



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Renan Porto Vieira

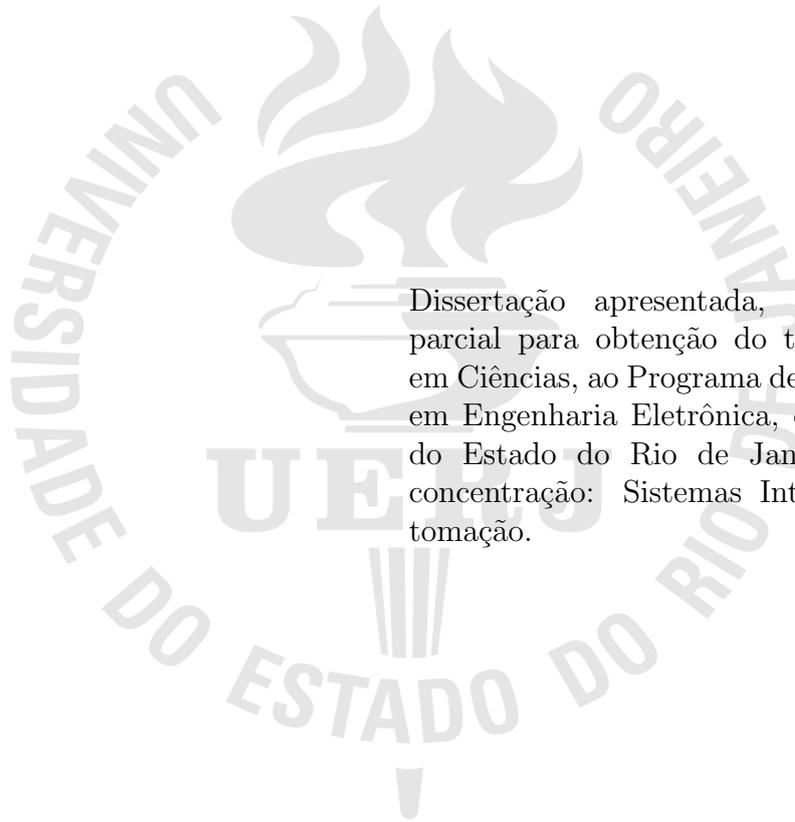
Navegação de um Carro Autônomo em Ambientes Urbanos  
Complexos

Rio de Janeiro

2024

Renan Porto Vieira

## Navegação de um Carro Autônomo em Ambientes Urbanos Complexos



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Téo Cerqueira Revoredo

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

V658 Vieira, Renan Porto.

Navegação de um carro autônomo em ambientes urbanos complexos / Renan Porto Vieira. – 2024.

109 f.

Orientadores: Téo Cerqueira Revoredo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Veículos autônomos - Teses. 3. Controle automático - Teses. 4. Controle preditivo - Teses. 5. Direção de automóveis nas cidades - Teses. I. Revoredo, Téo Cerqueira. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 681.5:621.337

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.



11/5/2024

---

Assinatura

---

Data

Renan Porto Vieira

## Navegação de um Carro Autônomo em Ambientes Urbanos Complexos

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle e Automação.

Aprovado em: 3 de Abril de 2024

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Téo Cerqueira Revoredo (Orientador)  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica - UERJ

---

Prof. Dr. José Paulo Vilela Soares da Cunha  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica - UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Milena Faria Pinto  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - CEFET/RJ

Rio de Janeiro

2024

## AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Luzia Mesquita Porto Vieira e Wilson Francisco Vieira, por nunca terem medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade durante todo o meu período escolar; aos meus irmãos Luana e Luan, que foram, em diversos momentos cruciais, grandes companheiros para mim e ao Ozéas pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações. Eu jamais serei capaz de retribuir todo carinho, amor e ânimo que recebi de vocês.

Gostaria de dedicar um agradecimento especial aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante toda essa jornada. Seu apoio, incentivo e compreensão foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios e alcançar essa conquista. Agradeço pelos momentos de descontração que me ajudaram a relaxar, pelas palavras de encorajamento que me motivaram a seguir em frente e pelo suporte emocional que me sustentou nos momentos mais difíceis. Vocês foram essenciais para tornar essa trajetória mais leve e prazerosa. Muito obrigado por fazerem parte da minha vida e por compartilharem essa conquista comigo.

Notadamente, ao meu orientador Téo, pela oportunidade dada, seus ensinamentos, paciência, orientação e excelente pessoa e profissional que sempre demonstrou ser.

Também quero agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Rio de Janeiro e a todos os professores do meu curso pela elevada qualidade do ensino oferecido. Por todas as aulas ministradas e ensinamentos que levarei para o resto da minha vida.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro concedido ao longo deste mestrado. O suporte oferecido pela FAPERJ foi fundamental para a realização desta pesquisa e para o meu desenvolvimento como pesquisador. Acredito que os recursos investidos pela fundação contribuirão para o avanço do conhecimento em nossa área de estudo e para o fortalecimento da ciência e tecnologia em nosso estado. Novamente, agradeço à FAPERJ por esta oportunidade e pelo compromisso com o desenvolvimento da pesquisa científica no Rio de Janeiro.

## RESUMO

**Vieira**, Renan Porto. *Navegação de um carro autônomo em ambientes urbanos complexos*. 2024. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Veículos já foram considerados o domínio dos engenheiros mecânicos. No entanto, os avanços sem precedentes nos automóveis e na tecnologia da informação transformaram o veículo tradicional em uma máquina de computação e deslocamento em grande escala, inteligente e rica em entretenimento. Ao se observar de perto os avanços recentes das tecnologias, descobre-se que os recursos e características oferecidos pelas tecnologias da comunicação e computação de ponta, com o surgimento de carros de última geração, fornecem a base para a realização de veículos inteligentes. Esses carros inteligentes são autônomos, pois suportam recursos como detectar o ambiente ao redor, tomar decisões rápidas e oportunas, navegar sem intervenção humana na estrada, manter padrões de mobilidade seguros, realizar todos os tipos de manobras e controle de cruzeiro, por exemplo. A proposta desta dissertação é adaptar o controlador de perseguição pura para o controle lateral e implementar um controlador híbrido para o controle longitudinal, que combina o controlador de duas posições com o controlador preditivo. Neste contexto, quando não há outros veículos na rota, o sistema prioriza a maximização da velocidade para otimizar o tempo de viagem. Por outro lado, quando outros veículos estão presentes, o foco do sistema é garantir a segurança e promover o respeito mútuo entre os condutores. Para avaliar o desempenho desse modo de direção em diferentes cenários, este trabalho utiliza o simulador CARLA. Os resultados comprovam a eficácia do controlador e servem como ponto de partida para estudos mais amplos e avaliação experimental.

