autónomo, sendo categorizado como um sistema de automação, está também dependente da confiança dos utilizadores.

A confiança é um fenómeno complexo. Vários são os fatores, ligados à mobilidade autónoma, que a influenciam diretamente. Esta secção irá focar-se na relação entre a confiança nos sistemas de condução autónoma e o estilo de condução de um veículo autónomo.

Na interação com um veículo autónomo, a confiança de uma pessoa é afetada pelo desempenho do veículo (Lazanyi & Maraczi, 2017), principalmente no que toca à sua:

- **Competência:** cumprimento dos padrões de desempenho;
- **Previsibilidade:** alcance das expectativas do utilizador;
- **Fiabilidade:** consistência do seu desempenho.

O estilo de condução refere-se ao comportamento do veículo durante a tarefa da condução e tem especial influência na sua previsibilidade. Esse estilo normalmente é classificado numa dimensão que tem o “defensivo” num extremo e o “agressivo” no outro. Uma condução defensiva categoriza-se, por exemplo, por acelerações e desacelerações mais suaves, manutenção de uma maior distância de segurança, velocidades mais reduzidas e transições de faixa mais suaves. Uma condução agressiva categoriza-se pelo oposto.

Tabela 3.1: Parâmetros que afetam o estilo de condução e de ultrapassagem do veículo autónomo.

Tarefa	Parâmetro	Descrição
Condução	Distância de segurança	Distância recomendada a manter em relação ao veículo da frente de modo a ser possível imobilizar o veículo sem risco de acidente
	Rapidez de convergência para a distância de segurança	Rapidez com que o veículo se aproxima da distância de segurança quando surge um veículo à frente relativamente próximo
	Magnitude de convergência para a velocidade desejada	Rapidez com que a velocidade do veículo converge para outro valor de velocidade
	Aceleração lateral máxima absoluta desejada	Valor máximo desejado para a aceleração lateral
	Aceleração longitudinal máxima absoluta desejada	Valor máximo desejado para a aceleração longitudinal
	Distância entre os pontos de cálculo da orientação da trajetória	Manutenção no centro da faixa de rodagem
Ultrapassagem	Distância mínima em relação aos veículos traseiros	Distância em relação aos veículos traseiros a partir da qual o veículo pode iniciar ou finalizar uma ultrapassagem
	Distância mínima em relação aos veículos frontais	Distância em relação aos veículos frontais a partir da qual o veículo pode iniciar uma ultrapassagem
	Suavidade de transição de faixa	Suavidade com que o veículo realiza a transição de faixa de rodagem

Apesar da maioria das pessoas optar por confiar mais num estilo de condução mais defensivo (Sheng et al., 2021), é importante realçar que essa opção pode variar consoante o seu estado físico e emocional no momento.

Com isto em mente, de forma a tornar a experiência de condução autónoma agradável e confiável a qualquer tipo de utilizador, pretende-se tornar estes veículos capazes de adaptar o seu estilo de condução às preferências dos seus utilizadores. Para isso é essencial encontrar os parâmetros caracterizadores do estilo de condução do veículo. Na tabela 3.1 propõe-se uma lista desses parâmetros.

De modo a definir os parâmetros encontrados, irão ser usadas duas variáveis discretas. A primeira - $estilo_{cond}$ - será responsável pelo ajuste dos parâmetros que afetam o estilo de condução do veículo e a segunda - $estilo_{ultr}$ - estará encarregue do ajuste dos parâmetros relativos ao estilo de ultrapassagem. As duas poderão assumir apenas valores do conjunto $\{0; 0.25; 0.5; 0.75; 1\}$, que varia desde 0, um comportamento mais defensivo, até 1, um comportamento mais agressivo. A figura 3.1 ilustra as duas variáveis. No âmbito desta dissertação, os valores dos dois estilos são mantidos iguais entre si.

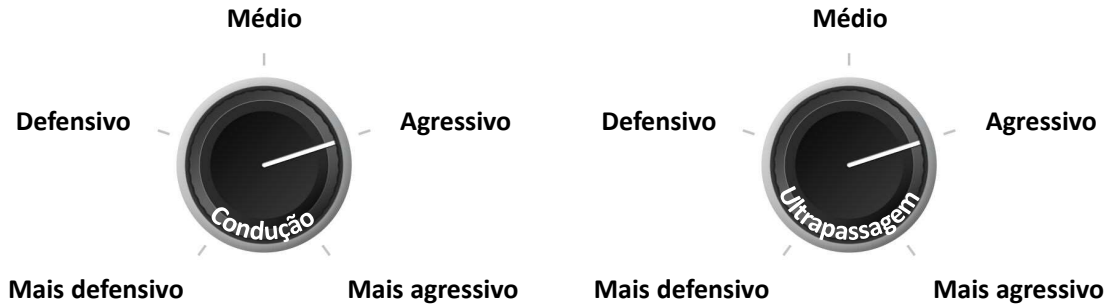


Figura 3.1: Variáveis de seleção do comportamento do veículo.

A análise em seguida explica em detalhe a função de cada um dos parâmetros e o seu efeito no comportamento do veículo.

3.1.1 Distância de segurança

O parâmetro d_{seg} dita a distância mínima a que o veículo autónomo deve permanecer atrás de outros veículos que circulem na mesma faixa de rodagem, de modo a que ele, na eventualidade de uma paragem súbita do veículo da frente, tenha espaço suficiente para se conseguir imobilizar completamente sem embater.

A distância de segurança é ditada pelo conjunto de equações 3.1.

$$\begin{aligned}
 a_{long\ min} &= -2 - 2 \cdot estilo_{cond} \\
 t_{stop} &= -\frac{v}{a_{long\ min}} \\
 d_{seg} &= v \cdot t_{stop} + \frac{a_{long\ min}}{2} \cdot t_{stop}^2 + 2
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Aqui, $a_{long\ min}$ representa a aceleração longitudinal mínima, t_{stop} é o tempo necessário para o veículo parar, v é a velocidade do veículo e d_{seg} representa a distância de segurança. A aceleração longitudinal mínima aceita uma gama de valores que varia dentro do intervalo $[-4, -2]m/s^2$ (Svensson & Eriksson, 2015). O valor 2 é adicionado à equação d_{seg} para que, quando a velocidade do veículo seja zero, este mantenha uma distância mínima de 2 metros relativamente ao veículo da frente.

Como se pode ver, o estilo de condução escolhido afeta a desaceleração máxima do veículo. Por sua vez, esta última terá consequências no tempo que o veículo demorará a parar e, consequentemente, na distância que percorrerá nesse tempo.

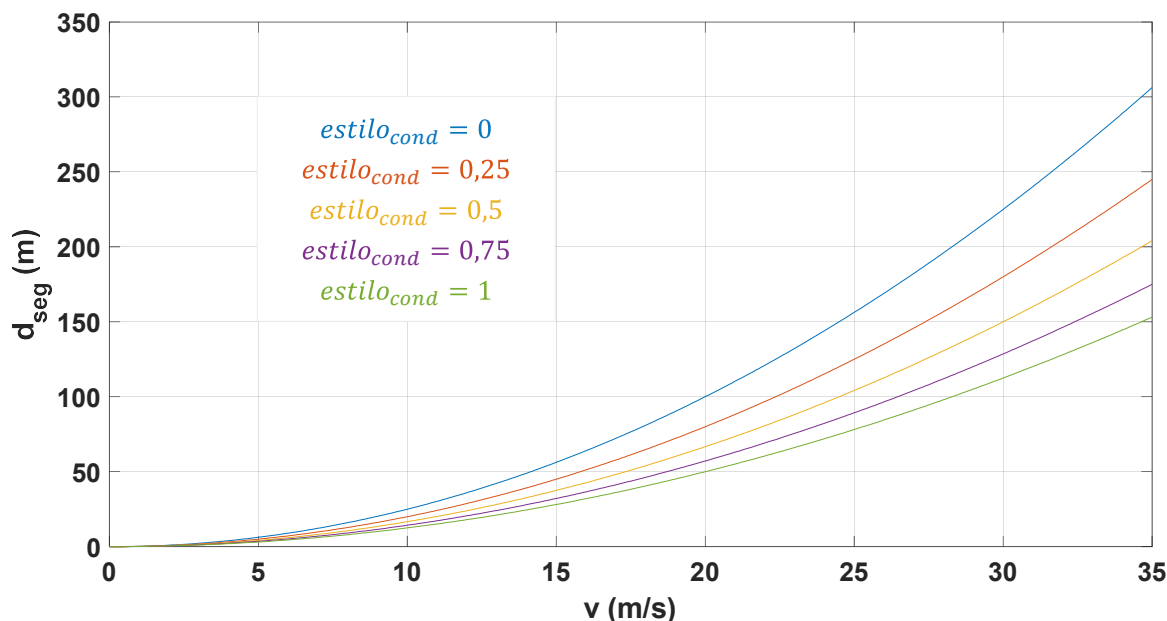


Figura 3.2: Gráfico da variação da distância de segurança em função da velocidade do veículo.

Na figura 3.2 pode-se ver que, quanto mais defensivo é o estilo de condução pretendido, maior é a distância de segurança e vice-versa. Este é o comportamento pretendido uma vez que uma condução segura incentiva a guardar uma maior distância, enquanto que numa condução mais agressiva existe a tendência em se circular mais próximo do veículo da frente.

3.1.2 Convergência para a distância de segurança

O parâmetro k_{dist} afeta o momento e a intensidade da travagem na situação em que se aproxima um veículo à frente. Um valor mais baixo provocará uma diminuição mais atempada e gradual da velocidade do veículo autónomo, até que esta seja igual à do veículo da frente. Um valor mais alto provocará uma diminuição mais tardia e brusca.

Dito isto, torna-se evidente que o valor de k_{dist} deve subir com o aumento da agressividade do estilo de condução.

$$k_{dist} = 0.3 + 0.5 \cdot estilo_{cond} \quad (3.2)$$

$$v_{seg} = k_{dist} \cdot d_{ef} + v_{cf}$$

Aqui, v_{seg} representa a velocidade de segurança que faz com que o veículo mantenha a distância de segurança, v_{cf} representa a velocidade do carro da frente e d_{ef} representa o erro entre a distância ao veículo da frente e a distância de segurança. Nas equações 3.2 observa-se que k_{dist} tem influência

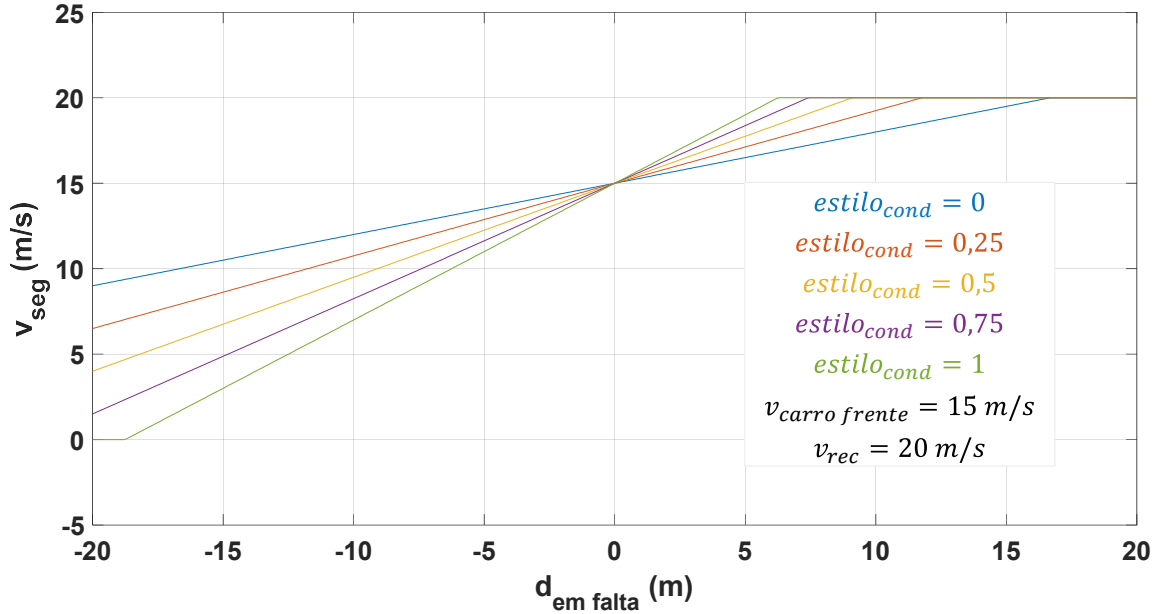


Figura 3.3: Gráfico da variação da velocidade segura em função da distância em falta para alcançar a distância de segurança. O gráfico da velocidade segura é limitado superiormente pelo valor da velocidade recomendada.

na velocidade segura, que representa a velocidade que permite ao veículo autónomo aproximar-se e manter-se à distância de segurança recomendada.

Considerando, por exemplo, que a velocidade inicial a que o veículo autónomo circula é de 20 m/s, no caso em que o estilo de condução é o mais agressivo, a velocidade do mesmo só começa a diminuir quando faltam apenas 6 metros para atingir a distância de segurança, resultando numa desaceleração maior. Na situação em que o estilo de condução escolhido é o mais defensivo, a velocidade do veículo começa a diminuir quando ainda faltam 17 metros. Neste último caso, a desaceleração assume um valor menor e mais suave.

3.1.3 Magnitude de convergência para a velocidade desejada

O parâmetro λ afeta a reação do veículo a mudanças no valor desejado para a velocidade do veículo, isto é, um maior valor de λ provocará reações mais enérgicas do acelerador e do travão do veículo, enquanto que se o seu valor for mais reduzido, essas reações tornam-se mais suaves.

$$\lambda = 0.5 + \text{estilo}_{cond}$$

$$a_{long} = a_{long \max} \left(1 - \frac{2}{1 + e^{-\lambda(v-v_{des})}} \right) \quad (3.3)$$

Aqui, a_{long} representa aceleração longitudinal do veículo, $a_{long \max}$ representa a aceleração longitudinal máxima, em módulo, e v_{des} é o valor de velocidade desejado. A função da aceleração longitudinal

é uma função sigmóide de modo a ter apenas um ponto de equilíbrio assintoticamente estável e a fazer a velocidade evoluir suavemente.

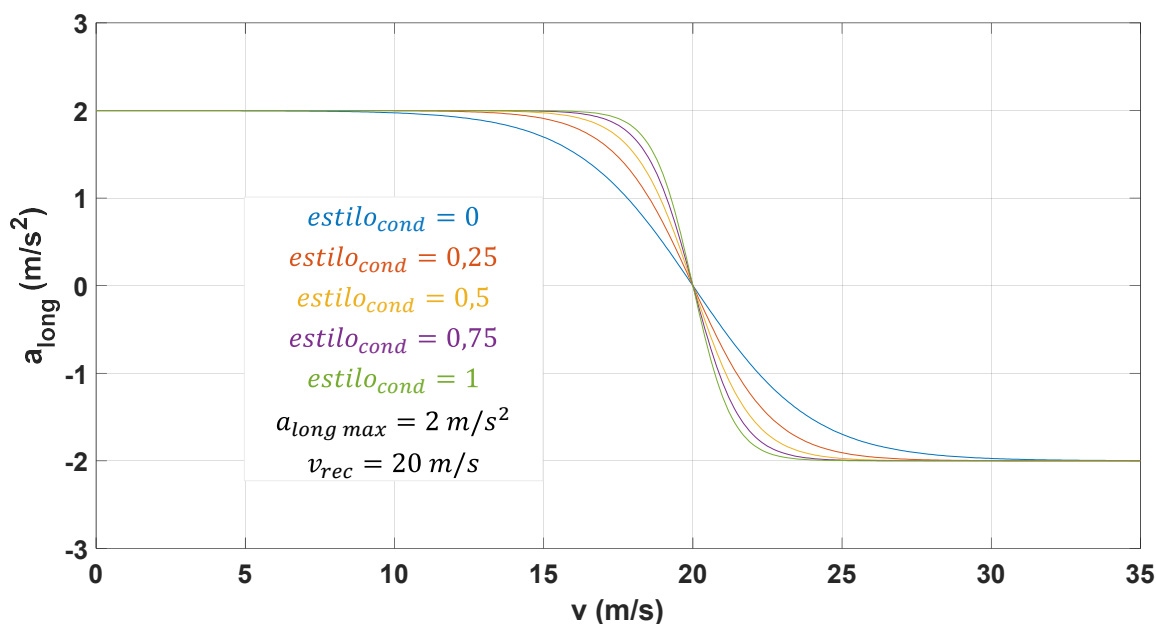


Figura 3.4: Gráfico do sistema dinâmico responsável por convergir a velocidade do veículo para a velocidade desejada de 20 m/s.

Nas equações 3.3 vê-se que λ aumenta quanto mais agressivo for o estilo de condução. No gráfico da figura 3.4 verifica-se, por exemplo, que no caso em que a velocidade inicial do veículo é de 17 m/s, a aceleração longitudinal aplicada é tanto maior quando mais agressivo for o estilo de condução. Isto faz sentido considerando que um estilo de condução mais agressivo pode ser caracterizado por acelerações mais bruscas. Pelo contrário, no caso em que o estilo de condução é mais defensivo, a aceleração aplicada é mais baixa, causando um aumento da velocidade gradual até alcançar a velocidade recomendada da figura de 20 m/s, .

3.1.4 Aceleração longitudinal máxima

O parâmetro $a_{long\ max}$ define o valor absoluto máximo para a aceleração longitudinal.

$$a_{long\ max} = 2 + 2 \cdot estilo_{cond} \quad (3.4)$$

$$a_{long} = a_{long\ max} \left(1 - \frac{2}{1 + e^{-\lambda(v-v_{des})}} \right)$$

Nas equações 3.4 denota-se que este parâmetro tem influência no valor máximo que a aceleração longitudinal pode assumir, variando dentro do intervalo $[2, 4] m/s^2$ (Svensson & Eriksson, 2015). A figura 3.5 mostra o efeito que o estilo de condução tem na aceleração longitudinal.

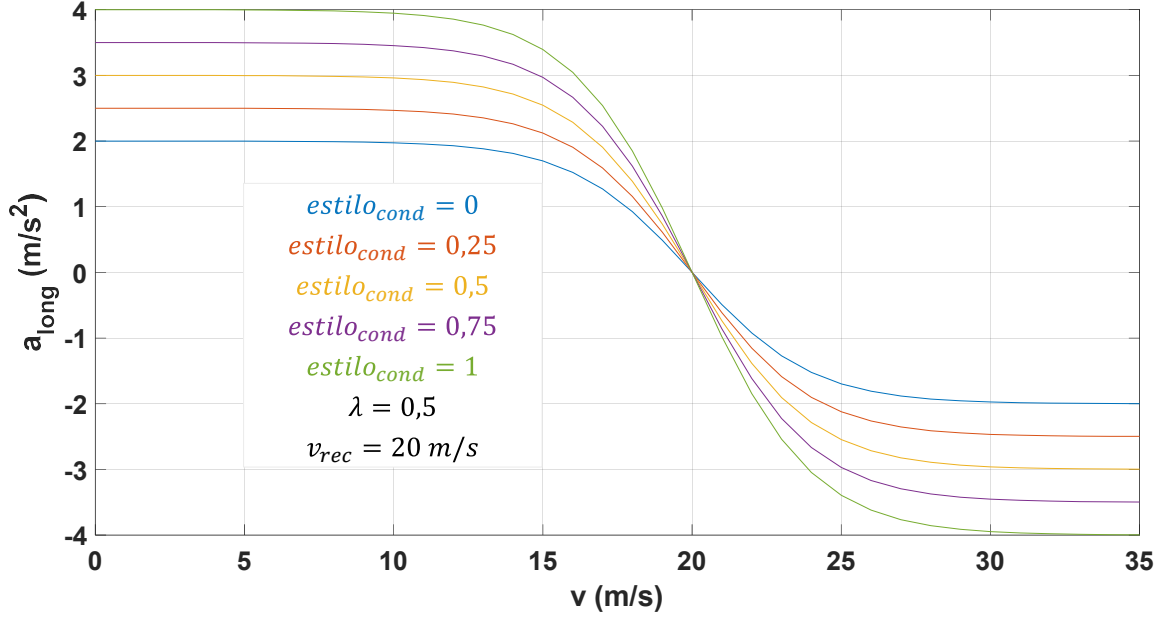


Figura 3.5: Gráfico do sistema dinâmico responsável por convergir a velocidade do veículo para a velocidade desejada.

Como se pode verificar, quanto mais agressivo for o estilo de condução escolhido, maiores serão os limites superior e inferior da aceleração longitudinal, enquanto que estilos de condução mais defensivos apenas podem assumir valores de aceleração absoluta mais baixos.

3.1.5 Aceleração lateral máxima

O parâmetro $a_{lat\ max}$ define o valor absoluto máximo para a aceleração lateral durante o seguimento da trajetória. Este afeta principalmente a velocidade a que o veículo circula aquando de uma curva.

$$a_{lat\ max} = 1 + estilo_{cond} \quad (3.5)$$

$$v_{cm} = \sqrt{\frac{a_{lat\ max}}{|c|}}$$

Aqui, v_{cm} representa a velocidade máxima a que deve ser realizada uma determinada curva de modo a que a aceleração lateral não ultrapasse o valor de $a_{lat\ max}$. c é o inverso do raio de curvatura da estrada. Nas equações 3.5 vê-se como o parâmetro $a_{lat\ max}$ influencia a velocidade máxima, v_{cm} , durante uma curva de curvatura c . A figura 3.6 representa a equação 3.5. A aceleração lateral máxima varia dentro do intervalo $[1, 2]m/s^2$ (Bae et al., 2019).

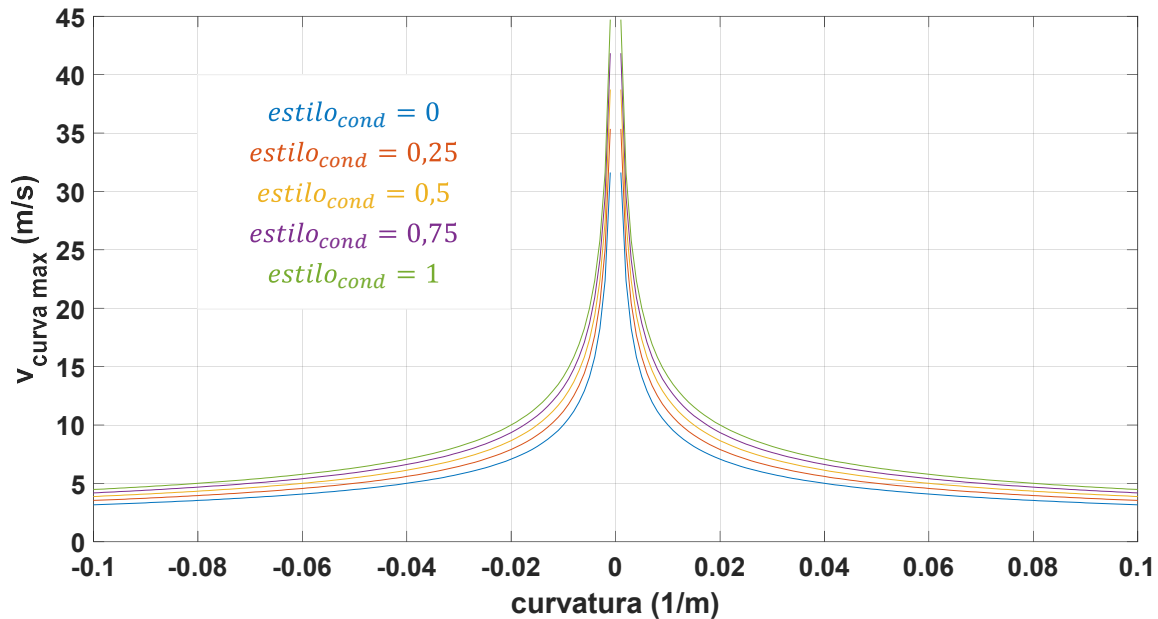


Figura 3.6: Gráfico da variação da velocidade máxima em função da curvatura da estrada para limitação da aceleração lateral a $a_{lat max}$.

Como se pode verificar, quanto mais agressivo for o estilo de condução escolhido, maior será a aceleração máxima desejada e maior será a velocidade máxima permitida para realizar uma mesma curva, comparativamente a um estilo de condução menos agressivo.

3.1.6 Abordagem à curva

O parâmetro $dist_{entre pts}$ representa a distância entre os pontos da trajetória escolhidos para calcular a média pesada das suas orientações.

$$dist_{entre pts} = \frac{v}{4} + 2 \cdot (1.8 - |des_{lat}|) \cdot estilo_{cond} \quad (3.6)$$

Aqui, des_{lat} corresponde ao valor do desvio do veículo em relação ao centro da faixa. Analisando a equação 3.6, observa-se que a distância aumenta com a velocidade do veículo e com o estilo de condução desejado. Aumentando o valor da distância entre os pontos escolhidos, o veículo tende a 'cortar' as curvas, em vez de seguir a trajetória afincadamente. Este comportamento é mais característico em estilos de condução mais agressivos, enquanto que nos mais defensivos a preferência é para que o veículo siga corretamente centrado na faixa onde segue. A figura 3.7 ilustra este comportamento.

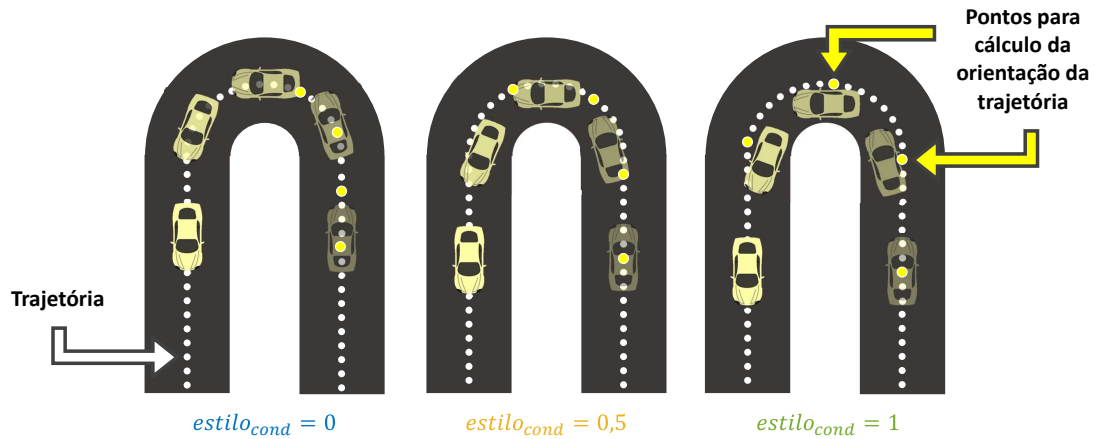


Figura 3.7: Representação da variação da abordagem à curva em função do estilo de condução, para uma mesma velocidade.

3.1.7 Suavidade de transição de faixa

O parâmetro k_{trans} é um ganho que afeta a forma como o veículo realiza a transição de faixa numa ultrapassagem. Um valor maior de k_{trans} faz com que essa transição seja mais suave e, enquanto que um valor mais baixo torna a manobra mais rápida e brusca. Este parâmetro, que afeta a aceleração lateral nos momentos em que a transição acontece, será aplicado na secção 3.2.3.

$$k_{trans} = 1 + \frac{4 - estilo_{ultr}}{1 + e^{-\frac{d_{rel}-8}{2}}} + \frac{3 - estilo_{ultr}}{1 + e^{-\frac{v-12}{3}}} \quad (3.7)$$

Aqui, d_{rel} representa a distância relativa entre o veículo autónomo e o veículo da frente. Como é visível na equação 3.7, a suavidade varia não só com a variação do estilo de ultrapassagem, mas também com a velocidade e a distância relativa ao veículo da frente. A figura 3.8 representa o gráfico da equação 3.7 com dois estilos de ultrapassagem diferentes.

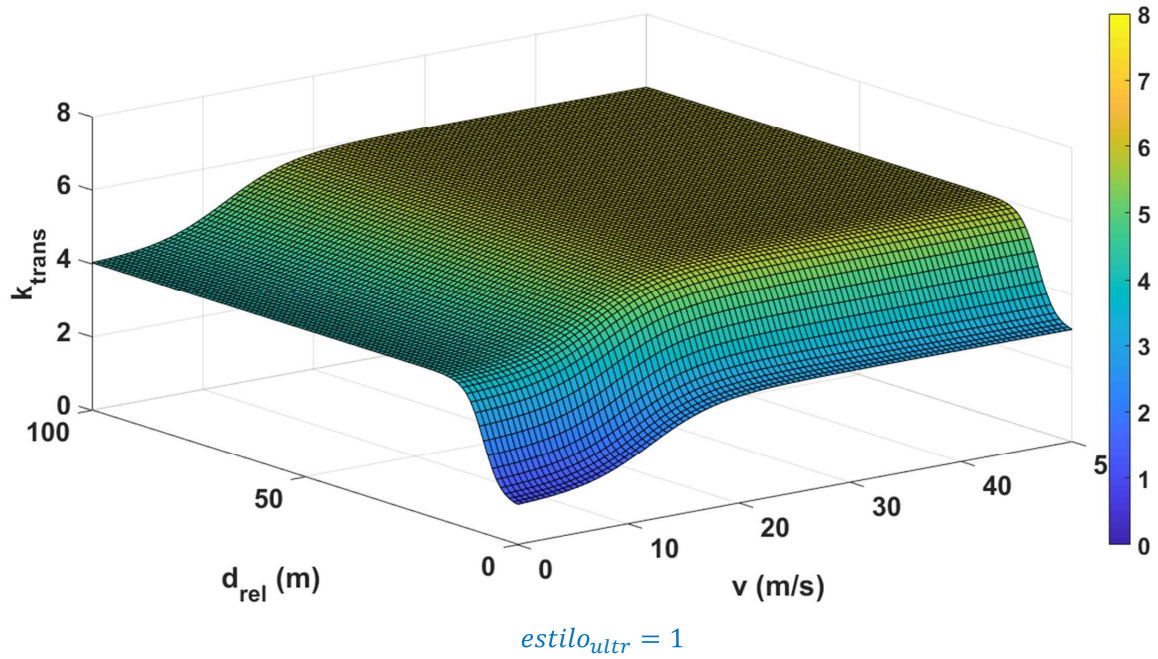
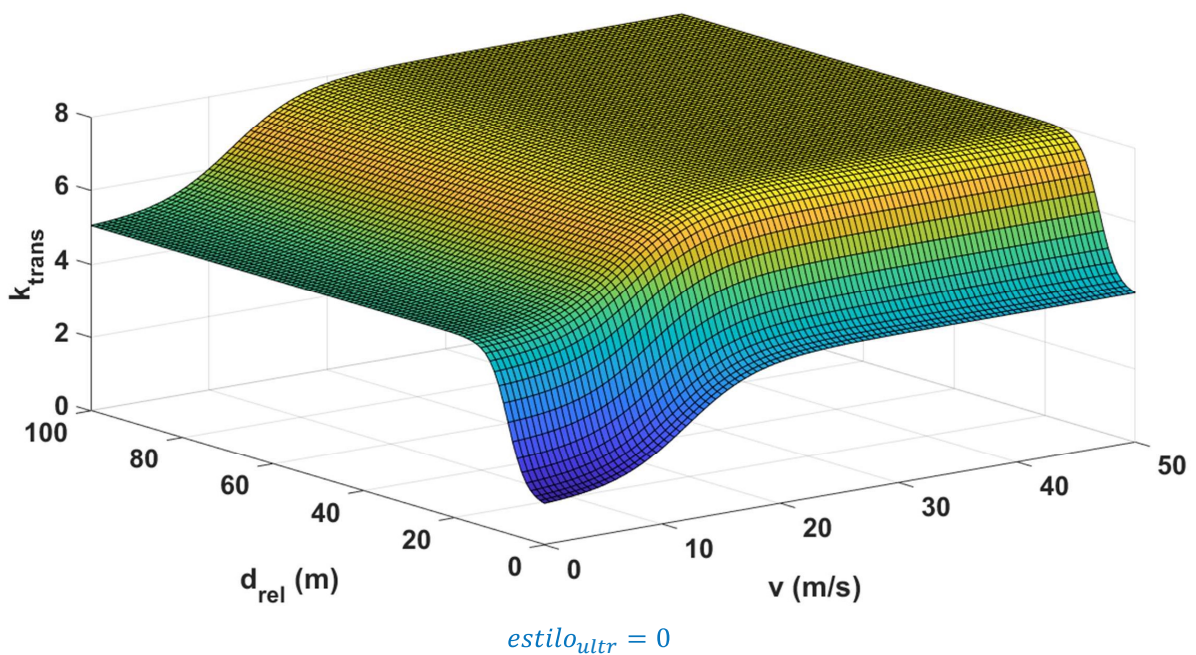


Figura 3.8: Gráficos da variação da suavidade de transição de faixa em função da velocidade do veículo e da distância relativa ao veículo da frente. No primeiro gráfico, com o estilo de ultrapassagem mais defensivo selecionado, observa-se que k_{trans} assume valores mais elevados, o que significa que a transição tende a ser mais suave. O contrário acontece no segundo gráfico.



A ilustração 3.9 clarifica a variação da transição de faixa em função do estilo de ultrapassagem escolhido.

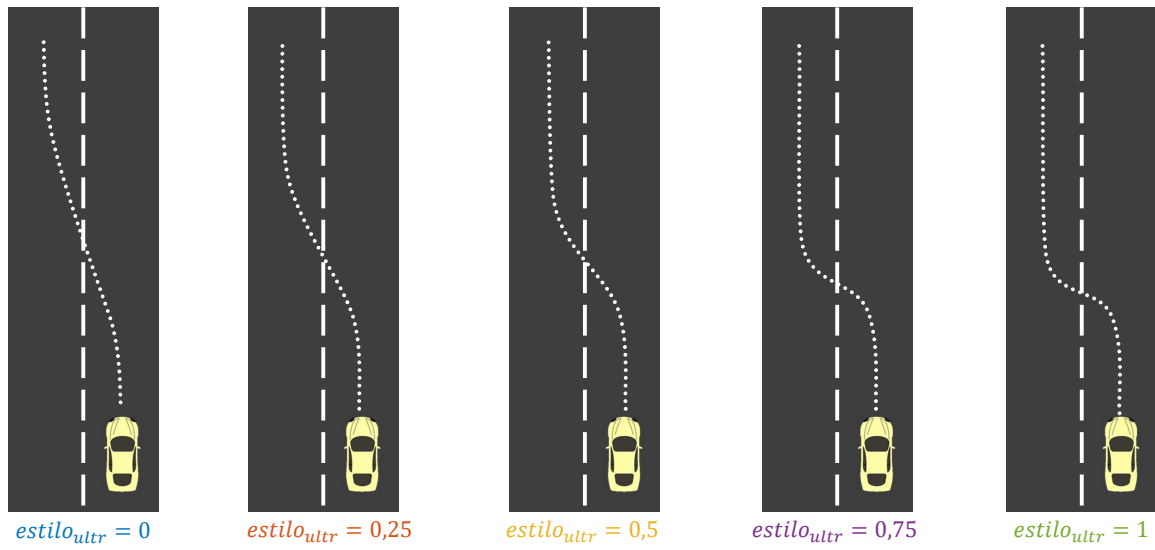


Figura 3.9: Representação do efeito da variação do estilo de ultrapassagem na suavidade da transição de faixa.

3.2 Controlo do veículo

3.2.1 Controlo longitudinal

O controlo longitudinal de um veículo autónomo atua sobre a sua velocidade longitudinal, ou seja, na direção da via (tipicamente a estrada) em que o veículo circula. Comparando a um veículo convencional, isto representa o controlo da pressão sobre os pedais do acelerador e do travão.

Para a implementação desta dissertação, os comportamentos desejados para a velocidade do veículo são dois:

- Convergir para o valor recomendado para as características da estrada;
- Manter a distância de segurança para o veículo da frente.

A figura 3.10 ilustra os dois comportamentos.

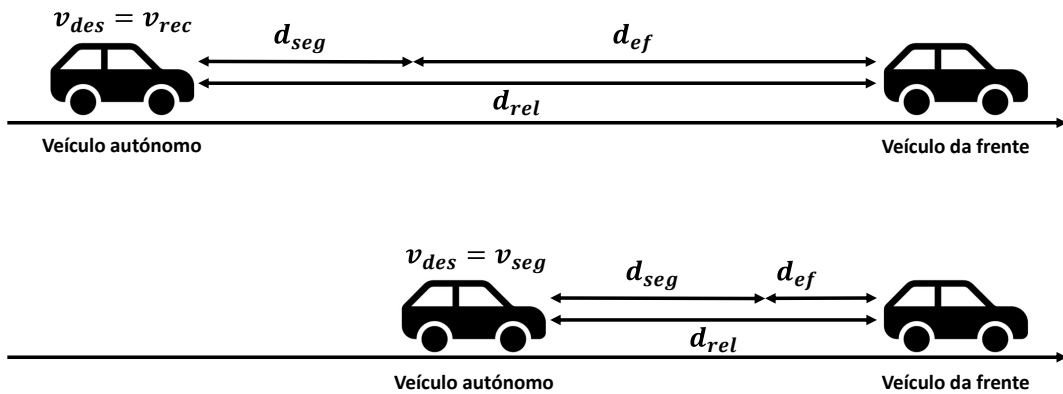


Figura 3.10: Ilustração dos dois comportamentos do controlador. v_{des} representa a velocidade desejada para o veículo; v_{rec} simboliza o valor de velocidade recomendado quando não existe nenhum veículo frontalmente próximo; d_{rel} é a distância relativa, entre o veículo autónomo e o veículo que segue à sua frente; d_{seg} é a distância de segurança; d_{ef} representa a distância em falta para atingir a distância de segurança, isto é, para que d_{rel} seja igual a d_{seg} ; v_{seg} é a velocidade de segurança que permite que d_{rel} convirja para o valor de d_{seg} .

Quando d_{ef} for tal que torne v_{seg} maior que v_{rec} , o veículo autónomo circulará à velocidade recomendada. Quando d_{ef} for tal que torne v_{seg} menor que v_{rec} , o veículo autónomo circulará à velocidade segura para manter a distância de segurança. Por outras palavras, o controlador decide qual dos comportamentos utilizar com base no menor valor entre as velocidades calculadas em cada comportamento, v_{rec} e v_{seg} . A equação 3.8 exemplifica a condição em que a mudança ocorre.

$$v_{des} = \min(v_{rec}, v_{seg}) \quad (3.8)$$

Relativamente ao primeiro comportamento, o valor de velocidade recomendado deve ter em conta as características da estrada percorrida pelo veículo. De forma a tornar mais segura e confortável a viagem aos passageiros, a velocidade recomendada é limitada superiormente em função da curvatura da estrada e da aceleração lateral máxima desejada.

Durante uma curva, o movimento do veículo é aproximadamente circular e, como tal, o raio da curva pode ser estimado através dos valores da aceleração lateral e da velocidade, como demonstra a equação 3.9 (Amata et al., 2008).

$$R = \frac{v^2}{a_{lat}} \quad (3.9)$$

Neste caso pretende-se encontrar o valor máximo da velocidade v de modo a que, durante a realização de uma curva de raio R , a aceleração lateral a_{lat} não ultrapasse o valor predefinido. Rearranjando a equação 3.9, obtém-se a equação 3.10.

$$v_{mc} = \sqrt{R \cdot a_{lat \ max}} = \sqrt{\frac{a_{lat \ max}}{c}} \quad (3.10)$$

Aqui, c representa o valor da curvatura da estrada, que é o inverso do raio, e v_{mc} simboliza a velocidade máxima em curva. O valor da velocidade do veículo não deverá ultrapassar este valor, caso contrário o utilizador irá experimentar acelerações laterais maiores que as desejadas, tornando a viagem menos confortável.

No que diz respeito ao segundo comportamento, o valor da velocidade deve ser tal que permita ao veículo autónomo manter a distância de segurança relativamente a um veículo que siga à sua frente. No caso de um condutor humano a distância de segurança corresponde à soma da distância de reação e da distância de travagem. Como o tempo de reação de um veículo autónomo é praticamente nulo, a distância de segurança equivale à distância de travagem. Esta corresponde à distância mínima necessária para imobilizar completamente o veículo. Este valor varia em função da velocidade em que a travagem inicia e à capacidade de desaceleração do veículo.

A distância de travagem é calculada através das equações 3.11.

$$t_{stop} = -\frac{v}{a_{long \ min}} \quad (3.11)$$

$$d_{seg} = t_{stop} \cdot v + \frac{a_{long \ min}}{2} \cdot v^2$$

Aqui, v simboliza a velocidade instantânea a que o veículo autónomo circula, em metros por segundo, t_{stop} representa o tempo necessário para imobilizar o veículo, em segundos, e $a_{long \ min}$ a desaceleração máxima, em m/s^2

Para manter a distância de segurança recomendada para uma determinada velocidade, é necessário calcular a velocidade que permite ao veículo autônomo atingi-la e mantê-la. Para isso são usadas as equações 3.12.

$$\begin{aligned} d_{ef} &= d_{rel} - d_{seg} \\ v_{seg} &= k_{dist} \cdot d_{ef} + v_{cf} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Nestas equações, v_{cf} representa a velocidade a que o veículo da frente circula e k_{dist} é um parâmetro que possibilita variar a rapidez da convergência para a distância de segurança. De notar que o modelo do veículo adotado não considera a aderência dos pneus do veículo à superfície da estrada por efeitos de simplificação.

A estratégia consiste em utilizar um sistema dinâmico com um só ponto de equilíbrio estável e regulável. A função escolhida para governar o sistema dinâmico foi a função sigmóide 3.13.

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = a_{long\ max} - \frac{a_{long\ max} - a_{long\ min}}{1 + e^{-\lambda(v(t) - v_{des})}} \quad (3.13)$$

Aqui, $a(t)$, $v(t)$, $a_{long\ max}$, $a_{long\ min}$ e v_{des} representam, respetivamente, a aceleração e velocidade longitudinais no instante t , as acelerações longitudinais máxima e mínima e a velocidade desejada para o veículo.

Para se determinar os pontos de equilíbrio do sistema dinâmico é necessário igualar a função que o governa a zero.

$$\begin{aligned} \frac{dv^*(t)}{dt} &= 0 \\ \Leftrightarrow a_{long\ max} - \frac{a_{long\ max} - a_{long\ min}}{1 + e^{-\lambda(v^*(t) - v_{des})}} &= 0 \\ \Leftrightarrow v^*(t) &= v_{des} \end{aligned}$$

Resolvendo a equação em ordem a $v^*(t)$, pode ver-se que o ponto de equilíbrio é v_{des} , pois é a única raiz da função.

Para determinar a estabilidade do ponto de equilíbrio é necessário observar o declive, m , da reta tangente ao gráfico de $\frac{dv(t)}{dt}$ no ponto de equilíbrio.

$$m = \frac{da(t)}{dt} = - \frac{(a_{long\ max} - a_{long\ min}) \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda(v(t) - v_{des})}}{\left(1 + e^{-(v(t) - v_{des})}\right)^2} \quad (3.14)$$

Substituindo $v(t)$ pelo ponto de equilíbrio encontrado obtém-se a equação 3.15

$$m_1 = -\frac{(a_{long\ max} - a_{long\ min}) \cdot \lambda}{4} \quad (3.15)$$

Em m_1 (3.15) pode-se analisar a variação da estabilidade do sistema dinâmico no ponto de equilíbrio v_{des} em função de λ . Se o valor de λ for positivo, o valor de m_1 será negativo, o que torna o ponto de equilíbrio assintoticamente estável (atrator). Se o valor de λ for negativo, o valor de m_1 será positivo, passando o ponto de equilíbrio a ser instável (repulsor). Como se pretende que o sistema dinâmico atraia a velocidade para o valor desejado, a estabilidade do ponto de equilíbrio deve ser assintoticamente estável e, para isso, λ deve ser positivo. Como a magnitude de atração é igual ao valor absoluto de λ , quanto maior o seu valor, maior será a magnitude de atração do ponto de equilíbrio, o que resulta numa reação mais brusca para uma mesma variação da velocidade e vice-versa.

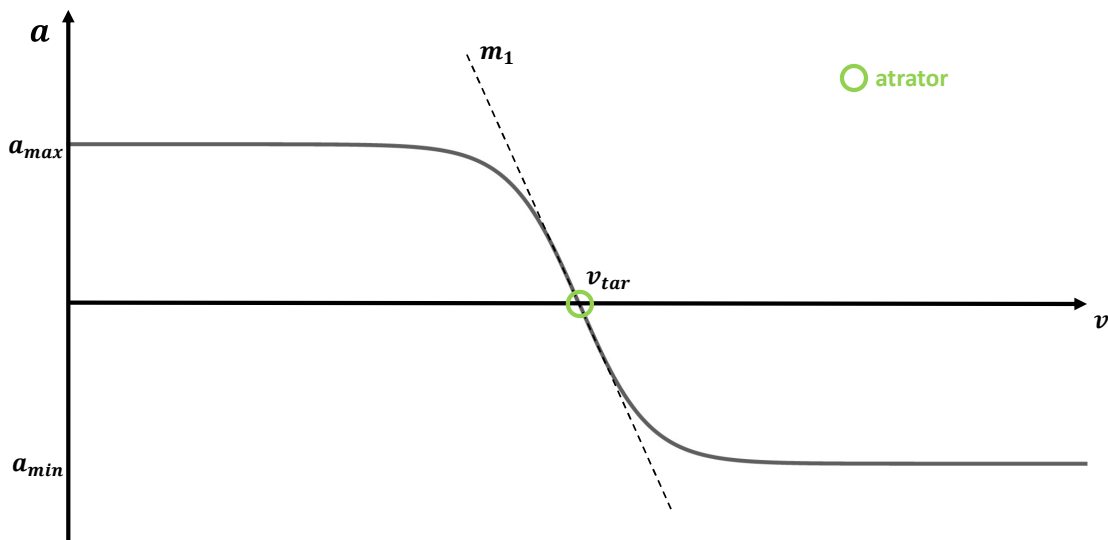


Figura 3.11: Representação gráfica do sistema dinâmico para $\lambda > 0$.

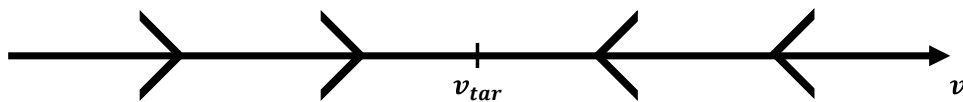


Figura 3.12: Retrato de fase do sistema dinâmico.

Na figura 3.12 pode observar-se que qualquer que seja o valor da velocidade atual do veículo autónomo, esta convergirá sempre para o valor desejado.

Em suma, quando não existe nenhum veículo frontalmente próximo do veículo autónomo, o ponto de equilíbrio do sistema dinâmico implementado passa a ser v_{rec} , fazendo a velocidade do veículo convergir

para o valor da velocidade recomendada. No caso em que surja um veículo relativamente próximo, v_{seg} torna-se menor que v_{rec} , o ponto de equilíbrio do sistema dinâmico muda para v_{seg} , fazendo velocidade do veículo convergir para o valor da velocidade de segurança. Isto fará a distância entre os dois veículos convergir para a distância de segurança recomendada para a velocidade atual do veículo autônomo.

3.2.2 Controlo lateral

O controlo lateral de um veículo autónomo atua sobre a orientação das suas rodas direcionáveis, o que, comparando a um veículo convencional, representa controlar o ângulo de rotação do volante.

O comportamento desejado para o veículo deve garantir que este segue uma trajetória previamente definida no módulo de planeamento de um veículo autónomo. Para isso, ele deverá manter-se próximo da mesma, ao mesmo tempo que mantém a sua orientação muito próxima da trajetória.

Relativamente à primeira componente do comportamento, o valor do desvio lateral em relação à trajetória deve ser o mais próximo de zero possível. No que diz respeito à segunda componente, o erro entre a orientação do veículo e a orientação da trajetória deve também ser anulado. A figura 3.13 ilustra o comportamento requerido.

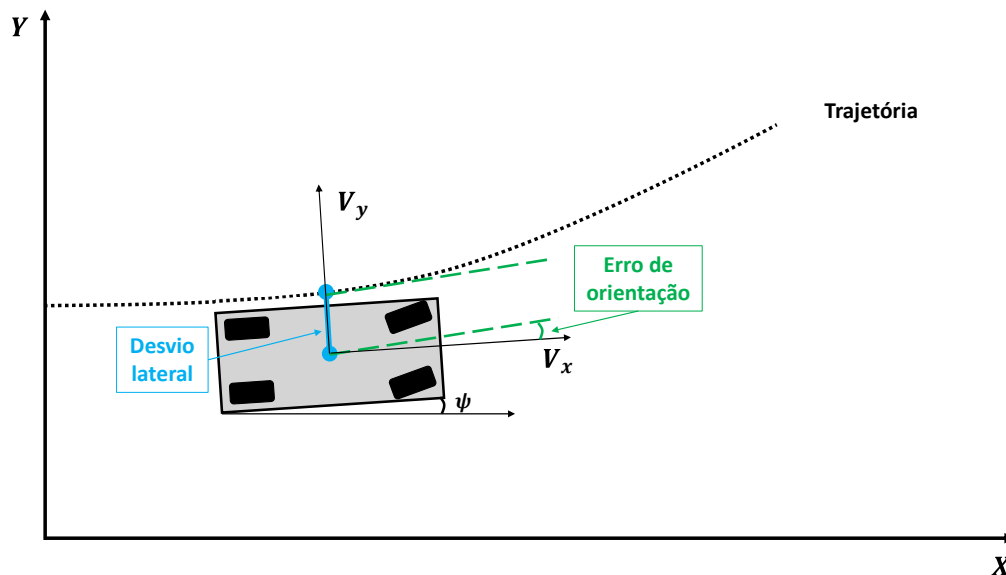


Figura 3.13: Ilustração do comportamento do controlador lateral.