Palavras-chave: Carros autônomos; Controle Lateral; Controle Longitudinal; Alta velocidade; Direção defensiva

## ABSTRACT

**Vieira**, Renan Porto. *Navigation of an autonomous car in complex urban environments*. 2024. 109 p. Dissertation (Master's in Electronic Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Vehicles were once considered the domain of mechanical engineers. However, unprecedented advances in automobiles and information technology have transformed the traditional vehicle into a large-scale, intelligent, and entertainment-rich computing and mobility machine. Upon closer examination of recent technological advancements, it is discovered that the features and characteristics offered by cutting-edge communication and computing technologies, coupled with the emergence of next-generation cars, provide the foundation for the realization of smart vehicles. These smart cars are autonomous, supporting features such as detecting the surrounding environment, making quick and timely decisions, navigating without human intervention on the road, maintaining safe mobility standards, performing all types of maneuvers, and cruise control, for example. The proposal of this dissertation is to adapt the pure pursuit controller for lateral control and implement a hybrid controller for longitudinal control, combining the two-position controller with predictive control. In this context, when there are no other vehicles on the route, the system prioritizes maximizing speed to optimize travel time. On the other hand, when other vehicles are present, the system's focus is on ensuring safety and promoting mutual respect among drivers. To evaluate the performance of this driving mode in different scenarios, this work utilizes the CARLA simulator. The results confirm the effectiveness of the controller and serve as a starting point for broader studies and experimental evaluation.

Keywords: Autonomous Vehicles; Lateral Control; Transversal Control; High Speed; Defensive Driving.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Arquitetura funcional.....	18
Figura 2 : Arquitetura do sistema.....	19
Figura 3 : Modelo cinemático do veículo.....	28
Figura 4 : Representação geométrica simplificada do veículo.....	32
Figura 5 : Representação de dois veículos $V$ e $V'$ . ....	33
Figura 6 : Geometria do controlador de perseguição pura.....	38
Figura 7 : Relação entre o veículo e o caminho de referência.....	41
Figura 8 : Distância de antecipação.....	42
Figura 9 : Fluxograma do controle longitudinal.....	44
Figura 10: Metodologia do simulador CARLA.....	47
Figura 11: Ambiente de simulação CARLA.....	48
Figura 12: Tesla Model 3 no CARLA.....	50
Figura 13: Rotas de referência. ....	52
Figura 14: Rotas de referência representadas no plano cartesiano $(x, y)$ . ....	53
Figura 15: Resultado para rota 1 sem chuva e sem tráfego. ....	57
Figura 16: Resultado para Rota 2 sem chuva e sem tráfego. ....	59
Figura 17: Resultado para Rota 3 sem chuva e sem tráfego. ....	61
Figura 18: Resultado para Rota 1 com chuva e sem tráfego. ....	63
Figura 19: Resultado para Rota 2 com chuva e sem tráfego. ....	65
Figura 20: Resultado para Rota 3 com chuva e sem tráfego. ....	67
Figura 21: Resultado para Rota 1 sem chuva e com tráfego. ....	69
Figura 22: Resultado para Rota 2 sem chuva e com tráfego. ....	71
Figura 23: Resultado para Rota 3 sem chuva e com tráfego. ....	73
Figura 24: Resultado para Rota 1 com chuva e com tráfego. ....	75
Figura 25: Resultado para Rota 2 com chuva e com tráfego. ....	77
Figura 26: Resultado para Rota 3 com chuva e com tráfego. ....	79
Figura 27: Resultado para Rota 1 com perturbação no caminho. ....	81
Figura 28: Resultado para Rota 1 sem chuva e sem tráfego com o controlador PID. ....	83
Figura 29: Resultado para Rota 2 sem chuva e sem tráfego com o controlador PID. ....	85

Figura 30: Resultado para Rota 3 sem chuva e sem tráfego com o controlador PID.	87
Figura 31: Resultado para Rota 1 com chuva e sem tráfego com o controlador PID.	89
Figura 32: Resultado para Rota 2 com chuva e sem tráfego com o controlador PID.	91
Figura 33: Resultado para Rota 3 com chuva e sem tráfego com o controlador PID.	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Parâmetros da Cinemática do Veículo.....	29
Tabela 2 : Coeficientes de atrito para carros de passeio em vários tipos de terreno. .	31
Tabela 3 : Requisitos mínimos para instalar o CARLA. ....	45
Tabela 4 : Parâmetros e ganhos gerais. ....	50
Tabela 5 : Velocidades de referência para o ambiente sem chuva.....	54
Tabela 6 : Velocidades de referência para o ambiente com chuva. ....	55
Tabela 7 : Resultados.....	80
Tabela 8 : Resultados com o controlador PID. ....	94

## LISTA DE SIGLAS

API	Interface de Programação de Aplicação (Inglês: <i>Application Programming Interface</i> )
CAN	Rede de Área do Controlador (Inglês: <i>Controller Area Network</i> )
CARLA	Carro aprendendo a agir (Inglês: <i>Car Learning to Act</i> )
DoT	Departamento de Transportes dos Estados Unidos (Inglês: <i>Department of Transportation</i> )
ECUs	Unidades de Controle Eletrônico (Inglês: <i>Electronic Control Units</i> )
FLC	Controlador de Lógica Fuzzy (Inglês: <i>Fuzzy Logic Controller</i> )
GPS	Sistema de posicionamento global (Inglês: <i>Global Positioning System</i> )
LIDAR	Deteção e alcance a laser (Inglês: <i>Laser Detection and Ranging</i> )
MP	Método Próprio
MPC	Controle Preditivo (Inglês: <i>Model Predictive Controller</i> )
NHTSA	Administração Nacional de Segurança no Trânsito Rodoviário (Inglês: <i>National Highway Traffic Safety Administration</i> )
NPC	Personagem não jogável (Inglês: <i>Non Playable Character</i> )
OMS	Organização Mundial da Saúde
PID	Proporcional Integral Derivativo
RQL	Regulador Linear Quadrático
SA	Disponibilidade seletiva (Inglês: <i>Selective Availability</i> )

SIG	Sistema de Informação Geográfica
UE4	Motor Unreal 4 (Inglês: <i>Unreal Engine 4</i> )
VANETs	Redes Ad hoc veiculares (Inglês: <i>Vehicular Ad hoc NETWORKS</i> )
VLC	Comunicação de Luz Visível (Inglês: <i>visible light communication</i> )
VTA	Veículo Terrestre Autônomo

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1	<b>O CARRO AUTÔNOMO</b> .....	17
1.1	Introdução .....	17
1.1.1	Detecção do ambiente .....	20
1.1.2	Navegação .....	21
1.1.3	Controle de manobra .....	22
1.2	Benefícios .....	22
1.2.1	Melhor segurança .....	22
1.2.2	Oportunidades de negócios .....	23
1.2.3	Facilidade de uso e conveniência .....	23
1.2.4	Melhores condições de tráfego.....	24
1.2.5	Estacionamento autônomo .....	24
1.3	Formulação do problema .....	25
1.4	Objetivo .....	26
1.5	Estrutura da Dissertação .....	27
2	<b>LEVANTAMENTO TEÓRICO</b> .....	28
2.1	Modelo cinemático .....	28
2.2	Velocidade crítica .....	30
2.3	Modelo do ambiente .....	31
2.3.1	Detecção de Colisões.....	32
2.4	Controlador de duas posições ou <i>on-off</i> .....	33
2.5	Controlador preditivo .....	34
2.5.1	Elementos sobre controle preditivo .....	35
2.5.1.1	O modelo de predição.....	35
2.5.1.2	A função objetivo .....	36
2.5.1.3	Método para obtenção da lei de controle.....	36
2.6	Controlador de perseguição pura.....	37

3	<b>RASTREAMENTO DE CAMINHO</b> .....	40
3.1	Controle lateral .....	40
3.2	Controle longitudinal .....	41
3.2.1	Prevenção de colisões .....	42
4	<b>SIMULADOR</b> .....	45
4.1	Mecanismo de Simulação .....	46
4.1.1	Ambiente .....	47
4.1.2	Sensores.....	48
4.1.3	Planejamento de caminho .....	49
5	<b>RESULTADOS DA SIMULAÇÃO</b> .....	50
5.1	Ambientes Livres de Tráfego .....	56
5.1.1	Sem chuva .....	56
5.1.2	Com chuva.....	62
5.2	Ambientes com Tráfego.....	68
5.2.1	Sem chuva .....	68
5.2.2	Com chuva.....	74
5.3	Resposta a perturbações.....	80
5.4	Comparação dos resultados .....	82
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	95
6.1	Trabalhos futuros .....	96
6.2	Publicações .....	97
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	98

## INTRODUÇÃO

Veículos já foram considerados o domínio dos engenheiros mecânicos. No entanto, os avanços sem precedentes nos automóveis e na tecnologia da informação transformaram o veículo tradicional em uma máquina de computação e deslocamento em grande escala, inteligente e rica em entretenimento [1]. Ao se observar de perto os avanços recentes das tecnologias, descobre-se que os recursos e características oferecidos pelas tecnologias da comunicação e computação de ponta, com o surgimento de carros de última geração, fornecem a base para a realização de veículos inteligentes. Esses carros inteligentes são autônomos, pois suportam recursos como detectar o ambiente ao redor, tomar decisões rápidas e oportunas, navegar sem intervenção humana na estrada, manter padrões de mobilidade seguros, realizar todos os tipos de manobras e controle de cruzeiro [2], por exemplo. Os principais fatores por trás do surgimento de carros autônomos incluem: a necessidade de motorista e segurança de condução, crescimento da população, expansão da infraestrutura, aumento do número de veículos, necessidade de gerenciamento eficiente do tempo e utilização e otimização de recursos. À medida que a população humana cresce e o número de carros aumenta, isso cria um impacto estressante em nossa infraestrutura de transporte, desde estradas e vagas de estacionamento até postos de reabastecimento (para veículos com motores a combustível) e estações de recarga (para veículos elétricos e híbridos) [3, 4]. Nas últimas décadas, alguns governos tomaram medidas sérias para a segurança no trânsito, como câmeras de circuito fechado de televisão, sensores de estrada e muito mais [5]. No entanto, apesar desses esforços, segundo estatísticas da Organização Mundial da Saúde (OMS), ocorreram 1.282.150 mortes devido a acidentes de trânsito em 2019 [6], demonstrando que, apesar do uso de tecnologias existentes, erros humanos ainda ocorrem [7]. Para minimizar os erros humanos e reduzir as situações de risco de vida na estrada, tecnologias alternativas, como carros conectados e carros autônomos, estão sendo exploradas.