A estratégia consiste em utilizar um sistema dinâmico com um ponto de equilíbrio estável, que deverá ser igual ao valor da orientação da estrada. O valor do atrator deverá ser deslocado em função do desvio lateral. A função escolhida para governar o sistema dinâmico está descrita em 3.16.

$$\omega = \frac{d\psi}{dt} = f_{esq}(\psi) + f_{dir}(\psi) \quad (3.16)$$

Como o próprio nome sugere, $f_{esq}(\psi)$ representa a contribuição do sistema dinâmico para orientar o veículo para a esquerda e $f_{dir}(\psi)$ representa a contribuição do sistema dinâmico para orientar o veículo para a direita.

$$f_i(\psi) = -\lambda_i \cdot \sin(\psi - \psi_i) \quad (3.17)$$

$$i = esq, dir$$

Aqui ω , ψ , λ_i e ψ_i representam, respetivamente, a velocidade angular e a orientação do veículo autónomo, a magnitude do ponto de equilíbrio de cada contribuição do sistema dinâmico e a orientação da trajetória adicionada ou subtraída de um valor constante, como se verá de seguida. Juntando as duas componentes obtém-se uma sinusóide com amplitude e desfasamento diferentes, como é mostrado na equação 3.18.

$$\frac{d\psi}{dt} = -\lambda_{esq} \cdot \sin(\psi - \psi_{esq}) - \lambda_{dir} \cdot \sin(\psi - \psi_{dir}) \quad (3.18)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d\psi}{dt} = c \cdot \sin(\psi + \phi)$$

Na equação 3.18, c e ϕ representam a amplitude e desfasamento resultantes da soma das duas sinusoides, respetivamente, e são calculadas como é demonstrado na equação 3.19.

$$c = -\sqrt{\lambda_{esq}^2 + \lambda_{dir}^2 + 2 \cdot \lambda_{esq} \cdot \lambda_{dir} \cdot \cos(\psi_{dir} - \psi_{esq})} \quad (3.19)$$

$$\phi = -\arctan\left(\frac{\lambda_{esq} \cdot \sin(\psi_{esq}) + \lambda_{dir} \cdot \sin(\psi_{dir})}{\lambda_{esq} \cdot \cos(\psi_{esq}) + \lambda_{dir} \cdot \cos(\psi_{dir})}\right)$$

Para se determinar os pontos de equilíbrio do sistema dinâmico é necessário encontrar as raízes da função que o governa.

$$\frac{d\psi^*}{dt} = 0 \quad (3.20)$$

$$\Leftrightarrow c \cdot \sin(\psi^* + \phi) = 0$$

$$\Leftrightarrow \psi^* = k\pi - \phi, k \in \mathbb{Z}$$

Em 3.20 pode ver-se que o ponto de equilíbrio é $-\phi$, dado que $k = 0$, pois a orientação do veículo será mantida sempre próxima da orientação da trajetória.

Para determinar a estabilidade do ponto de equilíbrio é necessário observar o declive m da reta tangente ao gráfico de $\frac{d\psi}{dt}$ no ponto de equilíbrio.

$$m = \frac{d\omega}{d\psi} = c \cdot \cos(\psi + \phi) \quad (3.21)$$

Substituindo ψ pelo ponto de equilíbrio encontrado obtém-se a equação 3.22.

$$m_1 = c \quad (3.22)$$

Em m_1 (3.22) pode-se ver a variação da estabilidade do sistema dinâmico no ponto de equilíbrio $-\phi$ em função de c . Como o valor de c é sempre negativo, o valor de m_1 será negativo, o que torna o ponto de equilíbrio assintoticamente estável (atrator). Como se pretende que o sistema dinâmico atraia a orientação do veículo para o valor desejado, a estabilidade do ponto de equilíbrio deve ser assintoticamente estável e, por isso, a estabilidade do ponto de equilíbrio é a correta.

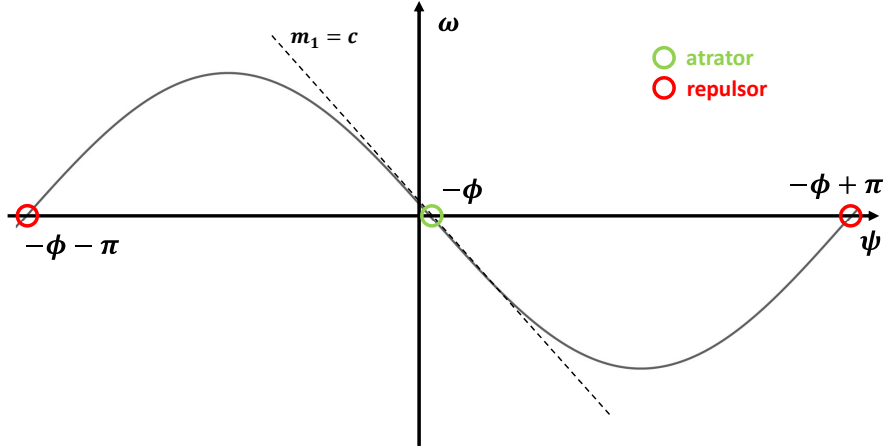


Figura 3.14: Representação gráfica do sistema dinâmico.

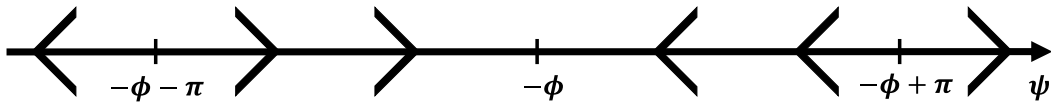


Figura 3.15: Retrato de fase do sistema dinâmico.

Na figura 3.15 pode observar-se que se o valor atual do ângulo das rodas do veículo autónomo estiver entre $-\phi - \pi$ e $-\phi + \pi$, este convergirá sempre para o valor desejado. Esta condição é garantida uma vez que a orientação do veículo estará sempre próxima da orientação da trajetória. Quanto á garantia de que o desvio lateral converge para zero, ela é dada pela função que rege o parâmetro λ_j .

$$\lambda_{dir} = \frac{1}{1 + e^{-des_{lat}}} \tag{3.23}$$

$$\lambda_{esq} = 1 - \lambda_{dir}$$

Aqui des_{lat} representa o desvio lateral do veículo em relação à trajetória e β_1 e β_2 são parâmetros que permitem afinar a variação das magnitudes, λ_{esq} e λ_{dir} , em função do desvio lateral. Quando o veículo se encontra desviado para a direita, des_{lat} terá um valor negativo e, conseqüentemente, a magnitude λ_{esq} será maior que λ_{dir} . Isto fará com que a contribuição de f_{esq} seja maior que a de f_{dir} , levando o veículo a orientar-se para a esquerda. No caso em que o veículo se encontra desviado para a esquerda,

des_{lat} terá um valor positivo e, conseqüentemente, a magnitude λ_{dir} será maior que λ_{esq} . Isto fará com que a contribuição de f_{dir} seja maior que a de f_{esq} , levando o veículo a orientar-se para a direita.

Para calcular o atrator de cada contribuição são utilizadas as equações 3.24.

$$\begin{aligned}\psi_{esq} &= \psi_{traj} + \Delta\psi \\ \psi_{dir} &= \psi_{traj} - \Delta\psi\end{aligned}\tag{3.24}$$

Aqui ψ_{esq} e ψ_{dir} são os atratores de f_{esq} e f_{dir} , respectivamente. ψ_{traj} simboliza a orientação da trajetória e $\Delta\psi$ é um ângulo fixo.

O somatório das duas contribuições cria um único atrator, $-\phi$, num ângulo em torno do valor da orientação da trajetória. Em suma, o comportamento lateral do veículo seguirá uma das três condições seguintes:

- Se o veículo estiver sobre a trajetória, o valor do atrator resultante será igual ao valor da orientação da trajetória;
- Se o veículo estiver desviado para a direita, o valor do atrator resultante será maior do que o valor da orientação da trajetória;
- Se o veículo estiver desviado para a esquerda, o valor do atrator resultante será menor do que o valor da orientação da trajetória.

Este comportamento é o que se pretende para aproximar o veículo da trajetória. A figura 3.16 demonstra melhor este comportamento.

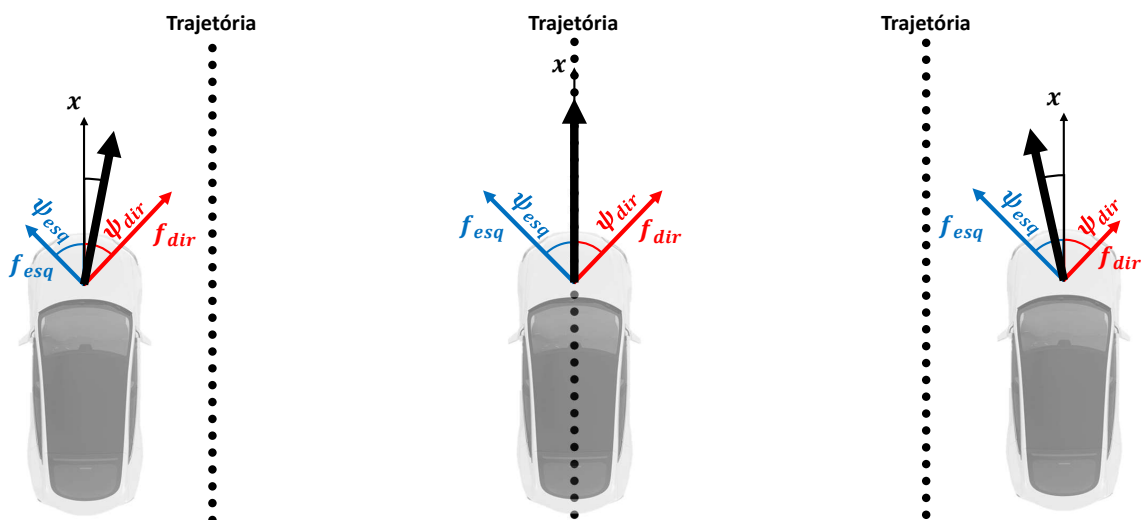


Figura 3.16: Demonstração do comportamento do controlador lateral.

Partindo do princípio que os pontos da trajetória são previamente fornecidos pelo módulo de planeamento do sistema de condução autónoma, o desvio lateral e a orientação da trajetória estão representados na figura 3.17 e são calculados de seguida.

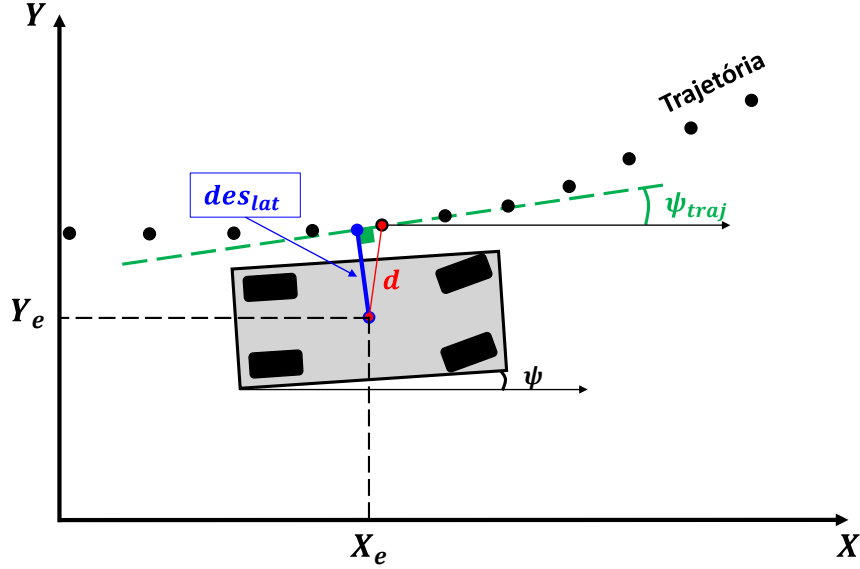


Figura 3.17: Ilustração do comportamento do controlador lateral.

Na equação 3.25, X_e e Y_e são as coordenadas do veículo no mundo e $traj$ é o vetor que contém todos os pontos que compõem a trajetória. É obtida a distância entre o veículo e o ponto da trajetória mais próximo, d , bem como o seu índice no vetor da trajetória, ind .

$$\left[d \quad ind \right] = \min \left(\sqrt{(Y_e - traj)^2 + (X_e - traj)^2} \right) \quad (3.25)$$

Na equação 3.26 é calculado o desvio lateral, des_{lat} , perpendicular à tangente da trajetória.

$$des_{lat} = d \cdot \sin \left[\psi - \arctan \left(\frac{traj(ind, 2) - Y_e}{traj(ind, 1) - X_e} \right) \right] \quad (3.26)$$

Na equação 3.27 calcula-se a orientação da trajetória, ψ_{traj} .

$$\psi_{traj} = \arctan \left(\frac{traj(ind + 1, 2) - traj(ind, 2)}{traj(ind + 1, 1) - traj(ind, 1)} \right) \quad (3.27)$$

De forma a dotar o veículo de um comportamento menos reativo e mais preditivo, é calculada a orientação da trajetória em mais três pontos, situados mais à frente, igualmente separados entre si. Posteriormente, faz-se uma média pesada das orientações dos pontos escolhidos, sendo que os pontos mais próximos da posição do veículo contribuem com um maior peso para a média do que aqueles que estão mais afastados. A equação 3.28 exemplifica isso mesmo.

$$\psi_{pred} = \frac{p \cdot \psi_{traj} + p_1 \cdot \psi_{traj1} + p_2 \cdot \psi_{traj2} + p_3 \cdot \psi_{traj3}}{p + p_1 + p_2 + p_3} \quad (3.28)$$

$$p > p_1 > p_2 > p_3$$

Isto torna o seguimento da trajetória mais suave, porque o veículo passa a reagir ao que está por vir, em vez de esperar que aconteça. A distância entre os pontos escolhidos varia proporcionalmente com a velocidade a que o veículo circula, segundo a equação 3.29.

$$distep = \frac{v}{4} \quad (3.29)$$

3.2.3 Manobra de ultrapassagem

Ultrapassagem é o nome dado à manobra que permitir transpor um veículo ou qualquer obstáculo que se encontre à frente e na faixa onde o veículo autónomo circula. Nestas situações é essencial que este tenha a capacidade de os ultrapassar, de forma a oferecer ao utilizador o menor tempo de viagem possível.

Esta manobra apenas deve ser realizada em local e de forma a que dela não resulte perigo ou embaraço para o trânsito. Em regra geral, esta manobra efetua-se sempre pela esquerda. Em particular, os cuidados a ter são:

- A estrada deve encontrar-se livre na largura e extensão necessárias à realização da manobra;
- Nenhum veículo que siga atrás do veículo autónomo se encontra já a ultrapassar.

Tendo em conta que o veículo autónomo tem a capacidade de seguir uma trajetória predefinida, a solução para permitir que este consiga realizar uma ultrapassagem passa por gerar em tempo real uma nova trajetória na via imediatamente à sua esquerda. Esta trajetória de ultrapassagem terá um comprimento limitado e será paralela à trajetória inicial. A figura 3.18 demonstra a solução.

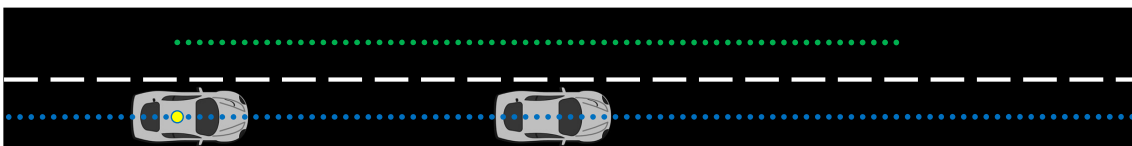


Figura 3.18: Geração da trajetória de ultrapassagem (a verde) em tempo real. A trajetória azul representa a trajetória inicial e o ponto amarelo a posição atua do veículo autónomo.

Para se encontrar as coordenadas dos pontos que compõem a trajetória de ultrapassagem são usadas as equações 3.30.

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{DET \cdot (Y_3 - Y_2)}{DEP} + X_2 \\ Y_1 &= -\frac{DET \cdot (X_3 - X_2)}{DEP} + Y_2 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Aqui, DET representa a distância que separa a trajetória original e a de ultrapassagem e DEP significa a distância entre os pontos que constituem as trajetórias. O significado dos pontos (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) e (X_3, Y_3) está ilustrado na figura 3.19.

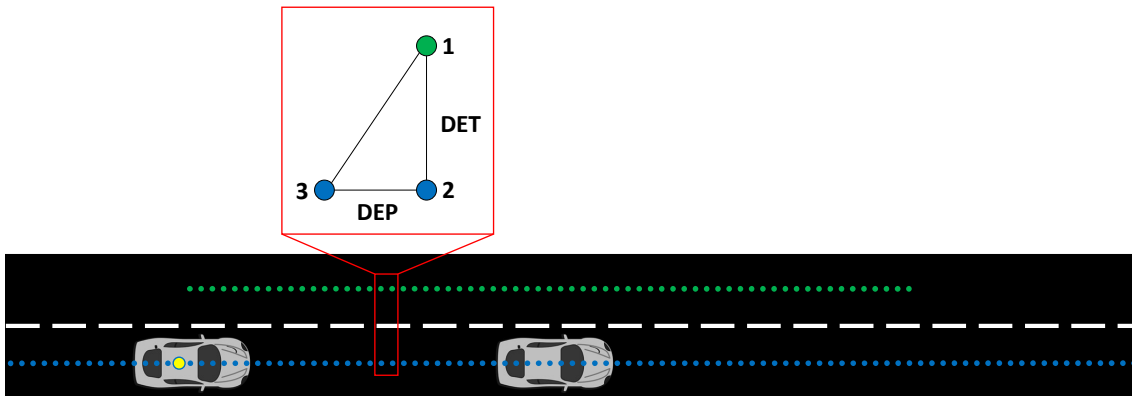


Figura 3.19: Cálculo das coordenadas dos pontos da trajetória de ultrapassagem.

Sabendo as coordenadas dos pontos da trajetória original, a distância entre eles e a distância que separa os centros das faixas de rodagem é possível encontrar a trajetória de ultrapassagem.

Neste momento apenas é necessário que o veículo autônomo passe a seguir esta nova trajetória. Para isso, é somente preciso calcular os valores do desvio lateral e da orientação com relação à trajetória de ultrapassagem.

Com esta implementação o veículo é capaz de transitar para a faixa da esquerda para iniciar a ultrapassagem, bem como retornar à direita para finalizá-la. No entanto, como o valor do desvio lateral sofre variações instantâneas no momento das transições de faixa, o veículo exibe acelerações laterais demasiado bruscas nesses momentos. Para resolver isso, além da trajetória de ultrapassagem, é também definida uma trajetória de transição nos momentos em que é necessário mudar de faixa de rodagem. Esta solução está ilustrada na figura 3.20. No início da ultrapassagem, isto é conseguido fazendo o valor DET aumentar gradualmente desde zero até ao valor que coloca a trajetória de ultrapassagem no centro da faixa da esquerda. No final da ultrapassagem acontece o inverso, isto é, faz-se o valor DET diminuir gradualmente desde o valor inicial até zero. A equação 3.31 modela essa variação.

$$DET = \frac{largfaixa}{1 + e^{\pm \frac{dx - 5 \cdot k_{trans} + DEP \cdot j}{k_{trans}}}} \quad (3.31)$$

Aqui, dx representa a distância euclidiana percorrida pelo veículo desde o início da ultrapassagem ou desde o início do retorno à faixa da direita. k_{trans} é um ganho que influencia a rapidez com que o veículo transita de uma faixa para a outra. j é o índice do vetor dos pontos da trajetória de ultrapassagem. Segundo esta equação, o valor DET irá variar gradualmente, segundo uma sigmóide, tal como se pretende.

Estando o veículo agora capacitado com ultrapassagens autônomas, falta avaliar os momentos em que deve usar esse recurso, seguindo as regras do código da estrada mencionadas anteriormente. Assim sendo, o veículo iniciará uma ultrapassagem sempre que se aperceber da necessidade de abrandar, estando reunidas as seguintes condições:

- Não existência de nenhum outro veículo, na faixa da esquerda, próximos do veículo autônomo;
- Não existência de nenhum veículo, na faixa da esquerda, dentro do alcance do radar frontal, que circule em sentido contrário.

A finalização da ultrapassagem, que corresponde ao regresso à faixa da direita, apenas será quando não existirem veículos próximos na mesma.

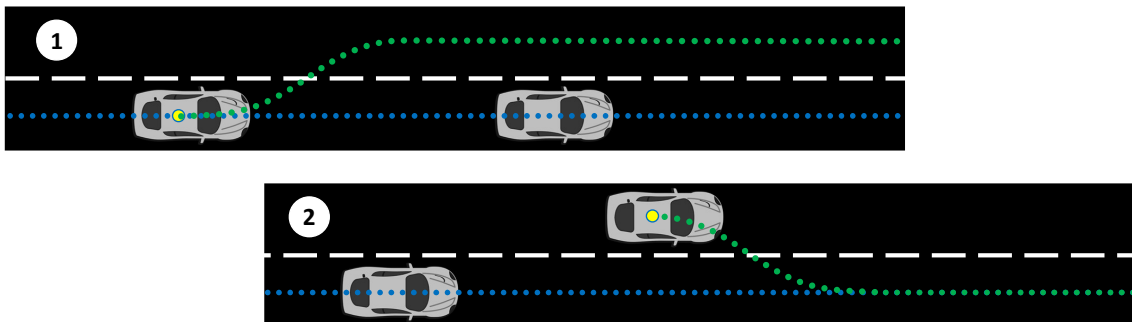


Figura 3.20: Transição entre faixas de rodagem. Na primeira imagem observa-se a nova trajetória no momento inicial da ultrapassagem e na segunda imagem vê-se a nova trajetória no momento final da ultrapassagem.

3.3 Implementação em Matlab

Após o desenvolvimento e a parametrização dos algoritmos de condução autónoma, estes foram implementados no programa Matlab, utilizando a ferramenta *Simulink*. O *Simulink* é um ambiente de programação gráfica bastante utilizado para modelação, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Através de diagramas de blocos, permite projetar, testar e simular sistemas baseados em modelos. Oferece ainda uma grande quantidade de produtos complementares, como é o caso do *Driving Scenario Designer* (parte da *Automated Driving Toolbox*) usado nesta dissertação, e uma forte integração com o restante ambiente do Matlab, podendo correr scripts nele desenvolvidos. Numa perspetiva geral, dividiu-se o problema em três partes: o controlo longitudinal, o controlo lateral e as dinâmicas do veículo. Cada uma delas será abordada em seguida.

3.3.1 Controlo longitudinal

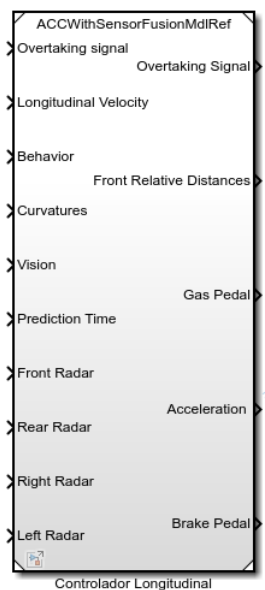


Figura 3.21: Bloco responsável pelo controlo longitudinal do veículo.

O bloco da figura 3.21 contém o controlador longitudinal e um módulo responsável por calcular as distâncias relativas aos outros veículos. Tem, como saídas, o valor da aceleração longitudinal calculado, o sinal para iniciar a ultrapassagem, os níveis de atuação nos pedais do acelerador e travão e o vetor com as distâncias relativas aos veículos da frente, em cada uma das faixas de rodagem. Para isso, necessita de saber o valor da velocidade longitudinal, os estilos de condução e ultrapassagem selecionados, a curvatura da estrada, o tempo de simulação, os dados dos sensores de visão e radar e, ainda, do estado do sinal de ultrapassagem da iteração anterior.

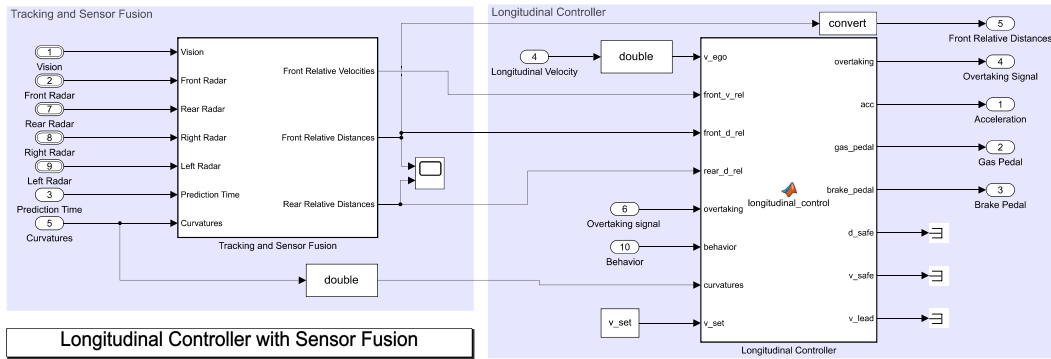


Figura 3.22: Blocos do subsistema do controlo longitudinal do veículo.

Analisando mais em pormenor este subsistema, representado na figura 3.22, encontram-se dois blocos. O da esquerda é responsável por analisar os dados provenientes do sensor de visão e dos quatro sensores de radar e calcular, para cada faixa de rodagem, a distância relativa aos veículos da frente e de trás mais próximos e a velocidade relativa ao veículo da frente. Este bloco foi reaproveitado de um exemplo de um modelo de controlo de velocidade adaptativo desenvolvido pelo Matlab.

O bloco de código da direita contém os algoritmos desenvolvidos para o controlador longitudinal. Nele estão incluídas todas as equações mostradas na secção 3.2.1 e parte das equações da secção 3.2.3, relacionadas com o controlo longitudinal do veículo.

3.3.2 Controlo lateral

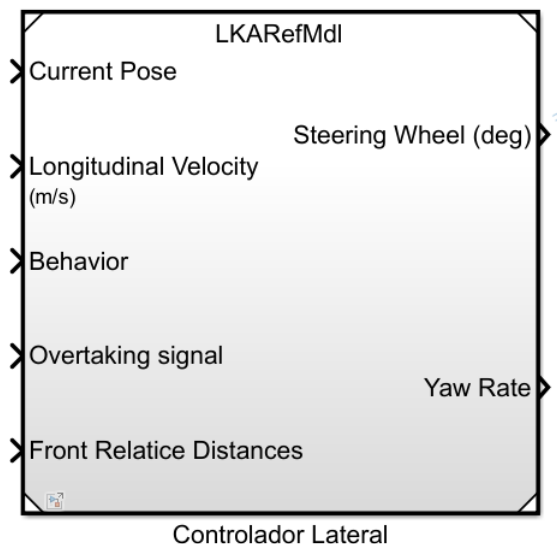


Figura 3.23: Bloco responsável pelo controlo lateral do veículo.