A evolução e o surgimento de carros autônomos são resultados de pesquisas notáveis provenientes das áreas de comunicação sem fio, sistemas embarcados, navegação, sensores e tecnologias de rede *ad hoc*, aquisição e disseminação de dados e análise de dados [1]. A ideia de carros autônomos começou com os “carros fantasmas” na década de 1920, onde

o carro era controlado por meio de um dispositivo de controle remoto [8]. Na década de 1980, houve o surgimento de carros autônomos autossuficientes, capazes de operar sem intervenção humana durante a condução, e auto-gerenciados, que podem monitorar e controlar seus próprios sistemas internos [1, 9]. Um dos principais contribuintes para o campo de carros autônomos foi o NavLab da Universidade de Carnegie Mellon, onde pesquisadores desenvolveram o Veículo Terrestre Autônomo (VTA) [10]. Na mesma década, o “Projeto Prometheus”, patrocinado pela Mercedes em 1987 [11], alcançou um grande resultado com o projeto de seu primeiro carro robótico para rastrear marcações de pista e outros veículos (no entanto, por questões de segurança, foi necessária a intervenção humana). Embora não fosse totalmente autônomo na época, a capacidade de mudar de faixa automaticamente foi um avanço.

É importante traçar uma linha clara entre dois termos conflitantes: o carro automatizado e o carro autônomo. Uma visão panorâmica de ambos os termos oferece um conceito semelhante de permitir a independência de um veículo; no entanto, o primeiro refere-se a um veículo controlado por uma máquina que pode precisar de intervenção humana (por exemplo, freio de emergência, controle de cruzeiro, estacionamento inteligente, etc.), enquanto o segundo se concentra nas ações realizadas pelo veículo independentemente, sem qualquer intervenção humana [12].

A condução autônoma leva um carro da posição atual para a posição de destino com base na compreensão dos ambientes de direção. Para uma navegação segura e confortável, o planejamento de trajetória planeja a manobra e a trajetória ideais para evitar colisões com obstáculos nos limites físicos do veículo [13–16]. Em particular, o planejamento de trajetórias em áreas urbanas deve gerenciar as várias situações de condução causadas por diferentes tipos de estradas, regras de trânsito, barreiras e participantes do tráfego (veículos, bicicletas e pedestres). Além disso, os estados (configuração e velocidade) dos participantes mudam dinamicamente. Para considerar as características espaço-temporais do movimento, o planejamento da trajetória é mais sofisticado. Em outras palavras, o planejamento de trajetórias requer uma habilidade para lidar com os elementos complexos e diversos dos ambientes urbanos dinâmicos eficientemente.

Para o planejamento de trajetória, existem duas abordagens: planejamento baseado em amostragem [15–19] e planejamento baseado em otimização numérica [20, 21]. O planejamento de trajetória baseado em amostragem gera a trajetória perfazendo uma

variedade de candidatos com base em padrões predefinidos e, em seguida, seleciona o melhor com maior segurança, conforto e menor gasto de energia. A vantagem do método de amostragem é sua função de custo. Uma vez que as várias formas de uma função deste tipo estejam disponíveis, as trajetórias candidatas podem ser projetadas por modelos matemáticos contínuos da dinâmica do veículo e da geometria da estrada, bem como modelos ambientais discretos da condição do semáforo, a posição da linha de parada e tipos de sinais de trânsito [22]. No entanto, este método de planejamento requer recursos computacionais significativos para considerar todos os movimentos possíveis do veículo, pois requer um grande número de candidatos para representar o movimento contínuo como as amostras discretas [22].

O planejamento baseado em otimização numérica encontra a trajetória com base em uma função de custo e um conjunto de restrições. Se tanto a função de custo quanto as restrições forem funções convexas, a trajetória pode convergir para um ótimo [23]. No planejamento de trajetória, os elementos geométricos (curvatura da estrada e limite da estrada) e elementos dinâmicos do veículo (velocidade, aceleração, taxa de guinada e balanço imprevisto) são representados por funções matemáticas diferenciáveis [23]. Assim, esses elementos podem ser efetivamente aplicados ao planejamento de trajetória baseado em otimização numérica. Por outro lado, o método numérico não consegue considerar todos os ambientes de condução de uma área urbana porque alguns elementos, incluindo um sinal de trânsito, um semáforo e o número de faixas, são modelados por estados discretos. Além disso, a modelagem de situações de condução complexas usando funções convexas é um problema desafiador [23, 24].

Como mencionado anteriormente, os dois tipos de planejadores de trajetória têm características diferentes. O planejamento baseado em amostragem tem uma forte capacidade de lidar com elementos discretos. Além disso, o método pode simplificar o problema pelos padrões de amostragem. Por exemplo, um planejador baseado em treliça [15, 18] representa o espaço de configurações para planejamento como um padrão de treliça. Ao usar o padrão, o problema de planejamento complexo é convertido em um problema simples de busca em grafos. Por outro lado, o planejamento baseado em otimização numérica é especializado no problema matemático contínuo. Se for uma função convexa, a solução pode ser encontrada em menor tempo [20]. A integração desses dois métodos é mais eficiente para gerenciar todos os elementos urbanos complexos, incluindo os modelos ambientais

discretos e contínuos [25].

O rastreamento de caminho de referência é fundamental no controle de veículos autônomos e sistemas de navegação, onde o objetivo principal é gerar sinais de controle para seguir o caminho predefinido considerando as restrições de movimento relevantes [26].

Diversos controladores são utilizados no rastreamento de caminho. O controlador de perseguição pura [27] é o mais simples e amplamente utilizado [28], calculando a distância de antecipação para determinar o ângulo de direção do veículo. Embora supere outros controladores em desempenho sob caminhos descontínuos e atuação estocástica, pode apresentar erros laterais significativos com uma distância de antecipação alta ou oscilações graves com uma distância muito pequena [29]. O controlador Stanley é eficaz, mas sofre com perturbações externas e gera mais erros laterais em trajetórias curvas [30]. O RLQ (Regulador Linear Quadrático) é um método popular de controle ótimo, mas tem dificuldades em lidar com curvas acentuadas no caminho de referência [31].

O controlador de lógica *fuzzy* (FLC) tem sido foco de pesquisadores para solucionar o problema de rastreamento de caminho autônomo de robôs móveis [32]. Por ser mais fácil de projetar, robusto, barato e facilmente operado, o FLC tem sido amplamente utilizado nas últimas décadas, como em estacionamento de veículos [33], rastreamento de caminho [34] e controle de um carro de corrida [35]. Ademais, algumas técnicas avançadas têm sido propostas para gerar comandos de direção e velocidade apropriados [36]. Entretanto, a definição dos parâmetros de função de associação áspera e o ajuste da base de regras de um controlador fuzzy frequentemente resultam em imprecisão em estado estacionário e requerem maior tempo de processamento computacional [37]. Recentemente, mais estudos têm sido realizados no método de controle preditivo (MPC) para melhorar a precisão de rastreamento de caminho de robôs móveis autônomos [38, 39]. O MPC é capaz de prever informações de trajetória futura e decidir as ações de controle ótimas. Porém, é muito desafiador para a implementação em tempo real [40].

Os controladores de caminho ajudam a reduzir o erro lateral entre o veículo e o caminho de referência, mas muitos têm dificuldades em curvas acentuadas [41]. É perigoso passar por uma curva acentuada sem ajustar adequadamente a velocidade e o ângulo de direção do veículo. Assim como um motorista deve reduzir a velocidade e controlar o volante para passar com segurança por uma curva, o carro deve seguir um princípio semelhante ao rastrear o caminho de referência.

# 1 O CARRO AUTÔNOMO

## 1.1 Introdução

O carro autônomo recebeu muita atenção durante a última década e versões de protótipos foram desenvolvidas por diferentes fornecedores [42–44]. No entanto, a realização comercial de veículos autônomos continua sendo um desafio significativo [12]. Basicamente, o carro autônomo é equipado com sensores e atuadores que geram muitos dados em tempo real que devem ser processados e analisados para que decisões oportunas sejam tomadas [2]. Portanto, o projeto de um carro autônomo deve considerar o volume, velocidade, qualidade, heterogeneidade e natureza em tempo real dos dados [45]. Vale a pena notar que diferentes fabricantes de automóveis utilizam tecnologias de sensores e atuadores integrados para diferentes tipos de aplicações otimizadas [46]. No entanto, no centro do projeto do carro autônomo está o principal requisito de poder funcionar de forma autônoma [47]. Em outras palavras, o carro autônomo requer recursos que permitirão prever, decidir e se mover com segurança e confiabilidade de acordo com algum plano. Nesta seção, é descrito algumas das características mais fundamentais do projeto de carros autônomos.

A Figura 1 mostra os principais componentes funcionais de alto nível de um sistema de carro autônomo típico. A estrutura em camadas inclui a aquisição de dados realizada pelos componentes de *hardware*, como sensores de bordo e no carro; radares de curto e longo alcance; detecção e alcance a laser (LIDAR, do inglês *Light Detection and Ranging*); e câmeras e dispositivos de comunicação (transceptores). Os dados recolhidos através destes componentes são processados pelo sistema informático central do veículo, sendo posteriormente utilizados pelo sistema de apoio à decisão. Este último, aciona o veículo. Vale ressaltar que a consciência situacional é realizada por meio de dispositivos de imagem de curto e longo alcance que incluem radar, LIDAR e câmeras. A Figura 2 mostra as áreas cobertas por esses componentes. Diferentes faixas de consciência situacional se aplicam a diferentes aplicações e são alcançadas por meio de diversos componentes. Por exemplo, colisões no pára-choques dianteiro e traseiro são evitadas por meio de dispositivos infravermelhos, enquanto o aviso de mudança de faixa, detecção de objetos de curto alcance e construção de visão de tráfego são fornecidos por radares de curto alcance. O carro autônomo também é equipado com diversas câmeras para as vistas ao redor

e o LIDAR é usado para evitar colisões e freios de emergência. O controle de cruzeiro cooperativo e a construção de visão de tráfego de longo alcance são alcançados por radares de longo alcance. Todos os componentes mencionados estão em rede e trabalham em estreita colaboração uns com os outros, conforme mostrado na Figura 1.