Na figura 3.23 está representado o subsistema do controlo lateral do veículo. Tem como principal saída a velocidade angular da orientação do veículo necessária para que este siga uma trajetória. O valor do

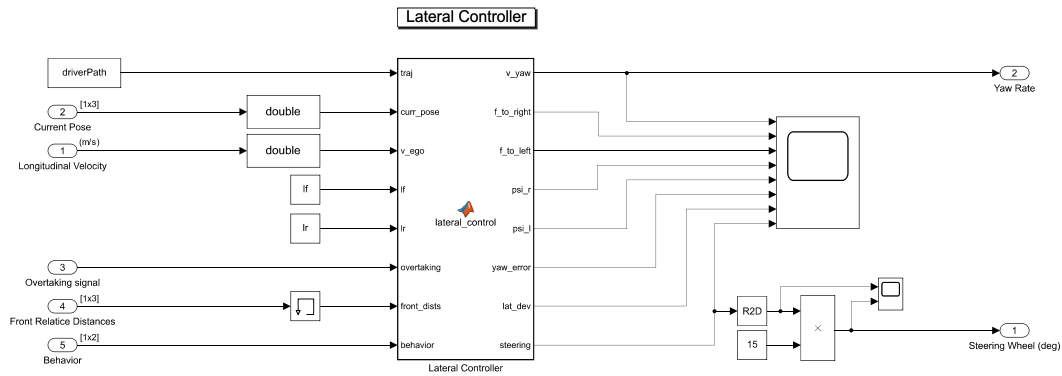


Figura 3.24: Blocos do subsistema do controlo lateral do veículo.

ângulo do volante serve para efeitos informativos. Para tal, este bloco precisa da pose atual do veículo, isto é, a posição e orientação, a velocidade longitudinal, os estilos de condução e ultrapassagem selecionados, o estado do sinal de ultrapassagem e da distância relativa ao veículo da frente de cada faixa.

Na figura 3.24 pode-se ver o bloco de código no interior do subsistema do controlo lateral. Aqui encontram-se as equações descritas na secção 3.2.2 e parte das equações da secção 3.2.3, relacionadas com o controlo lateral do veículo. Na parte direita da figura 3.24 encontra-se a conversão do ângulo das rodas para o ângulo do volante e ainda um bloco para visualização da evolução de algumas variáveis em tempo real.

3.3.3 Dinâmica do veículo

3.3.3.1 Cinemática direta

De modo a simular o comportamento do veículo sob o controlo dos algoritmos desenvolvidos, é necessário desenvolver um modelo que represente o seu comportamento, sobre efeito das regras de controlo definidas. Para isso foi utilizado um modelo cinemático baseado em Kong et al. (2015). Este foi o modelo utilizado por ser simples, e ao mesmo tempo completo o suficiente para este projeto, e por permitir colocar o ponto de referência do veículo em qualquer posição (centrada lateralmente) entre os eixos dianteiro e traseiro.

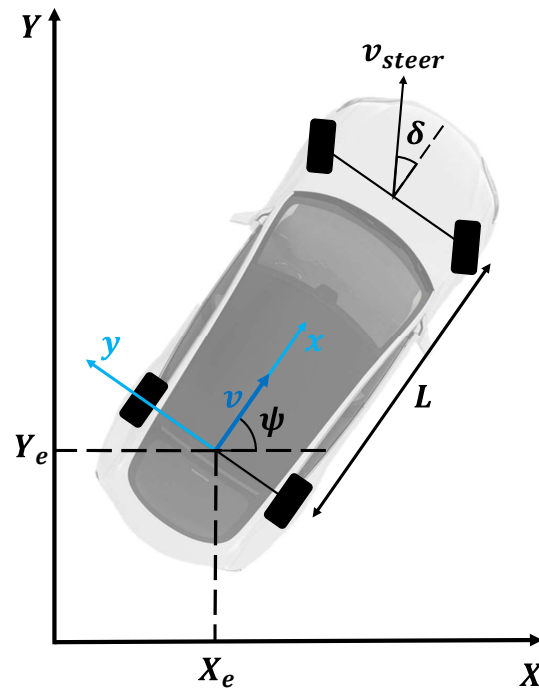


Figura 3.25: Representação do modelo cinemático do veículo.

Aqui, v representa a velocidade longitudinal, v_{steer} a velocidade aplicada nas rodas, δ a orientação das rodas direcionáveis, em relação ao referencial local fixado no eixo traseiro, e L a distância entre os eixos.

As equações que modelam a cinemática direta do veículo podem ver-se em 3.32.

$$\begin{aligned}\psi &= \int \dot{\psi} dt \\ v_X &= v_{steer} \cdot \cos(\psi + \delta) \\ v_Y &= v_{steer} \cdot \sin(\psi + \delta) \\ X_e &= \int v_X dt \\ Y_e &= \int v_Y dt \\ v_x &= v_{steer} \cdot \cos(\delta) \\ v_y &= v_{steer} \cdot \sin(\delta)\end{aligned}\tag{3.32}$$

3.3.3.2 Cinemática inversa

Após o desenvolvimento dos sistemas dinâmicos que definem o comportamento do veículo autónomo, é necessário calcular as variáveis de comando a aplicar nos seus atuadores. Para isso, é necessário definir

a cinemática inversa do veículo.

A equação 3.16 devolve diretamente a velocidade angular da orientação do veículo, ω . A velocidade longitudinal, v , é calculada integrando a equação 3.13.

Aplicando o modelo cinemática inversa do veículo obtêm-se os valores para as variáveis de atuação, v_{steer} e δ (Louro et al., 2019). L representa a distância entre os eixos do veículo:

$$\begin{aligned} v_{steer} &= \sqrt{v^2 + \omega^2 L^2} \\ \delta &= \arctan\left(\frac{\omega \cdot L}{v}\right) \end{aligned} \quad (3.33)$$

Aqui, v_{steer} representa a velocidade longitudinal nas rodas motrizes e δ simboliza o ângulo das rodas frontais. Estas equações mostradas em 3.33 são aplicadas após o cálculo das variáveis dos sistemas dinâmicos, a e ω , convertendo-as em variáveis que possam ser "entendidas" pelos atuadores.

As cinemáticas direta e inversa apresentadas foram inseridas no bloco exibido na figura 3.26.

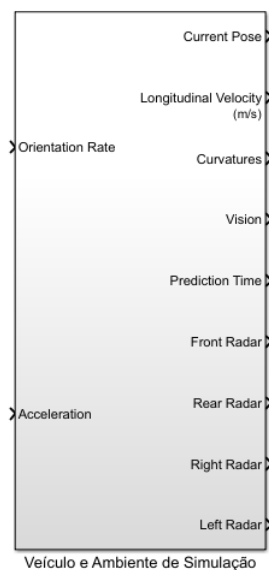


Figura 3.26: Bloco responsável pela dinâmica do veículo.

A figura 3.26 representa o subsistema que contém os modelos da cinemática direta e inversa do veículo autônomo, bem como a leitura dos dados do ambiente de simulação.

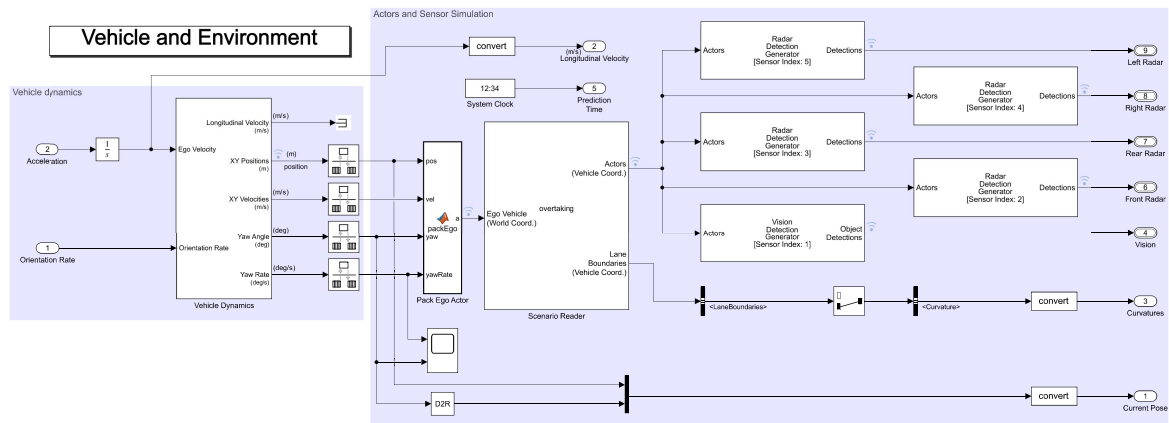


Figura 3.27: Blocos do subsistema da dinâmica do veículo.

Os blocos representados à direita na figura 3.27 estão encarregues da leitura da infraestrutura do ambiente de simulação do Matlab, bem como dos dados gerados pelos sensores de visão e de radar. Estes blocos foram, também, adaptados a partir do exemplo do controlo de velocidade adaptativa do Matlab.

Com vista a representar as dinâmicas do veículo foi desenvolvido o bloco da dinâmica do veículo, representado à esquerda na figura 3.27. Este bloco (*“Vehicle Dynamics”*) contém os algoritmos desenvolvidos com as cinemáticas inversa e direta. O primeiro tem como função converter os valores da aceleração longitudinal e da velocidade angular da orientação do veículo na velocidade das rodas e no ângulo de direção das rodas frontais, respetivamente. O segundo é responsável pela transformação destas últimas variáveis nos parâmetros necessários para a simulação, tais como a posição, orientação e velocidade longitudinal do veículo e as suas velocidades nos dois eixos cartesianos, com referência no mundo. A figura 3.28 ilustra o subsistema contido nesse bloco.

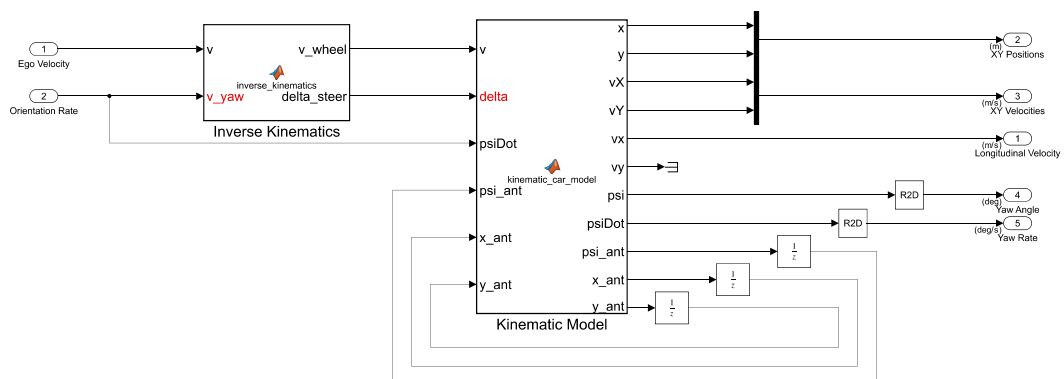


Figura 3.28: Cinemática direta e inversa do veículo.

3.3.4 Panorama geral

Juntando os três principais subsistemas mencionados anteriormente obtém-se um diagrama de blocos como se pode visualizar na figura 3.29. Este modelo permite carregar cenários projetados previamente na ferramenta *Driving Scenario Designer* do Matlab, de modo a analisar a condução do veículo autónomo nas mais variadas situações. Possui ainda uma interface com o utilizador, a qual mostra a velocidade do veículo, a orientação do volante e o nível de atuação no pedal do acelerador e do travão. Através de duas rodas seletoras é também possível escolher o estilo de condução e de ultrapassagem do veículo.

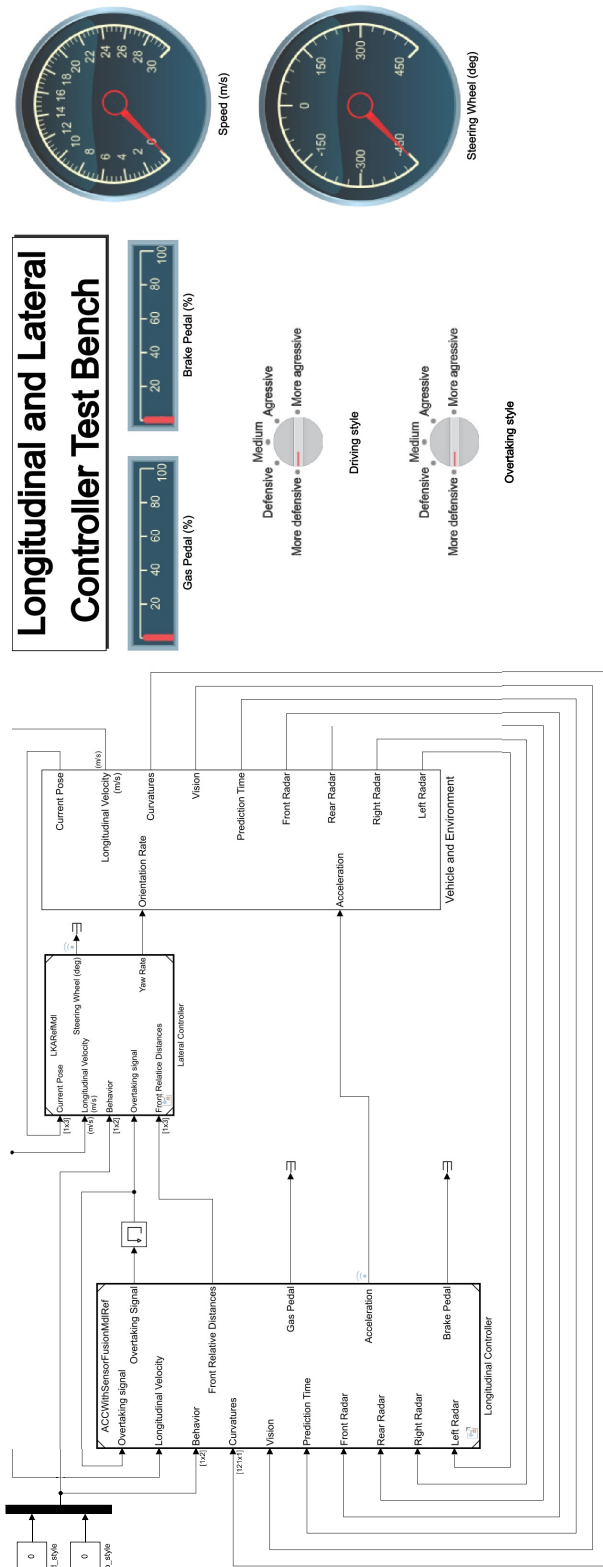


Figura 3.29: Sistema de condução autónoma realizado na ferramenta Simulink do Matlab.

3.4 Implementação em SILAB

SILAB é um software de simulação de condução profissional, desenvolvido para áreas ligadas à investigação e desenvolvimento, e é significativamente mais realista e imersivo que o apresentado pelo Matlab, permitindo uma melhor perceção do desempenho e do comportamento que o veículo autónomo teria no mundo real. De notar que se iniciou o desenvolvimento desta dissertação no Matlab pois era uma ferramenta em que eu já possuía mais experiência e, com isso, a progressão inicial seria mais rápida e simples. Quando os algoritmos desenvolvidos mostraram sinais de funcionamento, estes foram transferidos para o simulador SILAB, na sua versão 6.5.

Como é baseado numa implementação diferente da do Matlab, os algoritmos de controlo desenvolvidos necessitaram de várias adaptações para que pudessem ser exportados para o simulador SILAB. Dado que o SILAB já inclui um modelo para simulação do veículo, optou-se por não tentar adaptar e colocar o modelo cinemático desenvolvido neste simulador, pois é bastante mais complexo e exigiria um grande investimento de tempo para o fazer.



Figura 3.30: Software de simulação de condução SILAB (Wivw GmbH-Silab, 2018).

Tendo em conta que a base dos algoritmos é a mesma que tem vindo a ser explicada ao longo deste capítulo, esta secção irá abordar apenas as adaptações necessárias para o funcionamento neste novo simulador e também as afinações que foram realizadas.

Os algoritmos foram reorganizados num maior número de módulos, de forma a tornar a implementação mais modular e reutilizável. Para isso, foram então desenvolvidos scripts, usando a linguagem de programação Ruby, pois é uma das linguagens compatíveis com o SILAB. Relativamente ao controlo

longitudinal já explicado, foi adicionado um módulo, disponibilizado por este novo simulador, responsável por calcular os níveis dos pedais do acelerador e do travão, de modo a que o veículo adquirisse a aceleração longitudinal calculada pelo módulo de controlo longitudinal. Este módulo necessita, então, como entradas, as características do veículo, a sua velocidade, a inclinação da estrada e a aceleração pretendida. À saída, fornece os níveis de acelerador e travão. Quanto ao controlo lateral, a referência deixou de ser uma trajetória predefinida, pois tal não pode ser obtido com este software, passando a ser o centro da faixa de rodagem, segundo o qual podem ser obtidos o desvio lateral e a sua orientação. Além disso, foi necessário ter em consideração os sinais do desvio lateral e da orientação do veículo, pois as convenções são inversas às do Matlab. Neste simulador o desvio à direita e a orientação no sentido horário são considerados positivos. As convenções são, também, inversas, dependendo do sentido de trânsito da faixa.

Como deixou de existir uma trajetória de referência, o módulo responsável pelas manobras de ultrapassagem teve de ser reformulado. Para tal, a nova solução passou por adicionar um deslocamento ao desvio lateral, fazendo com que o veículo autónomo se deslocasse para a esquerda ou para a direita, de acordo com a faixa para a qual se pretendesse transitar. Este deslocamento, *offset*, pode ser visto como a distância a que se pretende que o veículo se encontre desviado do centro da faixa inicial, e varia em função da distância temporal, *ttc*, medida em relação ao veículo que se pretende ultrapassar. O seguinte conjunto de equações permite parametrizar a função que regulará o trajeto que o carro realizará durante a transição para a faixa da esquerda.

$$ttc = \frac{d_{rel}}{v - v_{cf}} \quad (3.34)$$

Na equação 3.34 é calculado o valor da distância temporal instantâneo ao veículo da frente, *ttc*, também conhecido como *time to contact*.

$$ttc_i = ttc \cdot (1 - 0.2 \cdot estilo_{ultr}) \quad (3.35)$$

Na equação 3.35 é calculada a distância temporal no início da ultrapassagem. Este valor varia em função do estilo de condução.

$$ttc_f = ttc_i \cdot 0.2 \cdot estilo_{ultr} \quad (3.36)$$

Na equação 3.36 é calculada a distância temporal no final da transição de faixa. Este valor também varia em função do estilo de condução.

$$ttc_m = ttc_f + \frac{ttc_i - ttc_f}{2} \quad (3.37)$$

Na equação 3.37 é calculada a distância temporal no ponto intermédio entre as duas distâncias temporais ttc_i e ttc_f . Estes três valores permitem projetar uma função sigmóide que passe nos pontos desejadas nos instantes de de tempo desejados.

$$v_{trans} = \frac{\ln\left(\frac{largfaixa}{0.005} - 1\right)}{ttc_i - ttc_m} \quad (3.38)$$

Na equação 3.38 é calculada a velocidade lateral para o veículo no momento em que este cruza a linha separadora das duas faixas, de modo a que, no início da ultrapassagem, o valor do *offset* seja próximo de zero. *largfaixa* representa o valor da largura de cada faixa da estrada. Para chegar a esta função basta resolver a equação da função sigmóide padrão em ordem a k , como demonstra a equação 3.39.

$$f(t) = \frac{amplitude}{1 + e^{k(t-t_0)}} \quad (3.39)$$

$$\Leftrightarrow k = \frac{\ln\left(\frac{amplitude}{f(t)} - 1\right)}{t - t_0}$$

Aqui, t_0 representa o tempo em que a sigmóide atinge o valor intermédio e $(t, f(t))$ representam um par de coordenadas que se pretende que a função alcance.

$$offset = \frac{largfaixa}{1 + e^{v_{trans}(ttc-ttc_m)}} \quad (3.40)$$

Na equação 3.40 é calculado o valor do offset. O valor do offser será adicionado ao valor do desvio lateral, o que faz com que o veículo mude de faixa segundo a função desejada. A figura 3.31 ilustra o propósito destas equações.

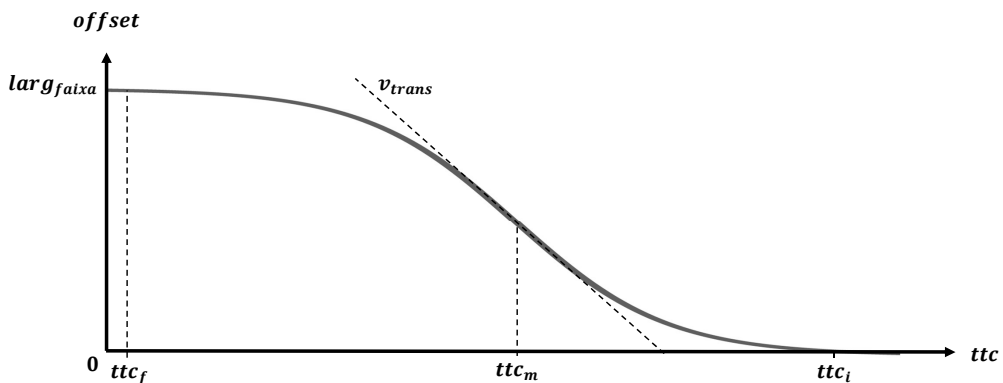


Figura 3.31: Exemplo da variação do offset em função dos parâmetros calculados.

Resumindo, todos estes parâmetros são calculados para ser possível projetar, para cada ultrapassagem, uma função ótima que dirá como o veículo vai transitar para a faixa da esquerda, iniciando e finalizando nos momentos desejados. A figura 3.32 ilustra graficamente a equação 3.40.

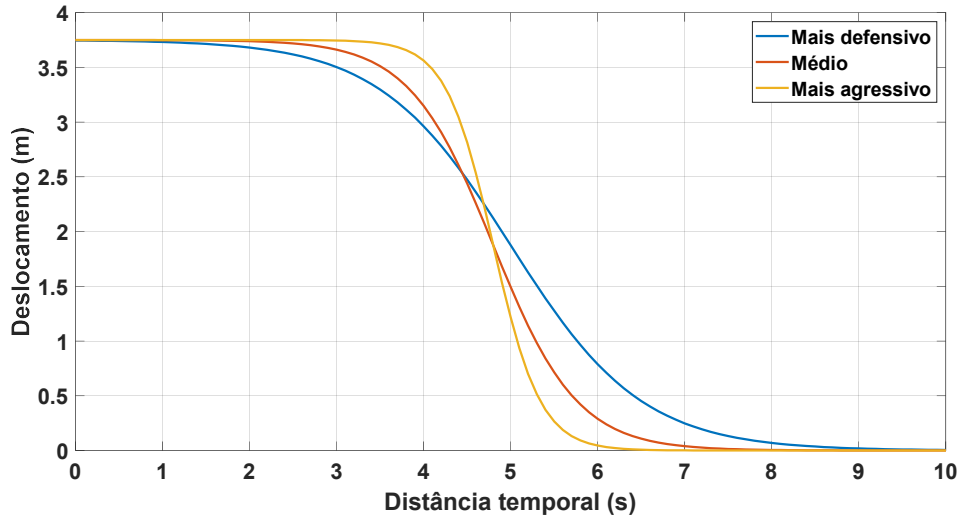


Figura 3.32: As condições são as mesmas mas os estilos de ultrapassagem são diferentes, durante a transição para a faixa da esquerda.

Como se pode observar no exemplo demonstrado na figura 3.32, à medida que o veículo autônomo se vai aproximando do veículo da frente, a distância temporal vai diminuindo, fazendo o deslocamento aumentar. Os momentos em que o deslocamento inicia e termina dependem, nesta situação, apenas do estilo de ultrapassagem selecionado, dado que as três ultrapassagens deste exemplo foram realizadas nas mesmas condições. No entanto, na realidade, as condições em que as ultrapassagens são executadas variam e essas condições afetam também o valor de ttc_i , provocando funções de deslocamento diferentes.

Após o veículo ser ultrapassado é utilizada uma função semelhante para a transição para a via da direita. No entanto, esta função de retorno passa a depender apenas da distância percorrida pelo veículo autônomo após o sinal de retorno ser dado. As equações seguintes demonstram como estes cálculos são realizados.

$$d_{ret} = (15 - 10 \cdot estilo_{ultr}) \cdot v \quad (3.41)$$

Na equação 3.44 é calculada a distância que será percorrida durante o retorno à faixa da direita, que varia em função da velocidade do veículo e do estilo de ultrapassagem selecionado.

$$d_m = \frac{d_{ret}}{2} \quad (3.42)$$

Na equação 3.42 é calculada a distância intermédia da ultrapassagem para que, na equação 3.43, seja calculado o valor da velocidade lateral do veículo nesse momento, tal como foi explicado anteriormente para as transições para a faixa da esquerda.

$$v_{trans} = \frac{\ln\left(\frac{largfaixa}{0.005} - 1\right)}{d_{ret} - d_m} \quad (3.43)$$

O que se pretende é encontrar o valor de v_{trans} que permita que a função *offset* tenha o valor de 0.005 metros quando o veículo tiver percorrido a distância de retorno, d_{ret} , e, ao mesmo tempo, que o seu ponto intermédio seja atingido na distância d_m . O valor 0.005 foi escolhido por estar suficientemente próximo de zero, de modo a não gerar uma oscilação brusca na orientação do veículo no fim de percorrer a distância de retorno, nem demasiado próximo de zero, pois abaixo de um determinado valor a variação função sigmóide é praticamente nula e isso não é útil para esta situação.

Na equação 3.44 é, então, calculada a função do deslocamento que regerá a forma como o veículo regressa à faixa da direita.

$$offset = \frac{largfaixa}{1 + e^{v_{trans}(d-d_m)}} \quad (3.44)$$

Aqui, d corresponde à distância desde que o veículo inicia a transição para a faixa da direita. Para que o veículo adquira o deslocamento lateral calculado, esse valor é adicionado ao valor do desvio lateral, como mostra a equação 3.45.

A figura 3.33 ilustra graficamente a equação 3.44.

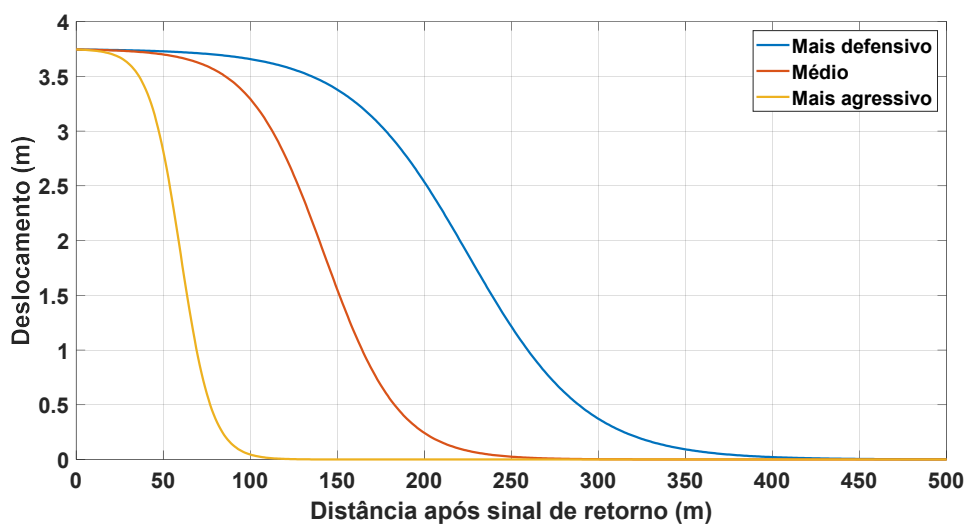


Figura 3.33: As condições são as mesmas mas os estilos de ultrapassagem são diferentes, durante o regresso à faixa da direita.

Como se observa, à medida que o veículo vai avançando, o valor do deslocamento vai diminuindo até atingir o valor zero quando chega ao centro da faixa da esquerda. Os momentos em que o deslocamento inicia e termina dependem, nesta situação, apenas do estilo de ultrapassagem selecionado, dado que as três ultrapassagens deste exemplo foram realizadas nas mesmas condições. No entanto, na realidade, as condições em que as ultrapassagens são executadas variam e essas condições afetam também o valor de d_{ret} , provocando funções de deslocamento diferentes.

$$des_{lat} = des_{lat} + offset \quad (3.45)$$

Além do que já estava desenvolvido, foi adicionada ainda a possibilidade de controlar manualmente o veículo, bem como uma suave transição entre os modos manual e automático. Foi também necessário proceder a algumas afinações em alguns ganhos dos sistemas.

Resultados

Ao longo do desenvolvimento do projeto, foram realizados vários testes experimentais com o objetivo de validar as etapas. Neste capítulo irão ser demonstrados os testes elaborados bem como os seus respetivos resultados. Além disso, estes últimos serão objeto de uma reflexão crítica.

Deste modo, e de maneira a organizar este capítulo, os testes serão divididos em três secções. A primeira aborda os testes e resultados do controlador longitudinal, tais como o seguimento da velocidade recomendada, a manutenção da distância lateral e a redução da velocidade em curva. A segunda secção trata os testes e resultados do controlador lateral, nomeadamente a anulação do desvio lateral, o seguimento da orientação da estrada e a manobra de ultrapassagem. A terceira secção deste capítulo fala sobre os testes e resultados do ajuste do estilo de condução. Por fim, a última secção aborda a recolha dos dados dos testes realizados com os participantes e a análise estatística dos mesmos.

Todos os testes foram feitos com a implementação no simulador SILAB.

4.1 Controlo longitudinal

Nesta secção são detalhados os resultados das três tarefas do controlador longitudinal com o objetivo de demonstrar que a velocidade do veículo converge para o valor recomendado, que a distância de segurança para os veículos da frente é mantida e que há uma redução da velocidade nas curvas, mantendo a aceleração lateral abaixo dos limites definidos.

4.1.1 Seguimento da velocidade recomendada

Este teste teve como objetivo validar a convergência do valor da velocidade longitudinal do veículo autônomo para o valor da velocidade recomendada.

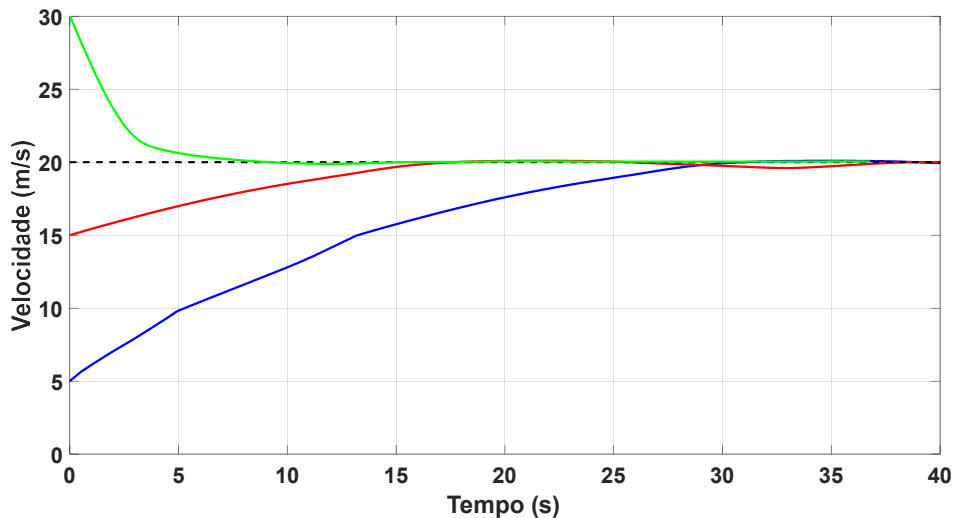


Figura 4.1: Convergência da velocidade do veículo para o valor recomendado a partir de três velocidades iniciais diferentes.

Analisando a figura 4.1 pode ver-se que, independentemente da sua velocidade inicial, a velocidade do veículo foi convergindo gradualmente até atingir o valor desejado, que neste teste foi de 20 m/s. A rapidez com que a velocidade converge pode, ainda, ser variada, consoante o estilo de condução praticado. no caso do gráfico verde, em que o estilo de condução do veículo era agressivo, a velocidade convergiu para o valor desejado mais rapidamente do que no caso do gráfico vermelho, em que o estilo de condução do veículo era defensivo, apesar do erro inicial ser maior.

4.1.2 Manutenção da distância de segurança

O propósito deste teste foi verificar se, na situação em que surge um veículo à frente que circule a uma velocidade relativamente reduzida, o veículo autônomo mantém a distância próxima do valor mínimo de segurança.

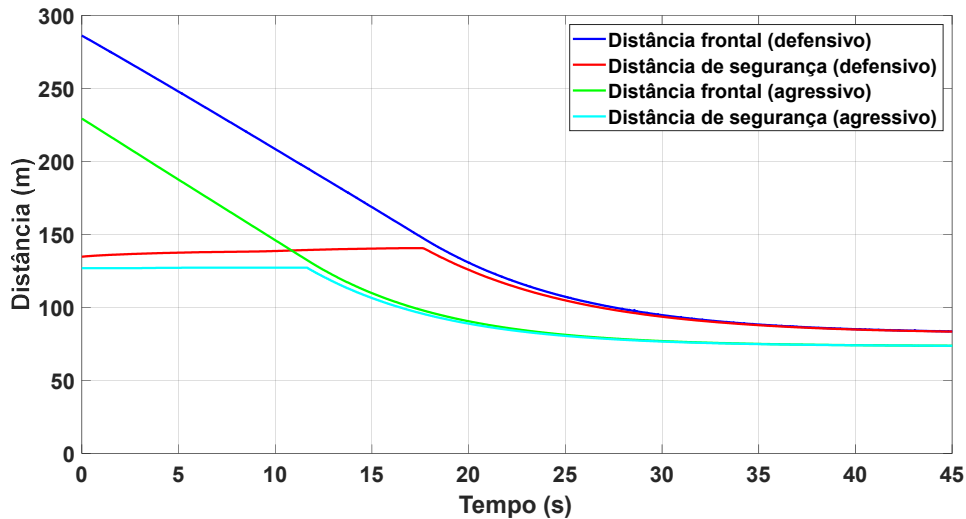


Figura 4.2: Manutenção do valor da distância de segurança recomendado, em dois estilos de condução diferentes.

Na figura 4.2 verifica-se que, tanto no estilo defensivo como no agressivo, o veículo autónomo foi capaz de manter a distância de segurança relativamente ao veículo da frente. A distância de segurança entre os dois veículos é menor no estilo de condução agressivo, como se pretende.

O veículo autónomo seguia, no início, com uma velocidade desejada de 33.3 m/s, enquanto que a do veículo da frente era de apenas 25 m/s. No final, quando a distância entre os dois veículos atingiu o valor desejado, a velocidade do veículo autónomo tinha alcançado aproximadamente a mesma velocidade do veículo da frente, como demonstra a figura 4.3.

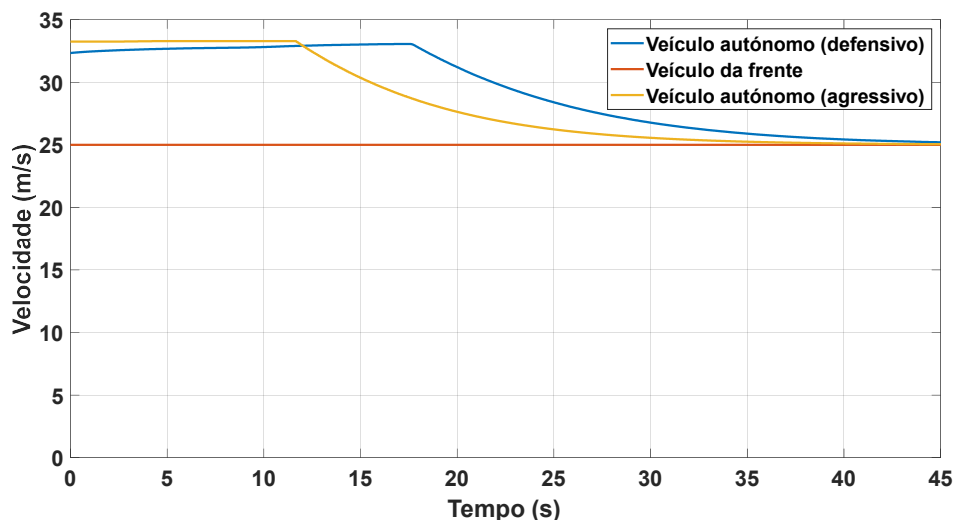


Figura 4.3: Convergência da velocidade do veículo autónomo para a velocidade do veículo da frente, em dois estilos de condução diferentes.

O teste foi concluído com sucesso, com a distância relativa entre os dois veículos a convergir para o valor mínimo recomendado.

4.1.3 Redução da velocidade em curva

Como explicado anteriormente, a velocidade do veículo em curva deve ser limitada pelo raio de curvatura. Para testar isso foi realizado um teste para analisar a variação da velocidade do veículo. A estrada desenhada para o teste continha duas curvas, antecedidas e sucedidas por troços em linha reta, cada um com uma extensão aproximada de 150 metros. As duas curvas eram de 80 graus, tendo a primeira um raio de 40 metros e a segunda um raio de 70 metros.

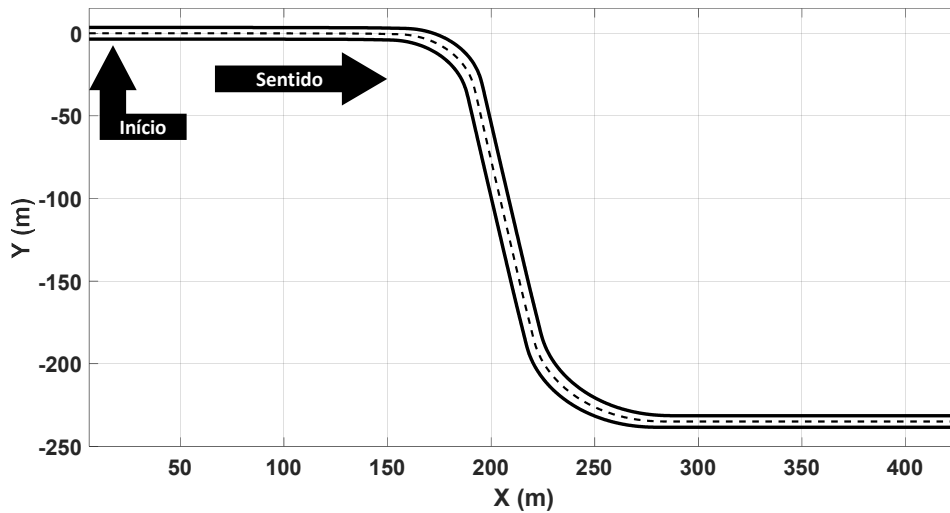


Figura 4.4: Percurso percorrido pelo veículo no teste.



(a) Primeira curva



(b) Segunda curva

Figura 4.5: Curvas utilizadas no cenário de teste.

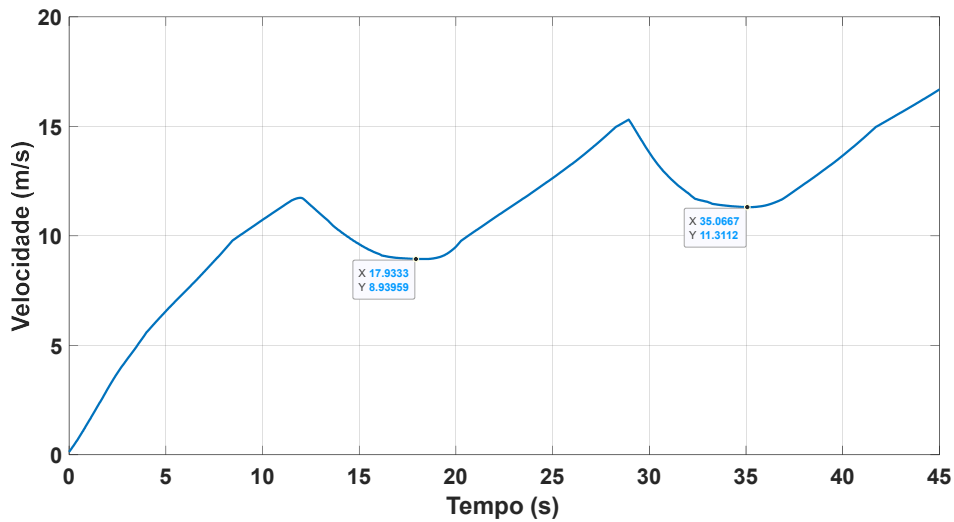


Figura 4.6: Diminuição do valor da velocidade durante a realização de duas curvas com raio diferente.

O veículo partiu com a velocidade inicial nula. Ao aproximar-se da primeira curva verificou-se que a velocidade foi diminuindo, até atingir o valor mínimo de 8.9 m/s (32 km/h) no início da curva. Ao sair da curva, a velocidade voltou a convergir gradualmente para o valor recomendado, que era 33.3 m/s (120 km/h). Ao aproximar-se da segunda curva, a velocidade tornou a baixar, até atingir o valor mínimo de 11.3 m/s (41 km/h) no início da curva. Ao sair da curva, a velocidade tornou a convergir gradualmente para o valor recomendado, embora o comprimento da estrada não permitisse que a velocidade o chegasse a alcançar.

A redução da velocidade na proximidade da curva permitiu manter o valor absoluto da aceleração lateral do veículo abaixo do valor máximo definido, que neste caso era de 2 m/s^2 , como demonstra a figura 4.7.

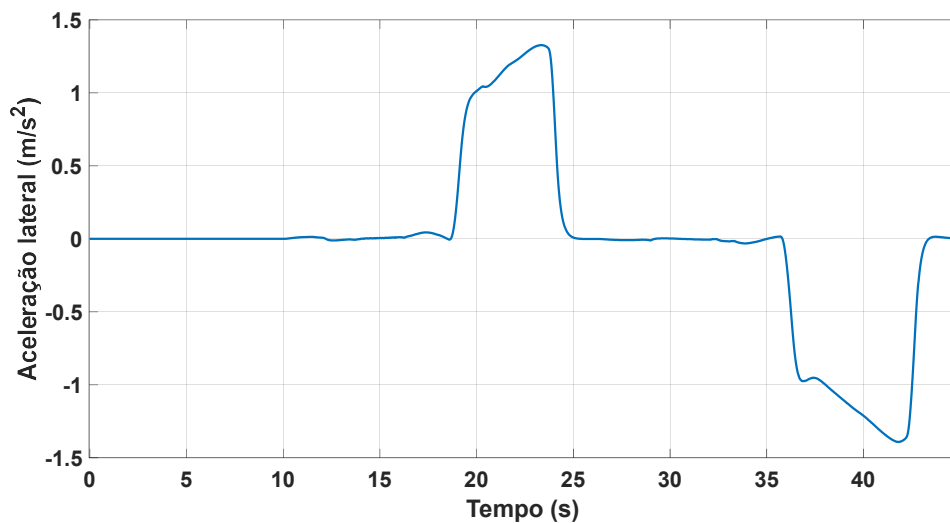


Figura 4.7: Gráfico da aceleração lateral durante a realização do teste.

Com isto foi possível validar a limitação da velocidade nas curvas, de modo a tornar a viagem dos utilizadores mais confortável.

4.2 Controlo lateral

4.2.1 Anulação do desvio lateral

De modo a verificar se o desvio lateral entre a posição do veículo autónomo e a trajetória convergia para zero, foi realizado um teste para verificar o comportamento do veículo quando este partia inicialmente de uma posição afastada da trajetória.

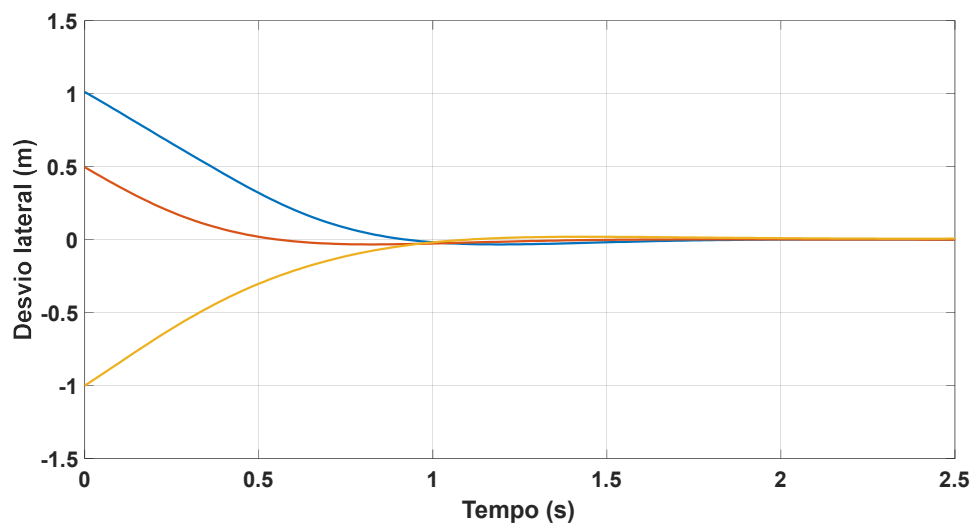


Figura 4.8: Gráfico da evolução do desvio lateral, com três diferentes desvios iniciais.

Nesta experiência, o carro partiu com desvios laterais de 0.5 e 1 metros à direita e 1 metro à esquerda. Como era previsto, ao longo do tempo, o controlador lateral foi anulando esses erros de forma suave, como é visível na figura 4.8.

4.2.2 Seguimento da orientação da trajetória

Neste teste pretendeu-se verificar se, na presença de um erro entre as orientações do veículo e da trajetória, o mesmo tinha a capacidade de o anular.

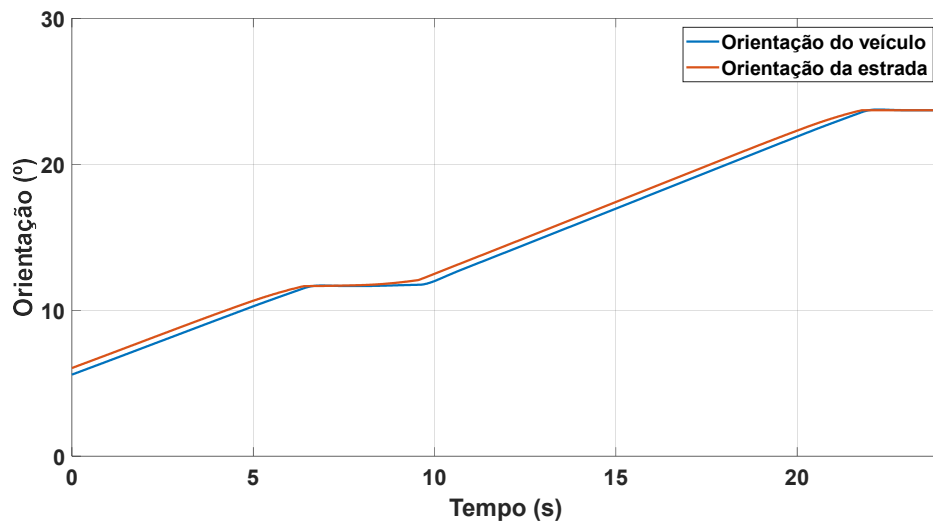


Figura 4.9: Gráfico da evolução das orientações da estrada e do veículo durante a realização do teste.

Este teste consistiu numa estrada com duas curvas, que o veículo teria de percorrer. Como se vê no gráfico da figura 4.9, o controlador fez a orientação do veículo seguir de perto a orientação da estrada, como era expectável, mantendo um erro muito reduzido, que no máximo foi de 0.46 graus.

4.2.3 Ultrapassagem

Para este teste foi desenhado um cenário que consistia numa estrada em linha reta com uma grande extensão. Nela existem duas faixas de rodagem com o mesmo sentido, sendo que na da direita seguem o veículo autónomo e um outro veículo mais à frente. O veículo autónomo circula com uma velocidade recomendada de 33.3 m/s, enquanto que o segundo veículo segue a 25 m/s. Deste modo, o veículo autónomo terá uma boa oportunidade para realizar uma ultrapassagem, pois a via da esquerda está sempre livre.

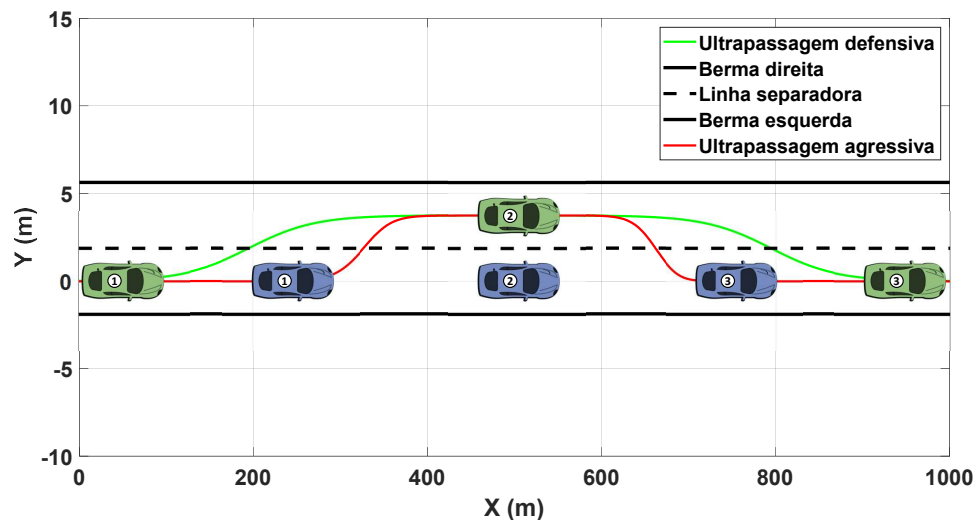


Figura 4.10: Trajetória percorrida pelo veículo autónomo durante a ultrapassagem, com dois estilos de condução diferentes.

Na figura 4.10, podemos ver um esboço do cenário desenvolvido, bem como as trajetórias percorridas pelo veículo autónomo. O veículo verde representa o veículo autónomo e o azul representa o veículo a ultrapassar. Estão também identificados os momentos antes, durante e após a manobra. Como se verifica, o veículo foi capaz de ultrapassar o segundo veículo que seguia a uma velocidade mais reduzida nas duas diferentes trajetórias de ultrapassagem.

De referir que a ultrapassagem é iniciada no momento em que o veículo autónomo teria de abrandar, caso não pudesse ultrapassar. Com isto, diminui-se o desperdício da energia cinética do veículo.

4.3 Ajuste do estilo de condução

Para se verificar e validar todos os efeitos que a alteração do estilo de condução deve ter no comportamento do veículo autónomo foi necessário recorrer a três cenários. Em cada um deles foram executados três testes, com estilos de condução defensivo, médio e agressivo.

O primeiro cenário consistia numa longa estrada com duas vias do mesmo sentido. Além do veículo autónomo, circulava mais um veículo, a 25 m/s (90 km/h), na faixa da direita. O cenário encontra-se representado na figura 4.11. Com este cenário pretendeu-se comparar a transição de faixa de rodagem durante a ultrapassagem entre os diferentes estilos de condução.