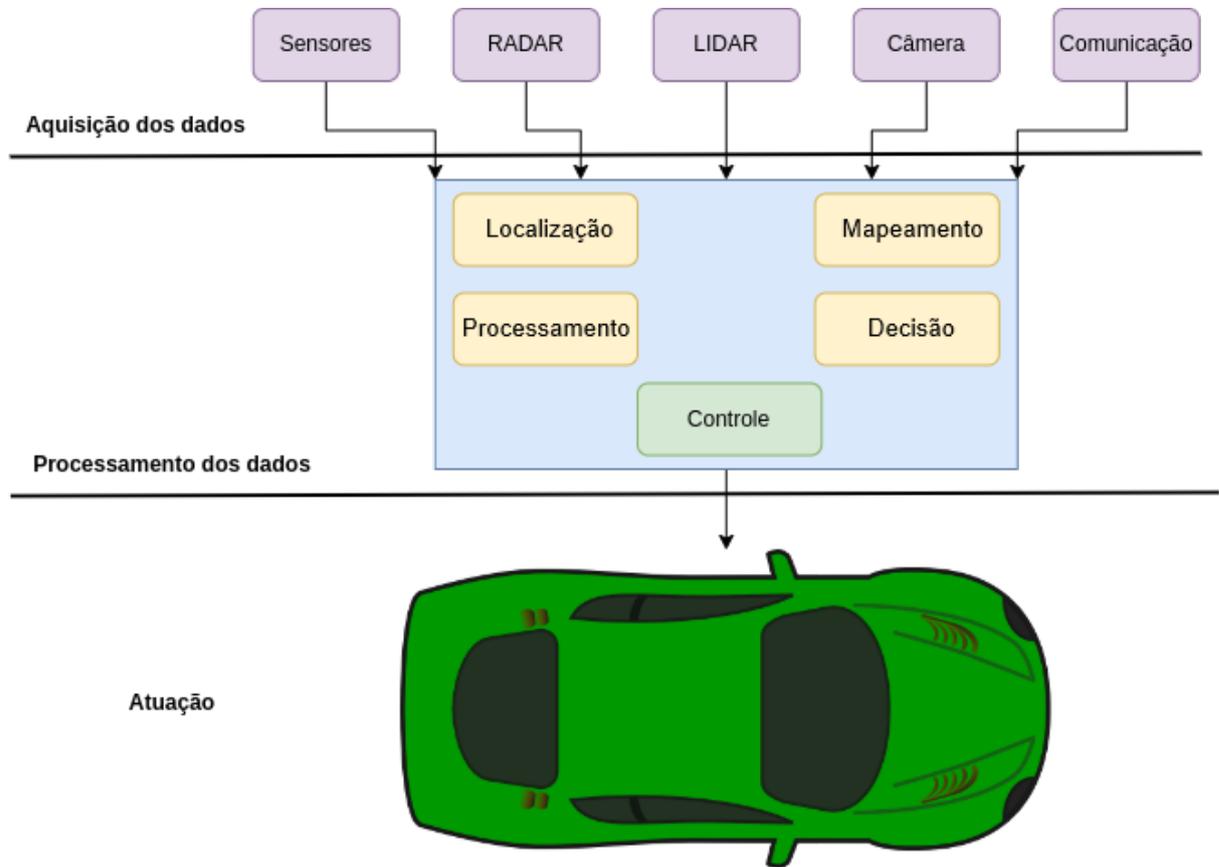


Figura 1 : Arquitetura funcional.

Fonte: Adaptado de Hussain, Rasheed *et al.* [1].

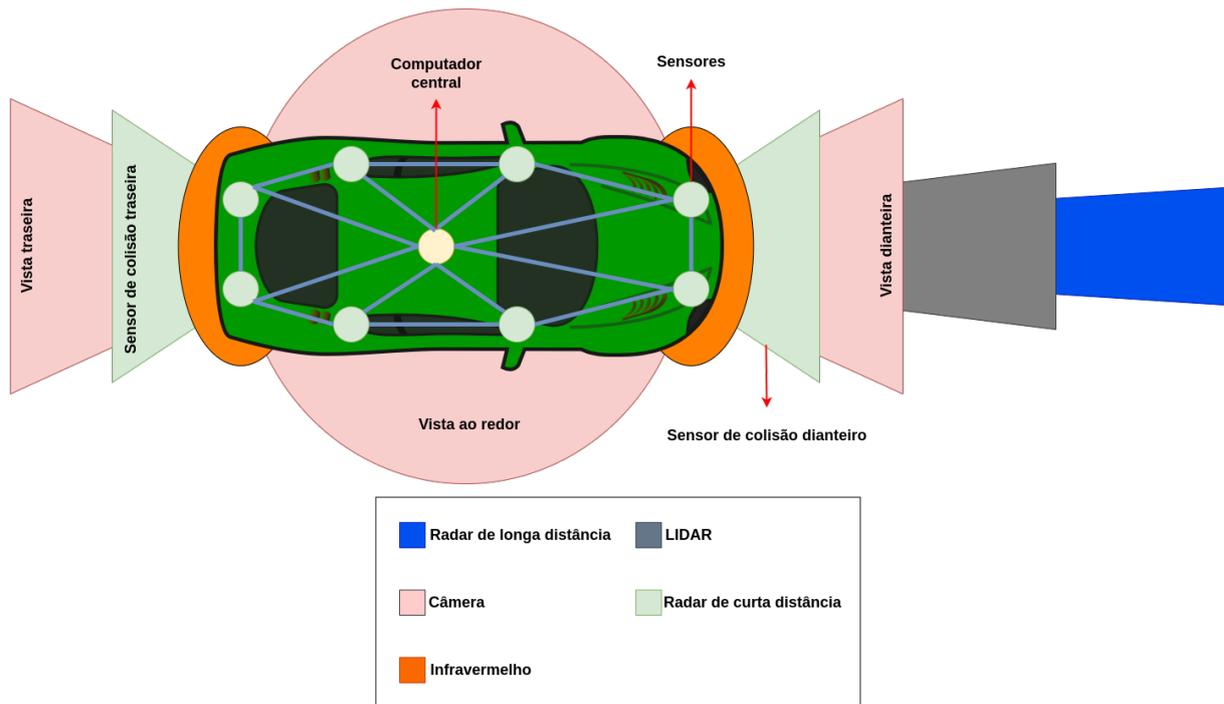


Figura 2 : Arquitetura do sistema.

Fonte: Adaptado de Hussain, Rasheed *et al.* [1].

Para que um carro autônomo se mova do ponto A ao ponto B, ele precisa realizar uma série de etapas: detectar o ambiente ao redor, planejar a viagem, navegar e fazer movimentos controlados na estrada. As principais etapas responsáveis pela execução das tarefas mencionadas em um carro autônomo incluem:

1. detecção do ambiente;
2. navegação e planejamento de trajetos; e
3. controle de manobra.

Observa-se que estas etapas são iterativas desde o ponto que o carro começa a se mover até chegar ao destino. Após detectar o ambiente, o carro efetua o desenvolvimento da trajetória de movimento seguida pela navegação. Para além da detecção do ambiente, o carro autônomo comunica com várias outras entidades que incluem infraestruturas rodoviárias, vizinhos (automóveis autônomos e veículos contactados), entidades de registo e gestão e prestadores de serviços. Vale a pena notar que a tecnologia de carros conectados rendeu resultados de pesquisa notáveis em arquitetura, comunicação, aplicativos

e serviços [1]. A tecnologia de carros conectados é realizada por meio de Redes *Ad hoc* Veiculares (do inglês VANETs) [48], onde os veículos na estrada se comunicam entre si, com a infraestrutura e com o ambiente por meio de diferentes tecnologias de comunicação subjacentes, como, entre outras, IEEE 802.11p [49], WiFi, LTE [50], Comunicação de Luz Visível (do inglês VLC) [51] e assim por diante. Finalmente, o carro se move com base no caminho no mapa que gerou.