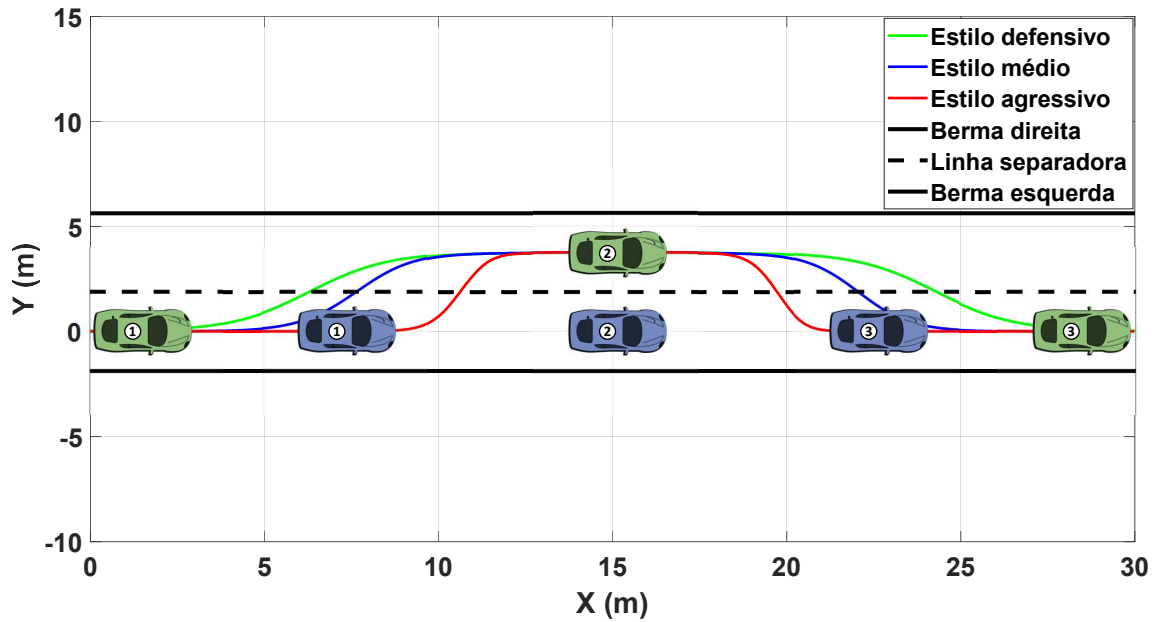


Figura 4.11: Variação da transição de faixa em função do estilo de ultrapassagem.

Nas ultrapassagens espera-se que as transições de faixa sejam mais suaves em estilos mais defensivos e mais bruscas em estilos mais agressivos. No teste realizado, representado na figura 4.11, verificou-se isso mesmo.

O segundo cenário tinha como base o primeiro. No entanto, neste, existiam veículos que transitavam na faixa da esquerda e que impediam momentaneamente a ultrapassagem do veículo autônomo. Com este cenário pretendeu-se comparar a evolução da aceleração longitudinal e da distância mantida em relação ao veículo da frente entre os diferentes estilos de condução.

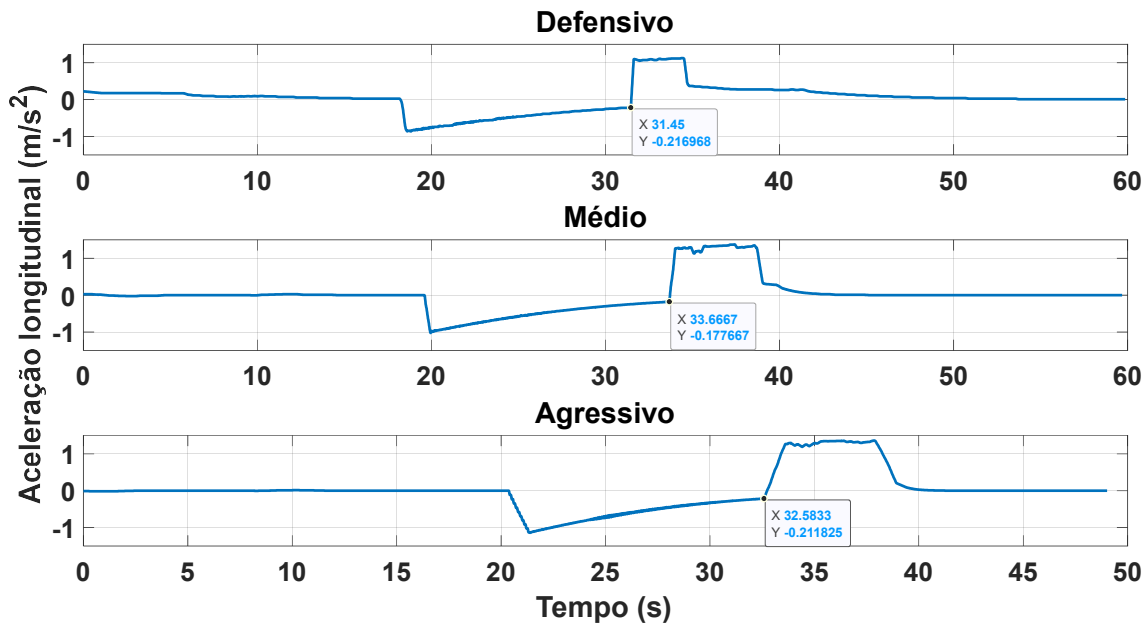


Figura 4.12: No gráfico de cima encontra-se o teste com estilo de condução defensivo, no gráfico do meio encontra-se o teste com estilo de condução médio e no gráfico de baixo encontra-se o teste com estilo de condução agressivo.

No início, a aceleração longitudinal do veículo é aproximadamente nula pois o veículo segue à velocidade recomendada, 33.3 m/s (120 km/h). A dada altura o veículo autónomo encontra à sua frente o veículo que segue a 25 m/s (90 km/h), mas não o pode ultrapassar pois, nesse momento, seguem quatro veículos na faixa da esquerda. Isso explica a desaceleração que se observa perto dos 20 segundos. Quando os veículos da esquerda avançam (momento assinalado nos gráficos da figura 4.12) e a faixa fica livre, o veículo autónomo inicia a ultrapassagem e a aceleração torna-se positiva. Esse momento encontra-se assinalado nos gráficos. Eventualmente este atinge a velocidade recomendada e a aceleração longitudinal anula-se. Como a figura 4.12 demonstra, a aceleração longitudinal do veículo autónomo assume, na generalidade do tempo, valores maiores em módulo quanto mais agressivo é o estilo de condução, tal como seria pretendido. De notar que as descontinuidades existentes nos gráficos da aceleração após segundos depois do início da ultrapassagem se devem à alteração da relação engrenada na caixa de velocidades automática e que é controlada exclusivamente pelo software do simulador.

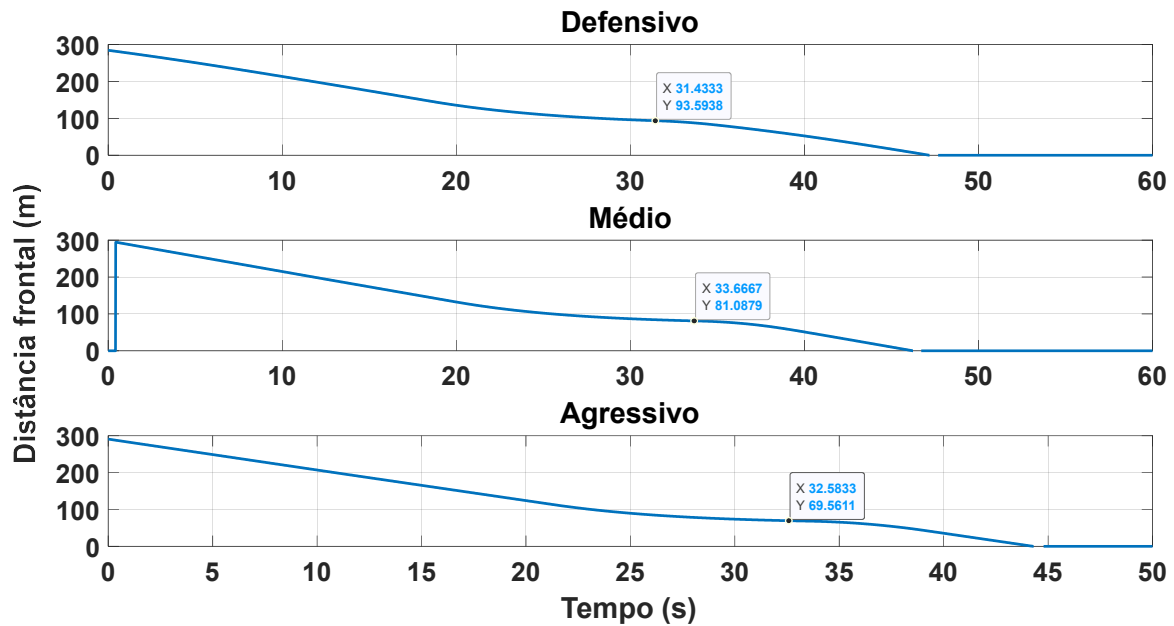


Figura 4.13: No gráfico de cima encontra-se o teste com estilo de condução defensivo, no gráfico do meio encontra-se o teste com estilo de condução médio e no gráfico de baixo encontra-se o teste com estilo de condução agressivo.

Na figura 4.13 estão assinalados os valores da distância relativa frontal nos momentos em que o veículo autónomo inicia a ultrapassagem. Como se pode observar, quanto mais agressivo é o estilo de condução do veículo autónomo, menor é a distância a que este seguia atrás do veículo frontal, no momento da ultrapassagem. Neste exemplo, seguia à sua frente um veículo a uma velocidade de 25 m/s. No caso do estilo mais agressivo, a distância relativa no instante em que o veículo inicia a ultrapassagem situa-se próxima dos 69 metros, enquanto que no estilo mais defensivo esta distância sobe para os 93 metros. Este comportamento é o que se pretende: em estilos mais agressivos os veículos tendem a aproximarem-se mais dos veículos da frente.

O terceiro cenário foi o mesmo que se encontra representado na figura 4.4. Com este cenário pretendeu-se comparar a evolução da aceleração lateral e o desvio lateral em relação ao centro da faixa, durante a realização de curvas, entre os diferentes estilos de condução.

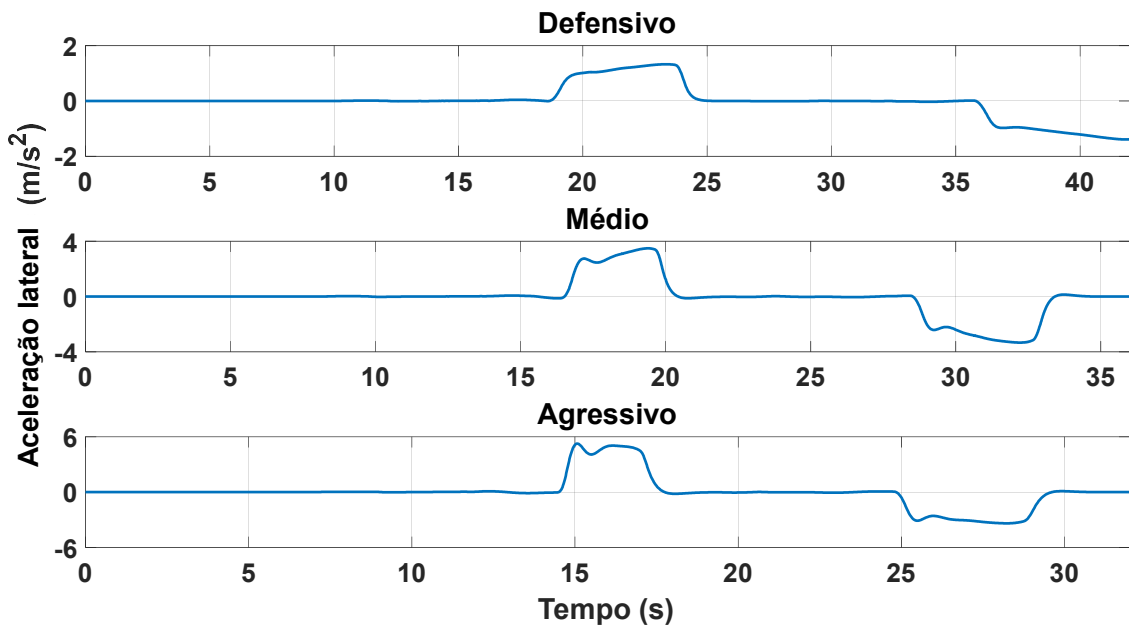


Figura 4.14: No gráfico de cima encontra-se o teste com estilo de condução defensivo, no gráfico do meio encontra-se o teste com estilo de condução médio e no gráfico de baixo encontra-se o teste com estilo de condução agressivo.

Na figura 4.14 verifica-se que a aceleração lateral sentida vai aumentando com o aumento da agressividade do estilo de condução, tal como é pretendido, pois o veículo realiza a curva a velocidades diferentes.

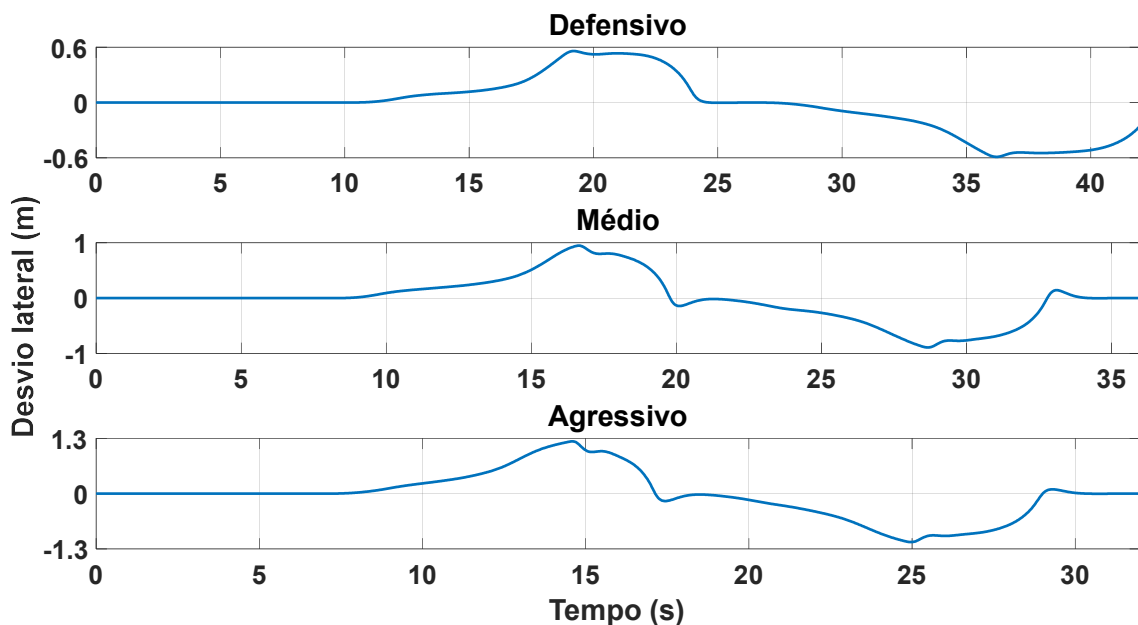


Figura 4.15: No gráfico de cima encontra-se o teste com estilo de condução defensivo, no gráfico do meio encontra-se o teste com estilo de condução médio e no gráfico de baixo encontra-se o teste com estilo de condução agressivo.

Relativamente à abordagem a curva é esperado que o veículo autónomo se aproxime mais do limite da faixa de rodagem onde segue quanto maior for a agressividade do estilo de condução. Tendo em

conta que o veículo tem 1.6 metros de largura e a faixa tem 4.2 metros de largura, o desvio lateral máximo a que o veículo pode estar do centro da faixa, sem pisar as linhas delimitadoras da faixa, é de 1.3 metros. Analisando o gráfico da figura 4.15, percebe-se que, durante a realização das curvas, o veículo se aproximou mais do limite lateral da faixa nos estilos de condução mais agressivos, sem que em momento algum tenha saído fora da sua faixa.

Os resultados destes testes provaram que o veículo autónomo foi capaz de variar o seu comportamento em várias tarefas da condução, bastando simplesmente ajustar os parâmetros do estilo de condução para o valor pretendido.

4.4 Teste com participantes

O objetivo final desta dissertação prende-se com a validação da solução implementada por parte de utilizadores. Para isso procedeu-se à realização de testes dos algoritmos em ambiente de simulação. Mais concretamente, foi feita uma recolha de dados com um grupo de participantes que avaliaram a perceção do nível de agressividade da condução do veículo autónomo, ao longo de uma trajetória predefinida. Por questões de simplicidade, e também porque, através desta manobra, é possível verificar todos os fatores que caracterizam a agressividade do veículo autónomo, nesta fase procedeu-se apenas à avaliação da manobra de ultrapassagem. Esta é uma das que mais frequentemente se observa na estrada e que tem um carácter crítico para a segurança. Assume-se assim que a sua avaliação é particularmente relevante. Esta recolha de dados foi realizada num simulador de condução instalado numa sala no Centro de Computação Gráfica. Esta sala continha a estrutura física de um automóvel, nomeadamente os dois bancos da frente, volante, pedais, retrovisores e indicador de velocidade. Na frente existe uma tela de projeção curva com uma extensão suficientemente grande para ocupar todo o campo de visão do condutor. Na figura 4.16 pode ver-se uma fotografia retirada durante a realização de um dos testes.



Figura 4.16: Simulador de condução utilizado nos testes.

4.4.1 Método

A experiência desenvolvida consiste num cenário de autoestrada, com duas faixas de rodagem para cada sentido. Todo o percurso foi dividido em doze troços diferentes. Todos eles têm em comum um veículo, na faixa da direita, que segue a uma velocidade inferior à do veículo autónomo. Cada troço possui uma configuração diferente no que toca à velocidade do veículo que segue na faixa da direita, à existência de veículos a viajar, no mesmo sentido, na faixa da esquerda e ao estilo de condução do veículo autónomo. A tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 demonstram todas as condições que variam em cada troço.

Tabela 4.1: Características dos troços em que o veículo autónomo apresenta um estilo de condução agressivo.

		Velocidade do veículo na faixa da direita (km/h)	
		90	70
Presença de veículos na faixa da esquerda	Não	Troço 1	Troço 2
	Sim	Troço 3	Troço 4

Tabela 4.2: Características dos troços em que o veículo autónomo apresenta um estilo de condução defensivo.

		Velocidade do veículo na faixa da direita (km/h)	
		90	70
Presença de veículos na faixa da esquerda	Não	Troço 5	Troço 6
	Sim	Troço 7	Troço 8

Tabela 4.3: Características dos troços em que o veículo autónomo apresenta um estilo de condução médio.

		Velocidade do veículo na faixa da direita (km/h)	
		90	70
Presença de veículos na faixa da esquerda	Não	Troço 9	Troço 10
	Sim	Troço 11	Troço 12

Cada uma das faixas possui 3.75 metros de largura. De modo a assegurar uma boa visibilidade da estrada, o ambiente virtual em torno da mesma é preenchido com algumas árvores afastadas, pelo menos, 30 metros das bermas. O percurso tem, no total, cerca de 24 quilómetros de extensão e cerca de 15 minutos de duração. A figura 4.17 ilustra o cenário desenvolvido.



Figura 4.17: Cenário desenvolvido para o teste.

Cada troço pode, ainda, diferir no perfil da estrada, isto é, se é em reta ou em curva, de forma a conferir mais realismo à simulação, embora esta condição não deva afetar a avaliação do utilizador. O perfil da estrada é definido aleatoriamente para cada troço. O objetivo é fazer os participantes passarem por todas situações que permitam julgar o estilo de condução do veículo, tais como:

- Acelerações

- Desacelerações
- Transições de faixa
- Variações da distância mantida em relação aos outros veículos

4.4.2 Procedimento

Os participantes foram recebidos pelo responsável da experiência e introduzidos à sala onde se realizaria o teste. Os objetivos gerais do ensaio foram então explicados. Posteriormente, os participantes leram e assinaram o formulário de consentimento de recolha de dados, caso concordassem. Ainda antes de iniciarem os testes, preencheram um questionário sobre as suas características sociodemográficas e outro acerca dos enjoos (o simulador de condução pode ter efeitos nauseogénicos). Finalizada esta fase inicial, os participantes foram convidados a sentarem-se no lugar do condutor e a ajustar o banco para uma posição confortável. Foi-lhes ainda indicado para avisarem caso se comesçassem a sentir maldispostos ou enjoados, de modo a suspender o teste.

Dado o início do teste, os participantes foram “conduzidos” pelo veículo autónomo ao longo dos doze troços mencionados anteriormente. A ordem pela qual os troços foram ordenados foi aleatorizada para cada participante. Durante o teste, e após cada troço, foi pedido aos participantes para avaliarem verbalmente a agressividade da condução, numa escala de 1 a 10, correspondendo o valor 1 a “defensivo” e 10 a “agressivo”.

No final, os participantes preencheram de novo o questionário sobre os enjoos e, ainda, um pequeno questionário final, com duas perguntas de resposta aberta, de modo a validar as suas avaliações dadas durante o teste.

4.4.3 Parametrização dos três estilos de condução

Para este teste foram utilizados três estilos de condução para o veículo autónomo: defensivo, médio e agressivo. De modo a verificar que estes estavam devidamente parametrizados, antes de avançar com os testes com todos os participantes, foi realizado um teste piloto com dois participantes.

Os resultados deste teste piloto revelaram que os estilos médio e agressivo destacavam-se muito pouco do estilo defensivo, como é visível na tabela 4.4. Por isso, a agressividade desses dois estilos foi aumentada, mudando alguns parâmetros como a distância de segurança e a aceleração máxima.

Tabela 4.4: Avaliações dos troços de um dos participantes do teste piloto.

N.º troço	Avaliação participante	Estilo de condução
6	2	Defensivo
12	3	Médio
9	2	Médio
11	2	Médio
4	3	Agressivo
7	2	Defensivo
8	3	Defensivo
5	2	Defensivo
2	3	Agressivo
3	3	Agressivo
10	2	Médio
1	3	Agressivo

Ao extremar os estilos de condução há maiores garantias que os participantes notarão as diferenças entre eles, tal como é esperado.

4.4.4 Participantes

Nesta experiência participaram 15 pessoas, sendo apenas uma do sexo feminino. Os participantes eram, na sua maioria, alunos de mestrado, com idade média de 23.9 anos e desvio padrão de 3 anos. Apenas um não possuía carta de condução. Entre aqueles que a tinham, tinham-na, em média, há mais de 5 anos e conduziam mais de uma hora diariamente. Relativamente ao tempo que os participantes viajavam como passageiros, a média era de 26 minutos diários. No que toca à sua experiência com sistemas de condução autónoma, o mais utilizado foi o controlo adaptativo de velocidade. A tabela 4.5 resume a percentagem de participantes que já usou cada um dos sistemas abordados e a sua satisfação média com eles.

Tabela 4.5: Experiência com sistemas de condução autónoma e respetiva satisfação.

Sistema	Média de satisfação (1 a 5)	Percentagem de participantes que usou (%)
Controlo de velocidade adaptativo	4.6	66.7
Limitador de velocidade	4.3	53.3
Estacionamento automático	5	6.7
Detetor de ponto cego	–	0
Sistema anti-colisão	4.5	40
Controlo de fadiga do condutor	5	6.7
Sistema de aviso de saída de faixa	4.7	20
Assistente de manutenção de faixa	4.5	13.3

4.4.5 Análise e discussão dos dados

Os dados dos 15 participantes foram recolhidos e analisados. No geral os participantes identificaram, com mais ou menos acerto, os estilos de condução praticados pelo veículo autónomo. No entanto, algumas avaliações dadas afastaram-se do real estilo de condução do veículo. Por isso foi feita uma análise mais aprofundada para perceber o que estaria a influenciar essas divergências.

O gráfico de barras da figura 4.18 exibe algumas estatísticas importantes sobre as avaliações dadas pelos participantes a cada um dos 12 troços.

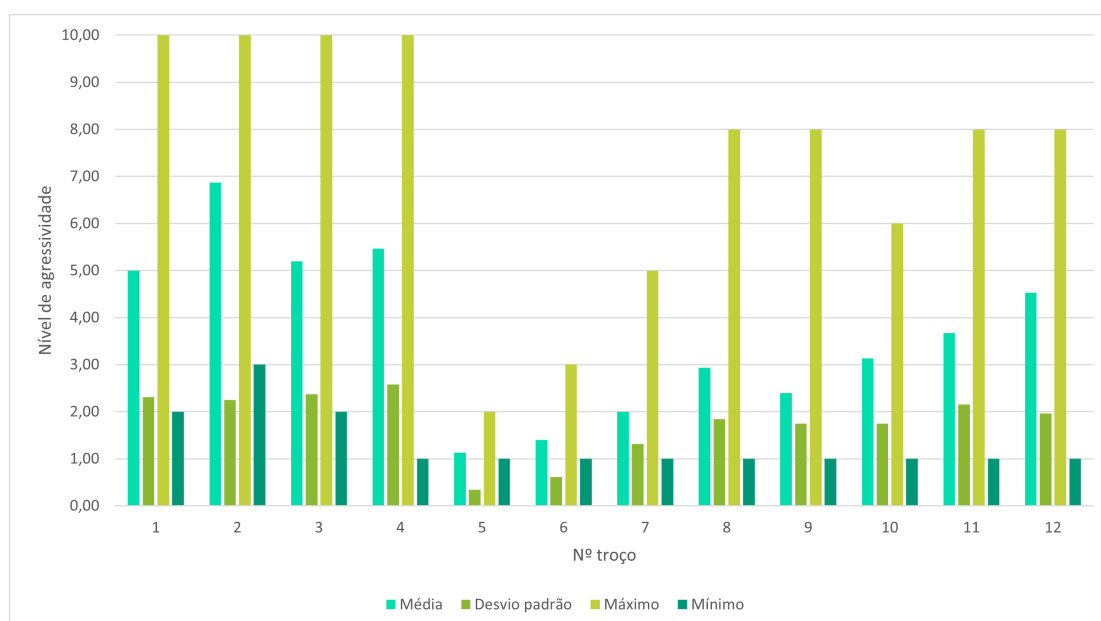


Figura 4.18: Médias, desvios padrão, máximos e mínimos das avaliações dadas pelos participantes em cada um dos troços. 1, 2, 3 e 4 - Agressivo; 5, 6, 7 e 8 - Defensivo; 9, 10, 11, e 12 - Médio.

Como é visível no gráfico da figura 4.18, a média das avaliações dadas varia consoante as condições de cada troço, mesmo quando o estilo de condução do veículo autónomo é o mesmo. Por exemplo, nos troços 1 e 2 a média das avaliações é relativamente dispar, embora o estilo de condução do veículo autónomo seja agressivo em ambos. Outro exemplo é aquele verificado nos troços 8 e 9. Apesar de no troço 8 o veículo autónomo ter um estilo de condução defensivo, a média das avaliações nesse troço é superior à do troço 9, em que o estilo de condução é médio. No primeiro caso, ao analisar os troços 1 e 2 verifica-se que a diferença reside apenas na velocidade do veículo da frente. No troço 2, a velocidade do veículo da frente é mais baixa, o que faz com que a rapidez com que o veículo autónomo se aproxima dele seja maior e, conseqüentemente, mais rápida é a transição de uma faixa para a outra ao ultrapassá-lo. Essa transição de faixa mais rápida explica a maior sensação de agressividade reportada pelos participantes. No segundo caso, analisando os troços 8 e 9 vê-se que no troço 8, além da transição de faixa mais rápida causada pela velocidade mais baixa do veículo da frente, existem veículos à esquerda que impedem momentaneamente a ultrapassagem. Isto faz com que o veículo autónomo se aproxime mais do veículo da frente e que sofra desacelerações e acelerações longitudinais, o que não acontece no troço 9 pois nele não existem veículos à esquerda. Tudo isto conjugado transmite uma maior agressividade aos utilizadores, apesar de efetivamente o estilo de condução do veículo ser mais defensivo.

Estes dois casos inesperados levantam a hipótese de que a conjugação de vários fatores não resultam necessariamente no comportamento previsto para um determinado nível de agressividade. Estas interações entre os fatores merecem, desse modo, um estudo mais aprofundado num trabalho futuro. Apesar destes casos inesperados, analisando a média das avaliações por estilo de condução, isto é, as médias dos troços cujo estilo de condução do veículo autónomo foi defensivo, médio e agressivo, é notado que os participantes, em média, detetaram diferenças entres os três, como ilustra o gráfico da figura 4.19.

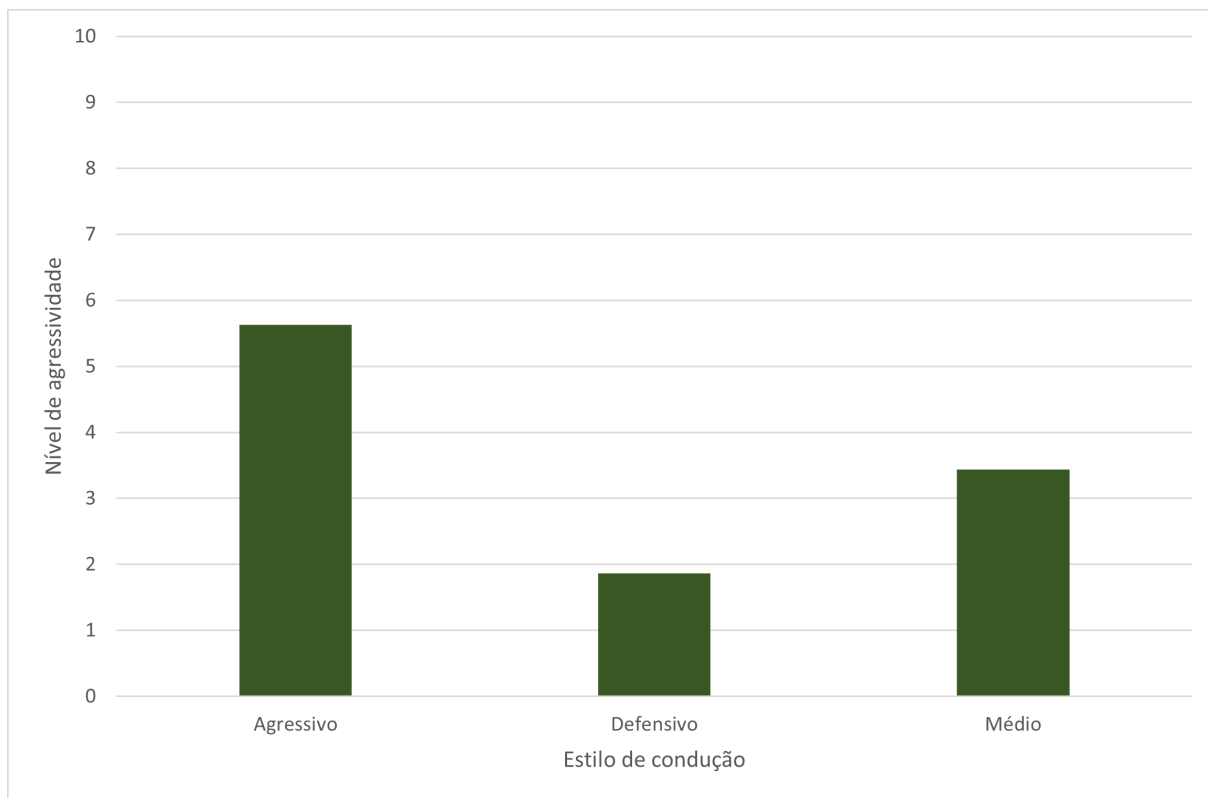


Figura 4.19: Médias das avaliações dadas pelos participantes em cada um dos estilos de condução.

A média das avaliações dadas pelos participantes nos troços em que o veículo autónomo tinha um estilo de condução agressivo foi de 5.63, nos troços com estilo defensivo foi de 1.87 e nos troços com estilo intermédio foi de 3.43.

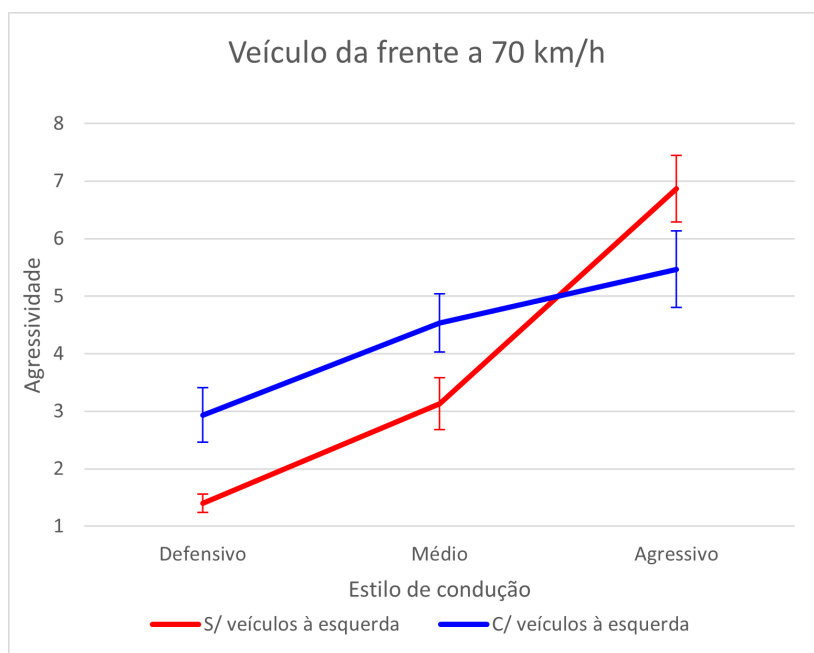


Figura 4.20: Médias das avaliações dadas pelos participantes em cada um dos troços cuja velocidade do veículo da faixa da direita era de 70 km/h. As barras representam o erro padrão da média.

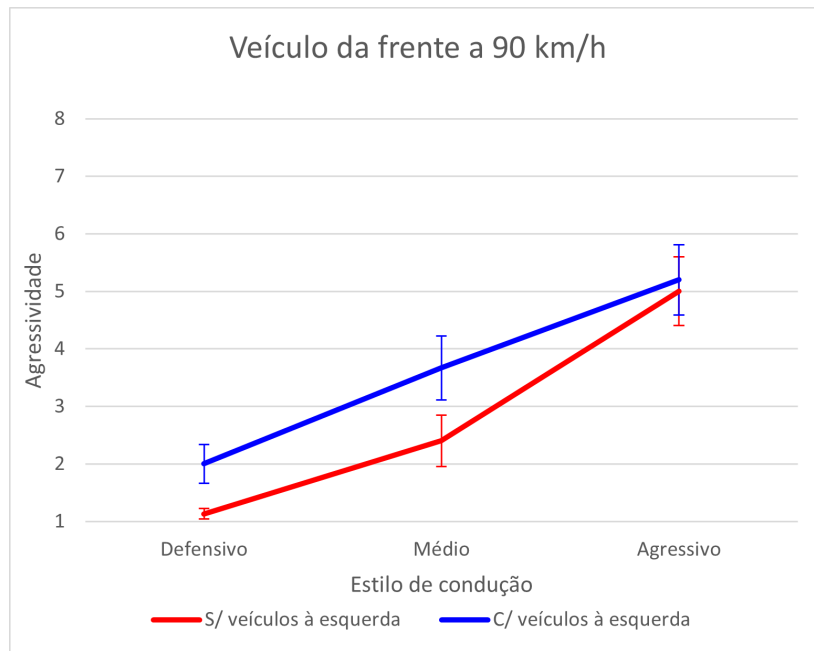


Figura 4.21: Médias das avaliações dadas pelos participantes em cada um dos troços cuja velocidade do veículo da faixa da direita era de 90 km/h. As barras representam o erro padrão da média.

Analisando os gráficos das figuras 4.20 e 4.21, pode-se observar que, em todos os troços, os participantes avaliaram, em média, o estilo de condução defensivo com uma pontuação inferior à do estilo médio e este com uma pontuação inferior à do estilo agressivo, demonstrando que existem diferenças entre o estilo de condução. Verifica-se também que, embora nos estilos defensivo e médio a média das avaliações dadas seja superior nos troços em que existem veículos à esquerda a atrasar a ultrapassagem, nos troços com estilo de condução agressivo essa superioridade anula-se e chega mesmo a inverter-se no caso em que a velocidade do veículo da frente é de 70 km/h. Isto pode explicar-se pelo facto de ser difícil para os participantes detetar eficazmente a aceleração longitudinal do veículo em simulação, ao contrário do que aconteceria num veículo real. Outra explicação plausível é o facto de, nas situações em que não existem veículos à esquerda e o estilo de condução do veículo autónomo é agressivo, o carro se aproximar em demasia do veículo da frente antes de ultrapassar, o que resulta numa sensação acrescida de agressividade. Isto explicaria o porquê de haver um aumento significativo na média das avaliações entre os estilos médio e agressivo quando não existem veículos à esquerda e vai de acordo com os relatos pós-teste de alguns participantes. Esta questão abre caminhos para estudos futuros.

De modo a analisar estatisticamente os fatores que afetaram as avaliações e a verificar que relações existem entre as diferentes condições dos 12 troços do teste, foi realizada uma análise da variância de medidas repetidas, com três fatores, nomeadamente Estilo de condução (Estilo), Velocidade do veículo a ultrapassar (Velocidade) e presença do veículo na faixa da esquerda (Presença). Este teste estatístico compara as médias de diferentes grupos experimentais para determinar se a diferença entre estas é

estatisticamente significativa, tendo em conta as suas variâncias (Seltman, 2018). Os resultados dessa análise estão evidenciados na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Análise da variância (ANOVA).
gl - graus de liberdade; EQM - erro quadrático médio.

Fonte	gl (df)	EQM (MSE)	F	valor-p (p-value)
Velocidade	1	1.91	15.93	0.001
Estilo	2	4.27	50.26	<0.001
Presença	1	4.87	3.84	0.070
Velocidade*Estilo	2	1.35	0.61	0.550
Velocidade*Presença	1	2.38	0.34	0.572
Estilo*Presença	2	1.27	13.72	<0.001
Velocidade*Estilo*Presença	2	1.31	4.01	0.029

Como se pode ver na tabela 4.6, a velocidade do veículo da frente e o estilo de condução têm um efeito significativo nas avaliações dos participantes, uma vez que o valor-p desses fatores é inferior a 0.05. Pelo contrário, a presença de veículos na faixa da esquerda não tem nenhum efeito significativo. As interações estilo-presença e velocidade-estilo-presença apresentam efeitos de interação significativos. Para mostrar estatisticamente as diferenças entre os estilos foi realizado um teste post-hoc com correções de Bonferroni dentro do fator Estilo, cujos resultados se encontram representados na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Teste Post-Hoc.
gl - graus de liberdade; EP - erro padrão.

Contraste	Beta	EP (SE)	gl (df)	relação-t (t-ratio)	valor-p (p-value)
Defensivo-Médio	-1.57	0.377	28	-4.150	0.0008
Defensivo-Agressivo	-3.77	0.377	28	-9.979	<0.0001
Médio-Agressivo	-2.20	0.377	28	-5.828	<0.0001

Dos resultados obtidos é possível concluir que todos os estilos de condução têm um efeito significativo porque os seus valores-p são inferiores a 0.05.

Para analisar o efeito de interação estilo-velocidade-presença foi feita outra análise de post-hoc com correções de Bonferroni, comparando o efeito da Presença para cada combinação de Velocidade-Estilo. Os resultados são apresentados na tabela 4.8.

Tabela 4.8: Teste Post-Hoc.
gl - graus de liberdade; EP - erro padrão.

Velocidade: 90			Estilo: Defensivo		
Contraste	Beta	EP (SE)	gl (df)	relação-t (t-ratio)	valor-p (p-value)
Não - Sim	-0.867	0.526	59.9	-1.649	0.1044
Velocidade: 70			Estilo: Defensivo		
Contraste	Beta	EP (SE)	gl (df)	relação-t (t-ratio)	valor-p (p-value)
Não - Sim	-1.533	0.526	59.9	-2.918	0.0050
Velocidade: 90			Estilo: Médio		
Contraste	Beta	EP (SE)	gl (df)	relação-t (t-ratio)	valor-p (p-value)
Não - Sim	-1.267	0.526	59.9	-2.410	0.0190
Velocidade: 70			Estilo: Médio		
Contraste	Beta	EP (SE)	gl (df)	relação-t (t-ratio)	valor-p (p-value)
Não - Sim	-1.400	0.526	59.9	-2.664	0.0099
Velocidade: 90			Estilo: Agressivo		
Contraste	Beta	EP (SE)	gl (df)	relação-t (t-ratio)	valor-p (p-value)
Não - Sim	-0.200	0.526	59.9	-0.381	0.7049
Velocidade: 70			Estilo: Agressivo		
Contraste	Beta	EP (SE)	gl (df)	relação-t (t-ratio)	valor-p (p-value)
Não - Sim	1.400	0.526	59.9	2.664	0.0099

Analisando a tabela 4.8 verifica-se que existem diferenças significativas entre todas as condições exceto entre as condições “Velocidade: 90” e “Estilo: Defensivo” e “Velocidade: 90” e “Estilo: Agressivo”. Entre as condições “Velocidade: 70” e “Estilo: Agressivo”, embora exista uma diferença significativa, o parâmetro beta, que indica a direção do efeito, tem sinal contrário aos demais. Isto ilustra as conclusões referidas acima, sobre o efeito da presença do carro à esquerda, que, no caso do estilo mais agressivo, tem um efeito neutro na avaliação de agressividade, ou até contrário ao observado para os outros estilos, em concordância com os resultados mostrados nos gráficos das figuras 4.20 e 4.21.

Em suma, estes testes, que tinham como objetivo verificar se o veículo autónomo tinha de facto a capacidade de assumir tanto estilos de condução defensivos como também mais agressivos, provaram isso mesmo, tendo em conta as avaliações dos participantes próximas dos extremos, a diferença entre as médias das avaliações dos estilos agressivo e defensivo e as análises estatísticas efetuadas.

Conclusões e trabalho futuro

Os veículos autónomos representam uma evolução importante para os sistemas de transporte pois trazem consigo enormes vantagens como maior segurança rodoviária, menor tráfego, diminuição da poluição, otimização dos gastos energéticos e melhoria da mobilidade para pessoas com mobilidade reduzida, entre outros.

Os sistemas de mobilidade semiautónoma estão a emergir um pouco por todo o lado e, embora os veículos 100% autónomos ainda tenham anos de investigação e desenvolvimento pela frente antes de começarem a serem disponibilizados, é essencial desde já garantir o mais possível a sua personalização pelos utilizadores de modo a facilitar a sua aceitação por eles. Deste modo, um algoritmo de controlo, baseado em sistemas dinâmicos não lineares, com a capacidade de adaptar o estilo de condução do veículo às necessidades dos utilizadores pode ser de grande interesse para o aumento dos níveis de confiança e de satisfação dos mesmos.

O objetivo desta dissertação foi, por isso, desenvolver um algoritmo de controlo longitudinal e lateral, para um veículo autónomo, baseado em sistemas dinâmicos não lineares, que fosse parametrizável ao ponto de induzir diferentes comportamentos ao veículo.

Para fazer isso, foi, inicialmente, utilizada a plataforma de programação e computação numérica MATLAB, com recurso a ferramentas como *Simulink* e *Driving Scenario Designer*, para criar uma primeira versão dos algoritmos de controlo longitudinal e lateral. Nesta etapa ainda foram realizados alguns testes de validação do correto funcionamento de todos os subsistemas desenvolvidos

De seguida foi necessário converter os algoritmos para o software de simulação de condução profissional SILAB. Este simulador é bastante mais completo e realista que o que foi usado no MATLAB. Além disso,

foi utilizado um ambiente com uma estrutura física de um veículo, com bancos, volante, pedais, monitores para os retrovisores e um ecrã curvo de grande extensão, onde é projetada a imagem do ambiente virtual desenvolvido, de forma a tornar a simulação mais imersiva. Para isso foram necessárias adaptações, nomeadamente uma reestruturação do código, tradução para outra linguagem de programação, bem como alterações e afinações de parâmetros para que o algoritmo funcionasse corretamente neste novo simulador.

O passo seguinte envolveu realizar testes com participantes de modo a validar a solução desenvolvida e a verificar se de facto os participantes sentiam os diferentes comportamentos do veículo autónomo. Primeiramente realizaram-se testes piloto com dois participantes de modo a parametrizar os estilos de condução. De seguida foram chamados 15 participantes que avaliaram 12 manobras de ultrapassagem, cada uma delas com condições e estilos de condução diferentes. Os dados recolhidos foram analisados e discutidos e verificou-se que os participantes, em geral, notaram corretamente os momentos em que o estilo de condução do veículo era mais agressivo ou mais defensivo, concluindo que os controladores desenvolvidos são de facto parametrizáveis relativamente ao estilo de condução.

Em suma, todos os objetivos propostos no início desta dissertação foram cumpridos com sucesso, incluindo a capacidade de realizar ultrapassagens, que não fazia inicialmente parte dos objetivos. O veículo autónomo apresenta comportamentos consistentes e robustos em todos os estilos de condução para todas as tarefas para o qual foi desenvolvido.

5.1 Trabalho futuro

Embora os 15 participantes do teste tenham sido suficientes para perceber que o algoritmo desenvolvido era capaz de alterar o estilo de condução do veículo autónomo, seria aconselhável realizar testes mais profundos e com um maior número de participantes a fim de perceber de que modo cada condição do troço afeta o nível de agressividade do veículo e ainda perceber melhor alguns fenómenos encontrados durante a análise estatística e que merecem ser alvo de uma análise mais minuciosa. Com isto seria possível parametrizar de uma forma mais fidedigna os estilos de condução do veículo.

Outro aspeto que deve ser explorado é a adaptação dos estilos de condução às preferências dos utilizadores. O veículo deve, de alguma forma, prever o estilo de condução preferido de cada utilizador, de forma a tornar a experiência de condução autónoma mais previsível e agradável, aumentando os níveis de aceitação destas soluções. Isto pode ser conseguido, por exemplo, analisando os comportamentos ou expressões do utilizador para prever o seu estado anímico e adaptar o estilo de condução do veículo face a isso.

Por fim, seria importante, também, realizar testes com utilizadores em ambientes virtuais que contemplem outras manobras, nomeadamente curvas e acelerações, a fim de que toda a tarefa de condução fique coberta pelas análises.

Bibliografia

- Abatari, H. T. & Tafti, A. D. (2013). Using a fuzzy pid controller for the path following of a car-like mobile robot. *2013 First RSI/ISM international conference on robotics and mechatronics (ICRoM)*, 189–193.
- Al-Kanj, L., Nascimento, J. & Powell, W. B. (2020). Approximate dynamic programming for planning a ride-hailing system using autonomous fleets of electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 284(3), 1088–1106. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.01.033>
- Al-Mayyahi, A., Wang, W. & Birch, P. (2015). Path tracking of autonomous ground vehicle based on fractional order PID controller optimized by PSO. *2015 IEEE 13th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*, 109–114.
- Amata, H., Miyajima, C., Ozaki, A., Nishino, T., Kitaoka, N. & Takeda, K. (2008). Abrupt steering detection based on the road construction ordinance and vehicle acceleration captured with drive recorders. *3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control, ICICIC'08*. <https://doi.org/10.1109/ICICIC.2008.106>
- Amer, N. H., Zamzuri, H., Hudha, K. & Kadir, Z. A. (2017). Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles: A review of state of the art and challenges. *Journal of intelligent & robotic systems*, 86(2), 225–254.
- Bae, I., Moon, J. & Seo, J. (2019). Toward a comfortable driving experience for a self-driving shuttle bus. *Electronics (Switzerland)*, 8, 943. <https://doi.org/10.3390/electronics8090943>
- Bakker, E., Nyborg, L. & Pacejka, H. B. (1987). Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/870421>
- Bansal, P. & Kockelman, K. M. (2017). Forecasting Americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 95, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.013>
- Bartolomeos, K., Croft, P., Job, S., Khayesi, M., Kobusingye, O., Peden, M., Schwebel, D., Sleet, D., Tiwari, G., Turner, B. & van Waeg, G. (2013). *Pedestrian safety: A road safety manual for decision-makers and practitioners*. World Health Organization.