### 1.1.1 Detecção do ambiente

O primeiro e mais importante passo para carros autônomos é a detecção da vizinhança, que inclui rastreamento de objetos, auto posicionamento e detecção de faixas. Mais especificamente, o carro deve conseguir perceber o que está à sua frente e, sem perda de generalidade, em 360 graus. Como mencionado, vários componentes de hardware são usados para esse fim, desde câmeras de bordo até radares de médio e curto alcance. No entanto, esses componentes apresentam vantagens e desvantagens. Embora as câmeras sejam eficazes, a quantidade e velocidade dos dados em tempo real necessários para a conscientização da vizinhança exigem um poder de computação intensivo. Além disso, a granularidade dos dados obtidos das câmeras é inversamente proporcional à velocidade e desempenho do sistema de apoio à decisão. Portanto, outra alternativa é necessária para habilitar a funcionalidade de percepção para carro autônomo.

Nesse contexto, a tecnologia de radar tem se mostrado eficiente no rastreamento de objetos do que as câmeras, tornando-se uma opção prática para os veículos. Nesse caso, o rastreamento LIDAR é usado. A principal característica do LIDAR inclui visualização de 360 graus e rastreamento de objetos com um alcance relativamente longo. Portanto, um dispositivo LIDAR pode ser montado no topo do carro para obter uma visão completa do ambiente ao redor. No entanto, vale a pena notar que para detecção intensiva de objetos, como resistência a colisões durante o estacionamento, prevenção de colisões e proteção de pára-choques, o LIDAR não funciona eficientemente [52]. Por esse motivo, radares otimizados são instalados na frente, traseira e laterais do carro para estas tarefas. Os dados obtidos desses dispositivos ajudam o sistema de apoio à decisão do carro autônomo a manter a velocidade, aplicar freios, mudar de faixa e manobrar, além também de serem usados por programas sofisticados para gerar uma imagem 3D do ambiente ao redor.

### 1.1.2 Navegação

A navegação é de suma importância em um carro autônomo, pois sua principal função é permitir que este percorra o caminho desejado. Quando o carro tem os dados do seu ambiente, ele precisa planejar seu caminho com base no destino. Com a ajuda de hardware de navegação, como o conhecido módulo de sistema de posicionamento global (GPS, do inglês, *Global Positioning System*), o carro gera um caminho entre a posição atual e o destino em função do tempo. O GPS é a principal fonte de navegação para o carro devido a sua precisão, hardware otimizado e compacto, baixo custo e amplo uso. Além disso, o caminho é recalculado dinamicamente no caso de determinados eventos, como bloqueio de estrada, desvio e assim por diante. O sistema de navegação deve ser robusto para lidar com mudanças repentinas e subsequentes no caminho, ajustando a rota já pré-calculada. As redes rodoviárias são fisicamente pré-definidas e o sistema de orientação do carro autônomo verifica regularmente o movimento do carro em relação ao caminho calculado. Vale ressaltar que, embora uma solução baseada em GPS forneça um rico conjunto de funcionalidades em orientação e navegação, em determinados cenários, o GPS por si só não é suficiente. Como o GPS é baseado em sinais de satélites em órbita, os sinais às vezes podem ser bloqueados ou deteriorados devido a fenômenos naturais, ou artificiais, como estradas subterrâneas e túneis. Nesses casos, outros meios de orientação inercial e navegação são necessários.

Para resolver esse problema, o veículo deve estar equipado com giroscópios e acelerômetros. O método de posicionamento inercial não fornece informações sobre a posição do veículo, portanto, a posição inicial do giroscópio deve ser fornecida por GPS ou inserida manualmente. No caso de carros autônomos, tanto o giroscópio quanto o GPS podem funcionar bem juntos se o contexto do movimento for conhecido. Para carros autônomos, as informações do GPS são frequentemente usadas como entrada para um algoritmo especial de geração de mapas que usa aquisição de dados e informações sensoriais adquiridas do veículo. Vários esforços de pesquisa foram conduzidos e testados em dados reais para gerar um mapa para carros autônomos [53, 54]. Os resultados são promissores e ajudam na sua implantação comercial.

### 1.1.3 Controle de manobra

Depois que o carro autônomo percebe seus arredores e usa essas informações com as informações de destino, ele inicia sua jornada. Diferentes manobras devem ser cuidadosamente controladas para um deslocamento suave e seguro ao longo da estrada. A maioria dos componentes do carro são controlados eletronicamente por Unidades de Controle Eletrônico ( ECUs, do inglês *Engine Control Units*) [55]. As ECUs comunicam-se entre si e com o sistema de suporte à decisão através da Rede de Área do Controlador (CAN, do inglês *Controller Area Network*) dentro de cada carro [56]. Durante o percurso, o veículo deve manter diferentes tipos de manobras, como manutenção de faixa, distância de pára-choques, freadas bruscas, ultrapassagens e paradas em semáforos. Essas manobras precisam de suporte de *hardware/software* e ampla coordenação e compartilhamento de dados em tempo real entre os diferentes sistemas de controle do carro.

## 1.2 Benefícios

O conceito do carro autônomo, apesar de sua complexidade, abre novas aplicações inovadoras e apresenta aos consumidores segurança, facilidade de uso, conforto e serviços de valor agregado. Nesta seção, são discutidos alguns dos principais benefícios dos carros autônomos e futuras aplicações.

### 1.2.1 Melhor segurança

A segurança é uma característica multidimensional no domínio automotivo, onde as vidas humanas têm a maior prioridade quando se trata de dirigir. No caso dos carros autônomos, uma das aplicações mais importantes é a condução segura de seus ocupantes. Todos os anos, os acidentes rodoviários custam 1,3 milhões de vidas e 50 milhões de feridos graves em todo o mundo [57]. Conforme a Administração Nacional de Segurança no Trânsito Rodoviário (NHTSA, do inglês *National Highway Traffic Safety Administration*) do Departamento de Transportes dos Estados Unidos (DoT, do inglês *United States Department of Transportation*), 94% dos acidentes de trânsito são causados por erros humanos [58]. Erros humanos são causados por vários fatores, incluindo distração, agressividade, descuido, intoxicação e deficiências. Além disso, esses erros também custam cerca de 190 bilhões de dólares em custos de saúde e danos causados anualmente por esses

acidentes [59]. Com base nessas estatísticas alarmantes, um mecanismo de condução alternativo é essencial para salvar vidas. Diante das estatísticas de fatalidades mencionadas com carros conduzidos por humanos, um carro autônomo pode ser uma alternativa mais segura com um número menor de motoristas humanos ao volante. Carros autônomos pelo menos eliminarão a probabilidade de erros humanos que respondem por 94% dos acidentes de trânsito [1].