- Basu, C., Yang, Q., Hungerman, D., Singhal, M. & Dragan, A. D. (2017). Do You Want Your Autonomous Car to Drive Like You? *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, Part F1271*, 417–425. <https://doi.org/10.1145/2909824.3020250>
- Beal, C. E. (2011). *Applications of model predictive control to vehicle dynamics for active safety and stability* (tese de doutoramento). Stanford University.
- Bicho, E. (1999). *Dynamic approach to behavior-based robotics: Design, specification, analysis, simulation and implementation*. Universidade do Minho (Portugal).
- Buehler, M., Iagnemma, K. & Singh, S. (Eds.). (2007). *The 2005 DARPA Grand Challenge* (Vol. 36). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73429-1>
- Buehler, M., Iagnemma, K. & Singh, S. (Eds.). (2009). *The DARPA Urban Challenge* (Vol. 56). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03991-1>
- Burns, L. D. (2013). A vision of our transport future. *Nature*, 497(7448), 181–182.
- Cao, H., Song, X., Zhao, S., Bao, S. & Huang, Z. (2017). An optimal model-based trajectory following architecture synthesising the lateral adaptive preview strategy and longitudinal velocity planning for highly automated vehicle. *Vehicle system dynamics*, 55(8), 1143–1188.
- Carros autónomos na União Europeia: da ficção científica à realidade. (2019). Obtido 11 agosto 2021, de <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20190110STO23102/carros-autonomos-na-uniao-europeia-da-ficcao-cientifica-a-realidade>
- Chen, Y., Shan, Y., Chen, L., Huang, K. & Cao, D. (2018). Optimization of Pure Pursuit Controller based on PID Controller and Low-pass Filter. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018-Novem*, 3294–3299. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569416>
- Cho, Y., Park, J., Park, S. & Jung, E. S. (2017). Technology Acceptance Modeling based on User Experience for Autonomous Vehicles Corresponding Author. *J Ergon Soc Korea*, 36(2), 87–108. <https://doi.org/10.5143/JESK.2017.36.2.87>
- Cibooglu, M., Karapinar, U. & Soylemez, M. T. (2017). Hybrid controller approach for an autonomous ground vehicle path tracking problem. *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017*, 583–588. <https://doi.org/10.1109/MED.2017.7984180>
- Coulter, R. C. (1992). *Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm* (rel. téc.). Carnegie-Mellon UNIV Pittsburgh PA Robotics INST.
- Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., Van Vuuren, D. P., McCollum, D. & Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation? *Science*, 350(6263), 911–912. <https://doi.org/10.1126/science.aac8033>

- Daziano, R. A., Sarrias, M. & Leard, B. (2017). Are consumers willing to pay to let cars drive for them? Analyzing response to autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 78, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.003>
- Dixit, S., Fallah, S., Montanaro, U., Dianati, M., Stevens, A., Mccullough, F. & Mouzakitis, A. (2018). Trajectory planning and tracking for autonomous overtaking: State-of-the-art and future prospects. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.02.001>
- dSpace. (s.d.). Dspace prototyping systems. Obtido 18 dezembro 2021, de <https://www.dspace.com/en/inc/home/products/systems/functp.cfm>
- Duarte, F. & Ratti, C. (2018). The Impact of Autonomous Vehicles on Cities: A Review. *Journal of Urban Technology*, 25(4), 3–18. <https://doi.org/10.1080/10630732.2018.1493883>
- European Environment Agency. (2019). Contribution of the transport sector to total emissions of the main air pollutants. https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/contribution-of-the-transport-sector-6#tab-chart_4
- Fagnant, D. J. & Kockelman, K. M. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.12.001>
- Falcone, P., Borrelli, F., Asgari, J., Tseng, H. E. & Hrovat, D. (2007). Predictive active steering control for autonomous vehicle systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(3), 566–580. <https://doi.org/10.1109/TCST.2007.894653>
- Fukao, T., Nakagawa, H. & Adachi, N. (2000). Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(5), 609–615. <https://doi.org/10.1109/70.880812>
- Gerdes, J. C. & Hedrick, J. K. (1999). Brake system modeling for simulation and control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 121(3), 296–503. <https://doi.org/10.1115/1.2802501>
- Guldner, J. & Utkin, V. (2000). The chattering problem in sliding mode systems. *Fourteenth international symposium of mathematical theory of networks and systems, MTNS2000*.
- Guo, J., Luo, Y. & Li, K. (2017). An adaptive hierarchical trajectory following control approach of autonomous four-wheel independent drive electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(8), 2482–2492.
- Guo, L., Ge, P. S., Yang, X. L. & Li, B. (2014). Intelligent vehicle trajectory tracking based on neural networks sliding mode control. *ICCSS 2014 - Proceedings: 2014 International Conference on Informative*

- and Cybernetics for Computational Social Systems*, 57–62. <https://doi.org/10.1109/ICCSS.2014.6961816>
- Han, G., Fu, W., Wang, W. & Wu, Z. (2017). The lateral tracking control for the intelligent vehicle based on adaptive pid neural network. *Sensors*, 17(6), 1244.
- He, X., Liu, Y., Lv, C., Ji, X. & Liu, Y. (2019). Emergency steering control of autonomous vehicle for collision avoidance and stabilisation. *Vehicle system dynamics*, 57(8), 1163–1187.
- Hemphill, T. A. (2020). Autonomous vehicles: U.S. regulatory policy challenges. *Technology in Society*, 61, 101232. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101232>
- Hoffmann, G. M., Tomlin, C. J., Montemerlo, M. & Thrun, S. (2007). Autonomous automobile trajectory tracking for off-road driving: Controller design, experimental validation and racing. *Proceedings of the American Control Conference*, 2296–2301. <https://doi.org/10.1109/ACC.2007.4282788>
- Hu, C., Wang, R., Yan, F. & Chen, N. (2015). Should the desired heading in path following of autonomous vehicles be the tangent direction of the desired path? *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(6), 3084–3094.
- Hulse, L. M., Xie, H. & Galea, E. R. (2018). Perceptions of autonomous vehicles: Relationships with road users, risk, gender and age. *Safety Science*, 102, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.001>
- Insights, C. (2019). Autonomous vehicles & car companies | cb insights.
- Jianhui, Z., Hongbo, G., Xinyu, Z. & Yinglin, Z. (2018). Automatic driving control based on time delay dynamic predictions. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 58(4), 432–437.
- Kanarat, A. (2004). *Motion planning and robust control for nonholonomic mobile robots under uncertainties* (tese de doutoramento). Virginia Tech.
- Katrakazas, C., Quddus, M., Chen, W. H. & Deka, L. (2015). Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: State-of-the-art and future research directions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 60, 416–442. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.09.011>
- Kayacan, E., Ramon, H. & Saeys, W. (2015). Robust trajectory tracking error model-based predictive control for unmanned ground vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(2), 806–814.
- Kelkel, R. (2015). *Predicting consumers' intention to purchase fully autonomous driving systems: Which factors drive acceptance?* (Tese de doutoramento). Universidade Católica Portuguesa.
- Khalil, H. K. (2002). Nonlinear systems third edition. *Prentice Hall*, 115.
- Kong, J., Pfeiffer, M., Schildbach, G. & Borrelli, F. (2015). Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/IVS.2015.7225830>

- Koopman, P. & Wagner, M. (2017). Autonomous vehicle safety: An interdisciplinary challenge. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9, 90–96. <https://doi.org/10.1109/MITS.2016.2583491>
- Kyriakidis, M., Happee, R. & De Winter, J. C. (2015). Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 32, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.014>
- Lazanyi, K. & Maraczi, G. (2017). Dispositional trust – do we trust autonomous cars? *2017 IEEE 15th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, 000135–000140. <https://doi.org/10.1109/SISY.2017.8080540>
- Li, B., Du, H. & Li, W. (2016). Trajectory control for autonomous electric vehicles with in-wheel motors based on a dynamics model approach. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(5), 318–330.
- Liu, J., Jayakumar, P., Stein, J. L. & Ersal, T. (2018). A nonlinear model predictive control formulation for obstacle avoidance in high-speed autonomous ground vehicles in unstructured environments. *Vehicle system dynamics*, 56(6), 853–882.
- Liu, J., Wang, X., Liu, J. & Wang, X. (2011). Advanced Sliding Mode Control. *Advanced sliding mode control for mechanical systems* (pp. 81–96). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20907-9_3
- Louro, L., Malheiro, T., Guimaraes, P., Machado, T., Monteiro, S., Silva, P. V., Erlhagen, W. & Bicho, E. (2019). Motion control for autonomous tugger vehicles in dynamic factory floors shared with human operators. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 5255–5262. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926677>
- Lucet, E., Lenain, R. & Grand, C. (2015). Dynamic path tracking control of a vehicle on slippery terrain. *Control Engineering Practice*, 42, 60–73. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.05.008>
- Luo, B., Ding, Y., Hao, K. & Liu, J. (2016). Research on mobile robot path tracking based on color vision. *Proceedings - 2015 Chinese Automation Congress, CAC 2015*, 371–375. <https://doi.org/10.1109/CAC.2015.7382527>
- Martin, T. C., Orchard, M. E. & Sánchez, P. V. (2013). Design and simulation of control strategies for trajectory tracking in an autonomous ground vehicle. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(24), 118–123.
- Merabti, H., Belarbi, K. & Bouchemal, B. (2016). Nonlinear predictive control of a mobile robot: A solution using metaheuristics. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A*, 39(3), 282–290. <https://doi.org/10.1080/02533839.2015.1091276>

- Monteiro, S. & Bicho, E. (2002). A dynamical systems approach to behavior-based formation control. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*, 3, 2606–2611.
- Mullen, C., Marsden, G. & Philips, I. (2020). Seeking protection from precarity? Relationships between transport needs and insecurity in housing and employment. *Geoforum*, 109, 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.12.007>
- Nie, L., Guan, J., Lu, C., Zheng, H. & Yin, Z. (2018). Longitudinal speed control of autonomous vehicle based on a self-adaptive pid of radial basis function neural network. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(6), 485–494.
- Ollero, A. & Amidi, O. (1991). Predictive path tracking of mobile robots. Application to the CMU NavLab, 1081–1086 vol.2. <https://doi.org/10.1109/icar.1991.240412>
- Ollero, A., Arrue, B. C., Ferruz, J., Heredia, G., Cuesta, F., López-Pichaco, F. & Nogales, C. (1999). Control and perception components for autonomous vehicle guidance. Application to the ROMEO vehicles. *Control Engineering Practice*, 7(10), 1291–1299. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00091-X)
- Ollero, A., García-Cerezo, A. & Martínez, J. L. (1994). Fuzzy supervisory path tracking of mobile reports. *Control Engineering Practice*, 2(2), 313–319. [https://doi.org/10.1016/0967-0661\(94\)90213-5](https://doi.org/10.1016/0967-0661(94)90213-5)
- Organization, W. H. et al. (2018). *Global status report on road safety 2018: Summary* (rel. téc.). World Health Organization.
- Park, M., Lee, S. & Han, W. (2015). Development of steering control system for autonomous vehicle using geometry-based path tracking algorithm. *ETRI Journal*, 37(3), 617–625. <https://doi.org/10.4218/etrij.15.0114.0123>
- Ping, E. P., Hudha, K., Harun, M. H. B. & Jamaluddin, H. (2010). Hardware-in-the-loop simulation of automatic steering control: Outer-loop and inner-loop control design. *11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2010*, 964–969. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2010.5707330>
- Pure Pursuit Controller - MATLAB & Simulink. (s.d.). Obtido 19 janeiro 2021, de <https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/pure-pursuit-controller.html><https://it.mathworks.com/help/robotics/ug/pure-pursuit-controller.html>
- Raffo, G. V., Gomes, G. K., Normey-Rico, J. E., Kelber, C. R. & Becker, L. B. (2009). A predictive controller for autonomous vehicle path tracking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(1), 92–102. <https://doi.org/10.1109/TITS.2008.2011697>

- Rajamani, R. (2012). *Vehicle Dynamics and Control*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>
- Rupp, A. & Stolz, M. (2017). Survey on control schemes for automated driving on highways. *Automated driving* (pp. 43–69). Springer.
- Sadvandi, S. & Halkias, D. (2019). Challenges of human factors engineering in the coming transition to autonomous vehicle technologies: A multiple case study. *ISM Journal of International Business*, 3(1).
- SAE International. (2018). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. *SAE International*, 4970(724), 1–5.
- Santos, G., Behrendt, H., Maconi, L., Shirvani, T. & Teytelboym, A. (2010). Part I: Externalities and economic policies in road transport. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2009.11.002>
- Scharf, L. L., Harthill, W. P. & Moose, P. H. (1969). A Comparison of Expected Flight Times for Intercept and Pure Pursuit Missiles. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-5(4), 672–673. <https://doi.org/10.1109/TAES.1969.309951>
- Scheinerman, E. R. (2012). *Invitation to dynamical systems*. Courier Corporation.
- Seltman, H. J. (2018). *Experimental design and analysis*. Carnegie Mellon University.
- Sharp, R. S. (2005). Driver steering control and a new perspective on car handling qualities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 219(10), 1041–1051. <https://doi.org/10.1243/095440605X31896>
- Sharp, R. S., Casanova, D. & Symonds, P. (2000). Mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance results. *Vehicle System Dynamics*, 33(5), 289–326. [https://doi.org/10.1076/0042-3114\(200005\)33:5;1-q;ft289](https://doi.org/10.1076/0042-3114(200005)33:5;1-q;ft289)
- Sheng, S., Pakdamanian, E., Han, K., Wang, Z., Lenneman, J. & Feng, L. (2021). Trust-based route planning for automated vehicles. *ICCPs 2021 - Proceedings of the 2021 ACM/IEEE 12th International Conference on Cyber-Physical Systems (with CPS-IoT Week 2021)*, 1–10. <https://doi.org/10.1145/3450267.3450529>
- Simotwo, J. C., Kamau, S. I. & Hinga, P. K. (2019). Adaptive control strategy to steer and drive an autonomous 4ws4wd ground vehicle. *Proceedings of Sustainable Research and Innovation Conference*, 57–61.
- Snider, J. M. et al. (2009). Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking. *Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RITR-09-08*.
- Sorniotti, A., Barber, P. & De Pinto, S. (2017). Path tracking for automated driving: A tutorial on control system formulations and ongoing research. *Automated driving*, 71–140.

- Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos with student solutions manual: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. CRC press.
- Svensson, L. & Eriksson, J. (2015). Tuning for ride quality in autonomous vehicle: Application to linear quadratic path planning algorithm.
- Taghavifar, H. (2019). Neural network autoregressive with exogenous input assisted multi-constraint nonlinear predictive control of autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(7), 6293–6304.
- Vivek, K., Sheta, M. A. & Gumtapure, V. (2019). A comparative study of stanley, lqr and mpc controllers for path tracking application (adas/ad). *2019 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Green Technology (ICISGT)*, 67–674.
- Wallace, R., Stentz, A., Thorpe, C., Moravec, H., Whittaker, W. & Kanade, T. (1985). First Results in Robot Road Following. *Computers in Engineering, Proceedings of the International Computers in Engineering Conference and*, 1, 381–387.
- Wang, J., Steiber, J. & Surampudi, B. (2008). Autonomous ground vehicle control system for high-speed and safe operation. *Proceedings of the American Control Conference*, 218–223. <https://doi.org/10.1109/ACC.2008.4586494>
- Wang, X., Guo, L. & Jia, Y. (2018). Road condition based adaptive model predictive control for autonomous vehicles. *Dynamic Systems and Control Conference*, 51913, V003T37A005.
- Whitmarsh, L. (2012). How useful is the Multi-Level Perspective for transport and sustainability research? *Journal of Transport Geography*, 24, 483–487. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.01.022>
- Wit, J., Crane, C. D. & Armstrong, D. (2004). Autonomous ground vehicle path tracking. *Journal of Robotic Systems*, 21(8), 439–449. <https://doi.org/10.1002/rob.20031>
- Wit, J. S. (2000). *Vector pursuit path tracking for autonomous ground vehicles*. University of Florida.
- Wiwv GmbH-Silab. (2018). Driving Simulation and SILAB. Obtido 29 setembro 2021, de <https://wivw.de/en/silab>
- Xia, Q., Chen, L., Xu, X., Cai, Y., Jiang, H. & Pan, G. (2020). Expected yaw rate-based trajectory tracking control with vision delay for intelligent vehicle. *Science Progress*, 103(3), 003685042093427. <https://doi.org/10.1177/0036850420934274>
- Yang, J., Bao, H., Ma, N. & Xuan, Z. (2017). An algorithm of curved path tracking with prediction model for autonomous vehicle. *2017 13th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS)*, 405–408.

- Yang, X., He, K., Guo, M. & Zhang, B. (1998). Intelligent predictive control approach to path tracking problem of autonomous mobile robot. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 4, 3301–3306. <https://doi.org/10.1109/icsmc.1998.726513>
- Zhang, X. & Zhu, X. (2019). Autonomous path tracking control of intelligent electric vehicles based on lane detection and optimal preview method. *Expert Systems with Applications*, 121, 38–48.
- Zhao, Z., Zhou, L. & Zhu, Q. (2018). Preview distance adaptive optimization for the path tracking control of unmanned vehicle. *Journal of Mechanical Engineering*, 54(24), 180–187.
- Zhu, Q., Huang, Z., Liu, D. & Dai, B. (2016). An adaptive path tracking method for autonomous land vehicle based on neural dynamic programming. *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 1429–1434.

A n e x o



Protocolo

Recolha e análise de dados: Condução autónoma parametrizável

Criado em: 18/11/2021 por Edgar Baptista

Contribuidores: Emanuel Sousa e Dário Machado

No âmbito da dissertação de mestrado, foi desenvolvido um algoritmo para adicionar capacidades de condução autónoma ao simulador de condução SILAB. Além deste objetivo, foi também propósito da dissertação capacitar o veículo autónomo do ajuste do seu estilo de condução para, posteriormente, realizar testes com utilizadores em ambiente de simulação. O algoritmo, implementado com recurso ao software de simulação SILAB, é baseado em sistemas dinâmicos não lineares ([Bicho, 2000](#)). Isto permitiu obter trajetórias suaves semelhantes às que um condutor humano realiza em condução. O algoritmo pode ser parametrizado através do ajuste de um parâmetro, produzindo uma gama de comportamentos que um passageiro comum classificaria de defensivo a agressivo. Para validar esta solução, seria relevante ter uma avaliação da agressividade do comportamento do veículo autónomo. Para tal, decidiu-se fazer uma recolha de dados com um grupo de participantes que avaliariam, numa determinada escala, o nível de agressividade percebido do veículo, ao longo de uma determinada trajetória predefinida.

Protocolo experimental

Esta secção descreve o protocolo experimental para o processo de recolha de dados.

Problema

A confiança nas soluções de mobilidade autónoma é um pré-requisito para a sua adoção. Um dos fatores que influencia essa confiança é a previsibilidade do comportamento do veículo autónomo. Esse comportamento é afetado pelo estilo de condução praticado, que pode ser categorizado entre defensivo e agressivo. Assim sendo, para beneficiar a adoção de veículo autónomos, é essencial desenvolver uma solução de condução autónoma capaz de oferecer aos utilizadores a capacidade de ajuste do estilo de condução.

Objetivo

- Medir a agressividade sentida pelos utilizadores em vários momentos durante o percurso.

Figura I.1: Protocolo dos testes com participantes (página 1).

Contextualização

Classificação do estilo de condução em três categorias

- **Defensivo:** Este comportamento é definido por antecipar os movimentos dos outros veículos na estrada, resultando em variações de velocidade e mudanças de direção suaves e num maior afastamento em relação a outros veículos.
- **Agressivo:** Este comportamento é caracterizado essencialmente por uma maior brutalidade em todas as ações de condução e, também, por uma proximidade maior aos outros veículos.
- **Normal:** Este comportamento é um meio termo entre os estilos de condução defensivo e agressivo.

Método

Esta experiência consiste num cenário em autoestrada, com duas vias para cada sentido, cujo percurso se encontra dividido em doze troços diferentes. Todos eles têm em comum um veículo, na faixa da direita, que segue a uma velocidade inferior à do veículo autónomo. Cada troço possui uma configuração diferente no que toca à velocidade do veículo que segue na faixa da direita, à existência de veículos a viajar na faixa da esquerda e ao estilo de condução do veículo autónomo. A Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 demonstram todas as condições que variam em cada troço.

Tabela 1 – Características dos troços com condução agressiva

		Velocidade do veículo na faixa da direita [km/h]	
		90	70
Presença de veículos na faixa da esquerda	Não	Troço 1	Troço 2
	Sim	Troço 3	Troço 4

Tabela 2 - Características dos troços com condução defensiva

		Velocidade do veículo na faixa da direita [km/h]	
		90	70
Presença de veículos na faixa da esquerda	Não	Troço 5	Troço 6
	Sim	Troço 7	Troço 8

Tabela 3 - Características dos troços com condução normal

		Velocidade do veículo na faixa da direita [km/h]	
		90	70
Presença de veículos na faixa da esquerda	Não	Troço 9	Troço 10
	Sim	Troço 11	Troço 12

Figura I.2: Protocolo dos testes com participantes (página 2).

Cada troço pode ainda diferir no perfil da estrada, isto é, se é em reta ou em curva, de forma a conferir mais realismo à simulação, embora esta condição não afete a variável a medir. O perfil da estrada é definido aleatoriamente para cada troço.

Equipamento

- Simulador de condução;
- Simulações em SILAB.

Procedimento

Os participantes são recebidos pelo responsável da experiência e são introduzidos à sala onde se realizará o teste. Os objetivos gerais do ensaio são explicados.

Experimentador: *“Neste projeto estamos a desenvolver algoritmos de condução autónoma capazes de reproduzir diferentes estilos de condução. Esta experiência em particular tem como objetivo avaliar a agressividade do estilo de condução demonstrado por um veículo autónomo simulado.*

Para já vou pedir-lhe que preencha o consentimento informado, bem como um pequeno inquérito demográfico e um questionário de enjoo. Depois, vou pedir-lhe que ocupe o lugar do condutor neste simulador”.

Posteriormente, os participantes leem e assinam o formulário de consentimento de recolha de dados, caso concordem. Ainda antes de iniciarem os testes, preenchem um questionário sobre as suas características sociodemográficas e outro acerca dos enjoos.

Finalizada esta fase inicial, os participantes são convidados a sentarem-se no lugar do condutor e a ajustar o banco para uma posição confortável. É, ainda, explicado aos participantes para avisarem caso se comecem a sentir maldispostos ou enjoados, de modo a suspender o teste.

Experimentador: *“Dentro de momentos o veículo irá começar a mover-se e efetuará um percurso de estrada. Pedimos-lhe que observe atentamente o comportamento do veículo autónomo ao longo do percurso. Ao longo do percurso irá observar 12 manobras de ultrapassagem. Após cada ultrapassagem, vou pedir-lhe que avalie o nível de agressividade da condução. Deverá responder em voz alta, numa escala de 1 a 10, correspondendo o 1 a “defensivo agressivo” e o 10 a “agressivo”. Alguma dúvida?”*

Dado o início do teste, os participantes são “conduzidos” pelo veículo autónomo ao longo dos doze troços mencionados anteriormente. A ordem pela qual os troços estão ordenados é alterada aleatoriamente para cada participante.

Durante o teste, após cada troço, é pedido aos participantes para avaliarem a agressividade sentida, numa escala de 1 a 10, sendo que o valor 10 representa a agressividade máxima.

No final de cada troço

Experimentador: *“Avalie, numa escala de 1 a 10, a agressividade do veículo nesta última manobra.”*

No final, os participantes preenchem de novo o questionário sobre os enjoos e, também, um pequeno questionário final, com duas perguntas de resposta aberta, de modo a validar as suas avaliações dadas durante o teste.

Figura I.3: Protocolo dos testes com participantes (página 3).

Cenário

O cenário usado simula uma autoestrada, com duas vias de trânsito em cada sentido, cada uma delas com 3.75 metros de largura. De modo a assegurar uma boa visibilidade da estrada, o ambiente em torno da mesma é preenchido com algumas árvores afastadas, pelo menos, trinta metros das bermas. O percurso tem, no total, 24 quilómetros de extensão e cerca de 15 minutos de duração. A Figura 1 ilustra o cenário desenvolvido.

O percurso possui 12 veículos a circular na faixa da direita, com velocidade constante que poderá ser de 70 ou 90 km/h. Na faixa da esquerda poderão aparecer, ou não, veículos a impedir momentaneamente a ultrapassagem do veículo autónomo. O objetivo é fazer os participantes passarem por todas situações que permitam julgar o estilo de condução do veículo, tais como:

- Acelerações
- Desacelerações
- Transições de faixa
- Variações da distância mantida em relação aos outros veículos



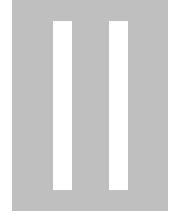
Figura 1 - Cenário desenvolvido

Variável recolhida

- Agressividade

Figura I.4: Protocolo dos testes com participantes (página 4).

A n e x o



Questionário sociodemográfico

Questionário Sociodemográfico

De forma a reunir informações necessárias da sua colaboração, pedimos-lhe que preencha o questionário que se segue. Lembramos que os seus dados são confidenciais e apenas serão analisados por membros da equipa de investigação. Agradecemos desde já a sua colaboração.

* Obrigatório

1. Código do participante *

A preencher pelo responsável

2. Idade *

3. Sexo *

- Masculino
- Feminino

4. Habilitações literárias *

- 4º ou 9º ano
- 12º ano
- Licenciatura
- Pós-graduação
- Mestrado
- Doutoramento

5. Possui carta de condução? *

- Sim
- Não

6. Há quantos anos tem carta de condução? *

Figura II.1: Questionário sociodemográfico (página 1).

7. Quantas horas, em média, conduz diariamente? *

8. Quantas horas, em média, é conduzido diariamente? *

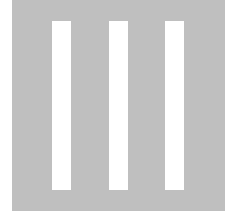
9. Tem alguma experiência com sistemas de condução autónoma? *

Numa escala de 1 (totalmente insatisfeito) a 5 (totalmente satisfeito), avalie o quão satisfeito/a está com cada uma das seguintes tecnologias.

	1	2	3	4	5	Nunca usei	Sem resposta
Controlo de velocidade adaptativo (Adaptative Cruise Control - ACC)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Limitador de velocidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Estacionamento automático	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Detetor de ponto cego (Blind Spot Detection - BSD)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sistema anti-colisão (Pre-crash System)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Controlo de fadiga do condutor	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sistema de aviso de saída de faixa (Lane Departure Warning - LDW)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Assistente de manutenção de faixa (Lane Keeping Assist - LKA)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura II.2: Questionário sociodemográfico (página 2).

A n e x o



Questionário sobre os enjoos

Código do Participante _____

SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE

Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal (1993)

Na seguinte lista, desenhe um círculo na resposta que indica o quanto está a sentir cada um dos sintomas **neste momento.**

On the following list, draw a circle on the answer indicating how much you feel each of the symptoms right now.

1.	Mal-estar generalizado <i>General discomfort</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
2.	Cansaço <i>Fatigue</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
3.	Dor de cabeça <i>Headache</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
4.	Vista cansada <i>Eyestrain</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
5.	Dificuldade em focar <i>Difficulty focusing</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
6.	Aumento de salivação <i>Increased salivation</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
7.	Transpiração <i>Sweating</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
8.	Náusea <i>Nausea</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
9.	Dificuldade de concentração <i>Difficulty concentrating</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
10.	“Cabeça pesada” <i>Fullness of head</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
11.	Visão turva <i>Blurred vision</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
12.	Tontura (com os olhos abertos) <i>Dizzy (eyes open)</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
13.	Tontura (com os olhos fechados) <i>Dizzy (eyes closed)</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
14.	Vertigem <i>Vertigo</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
15.	Desconforto abdominal <i>Stomach awareness</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>
16.	Arroto <i>Burping</i>	Nada <i>Nothing</i>	Pouco <i>Slight</i>	Moderado <i>Moderate</i>	Severo <i>Severe</i>

Figura III.1: Questionário apresentado antes e após a realização do teste de modo a verificar possíveis efeitos provocados pela simulação.

Anexo



Questionário final

Questionário final

Este curto questionário tem o intuito de validar as suas respostas dadas ao longo do percurso realizado pelo veículo autónomo.

* Obrigatório

1. Código do participante * 

A preencher pelo responsável

2. Notou diferenças na agressividade do veículo ao longo do percurso? *

Sim

Não

3. Que diferenças notou? *

Áudio a ser gravado pelo responsável

Figura IV.1: Questionário final para registo dos comentários dos participantes.