### 1.2.2 Oportunidades de negócios

A mobilidade como serviço e compartilhamento de carros são duas das aplicações promissoras possibilitadas por carros autônomos sem interações humanas redundantes. Esse serviço economizará muitos recursos do consumidor, incluindo dinheiro, tempo, espaço e até recursos humanos (como motoristas) [60]. Carros autônomos podem ser usados como um recurso em vez de possuir um bem, o que exigirá não apenas uma grande quantia de dinheiro adiantada, mas também um motorista e um espaço para estacioná-lo. Além disso, o compartilhamento de carros é uma aplicação popular entre os consumidores hoje. No entanto, com o surgimento de carros autônomos, utilizando recursos de forma mais eficaz. Nos últimos anos, os serviços de caronas atraíram muita atenção entre os passageiros diários por vários motivos, como economizar dinheiro e tempo, além do incômodo de dirigir que, de outra forma, tornaria o deslocamento estressante. Com a carona tradicional, ainda há restrições de tempo ao pegar outros passageiros no caminho [1, 60]. Além disso, o custo compartilhado pelos passageiros também pode considerar os custos do motorista. Ao usar carros autônomos para serviços de carona, pode-se eliminar esses custos [61]. Essa mudança de perspectiva não apenas criará vantagens econômicas, mas também diminuirá a poluição do ar causada por situações de tráfego nas cidades metropolitanas globais [62]. Também cria oportunidades de negócios e transforma a mentalidade de consumidores e prestadores de serviços [61].

### 1.2.3 Facilidade de uso e conveniência

Outro benefício dos carros autônomos é a facilidade de uso e conveniência. Às vezes, as pessoas são incapazes de dirigir um carro devido a condições médicas/incapacidades ou intoxicação [1]. Além disso, o carro autônomo também pode ser um meio de transporte adequado para idosos, jovens adultos sem carteira de motorista e pessoas que não podem

ter um carro [63]. Nesses casos, o carro autônomo pode fornecer uma maneira segura e econômica de aumentar a mobilidade dos cidadãos.

#### 1.2.4 Melhores condições de tráfego

Melhorar as condições de tráfego é outro grande benefício dos carros autônomos. A combinação de viagens de carro ou a coordenação de frotas pode aumentar a produtividade nas rodovias em até 20 vezes [64], melhorando assim as condições de tráfego. Além disso, com motoristas humanos, a distância entre veículos é um parâmetro rigoroso a ser mantido para uma direção segura. No entanto, com carros autônomos, essa distância potencialmente diminuirá, proporcionando mais espaço na estrada. Ao se comunicar cuidadosamente com seus pares, os carros autônomos podem realizar um gerenciamento inteligente de frotas, reduzindo os congestionamentos nas estradas. Além disso, os carros autônomos também podem ajudar a cumprir as leis de trânsito com mais precisão, reduzindo assim a necessidade de policiais de trânsito nas estradas.

De uma perspectiva diferente, os carros autônomos também melhoram a eficiência do combustível selecionando as melhores rotas [65], o que também diminuirá a poluição do ar. A eficiência de combustível é diretamente proporcional à forma como as pessoas dirigem. Diferentes motoristas se comportam de maneira diferente ao volante. Alguns comportamentos de condução comuns incluem excesso de velocidade, condução irregular, partida e parada e frenagem repentina que diminuem a eficiência do combustível [66]. Nesse caso, o carro autônomo pode ser programado para usar um modo de economia de combustível e evitar comportamentos de condução erráticos que causam ineficiência de combustível [67]. A coordenação e a comunicação entre carros autônomos e conectados também ajudarão a eliminar situações de frenagem desnecessárias.

#### 1.2.5 Estacionamento autônomo

Atualmente, o estacionamento é um dos grandes desafios nas metrópoles devido ao número crescente de veículos, densidade populacional, distância entre veículos nos estacionamentos e má gestão de estacionamentos gratuitos. Com o surgimento de carros autônomos, o estacionamento autônomo aliviará os problemas de estacionamento. Por exemplo, após deixar os passageiros, um carro autônomo pode estacionar mesmo em vagas de estacionamento estreitas disponíveis. A vantagem dessa abordagem de esta-

cionamento economizaria 6,8 bilhões metros quadrados apenas nos estacionamentos dos Estados Unidos [1].

### 1.3 Formulação do problema

A tecnologia do carro autônomo traz benefícios significativos, como aprimoramento da segurança, gerenciamento de tráfego, gestão de tempo, facilidade de acesso e outros. No entanto, assim como outras inovações, esse veículo também é suscetível a riscos e desafios sociais [68,69]. Existem vários riscos envolvidos na proliferação desse tipo de carro, como a sua adaptação em nossas vidas, erros que podem levar a acidentes fatais e o medo natural das pessoas em relação à mudança. O risco também tem uma dimensão social para diferentes grupos de pessoas. Por exemplo, os beneficiários (fornecedores e prestadores de serviços) não são afetados pelo (possível) dano causado pelo veículo, enquanto os consumidores (que assumem o risco direto) não compartilham dos mesmos benefícios que os fornecedores. Em resumo, os problemas sociais associados aos carros autônomos são um dilema, porque, por um lado, como sugerido por uma pesquisa recente [70], os consumidores aprovam decisões morais utilitárias (o carro deve sacrificar os passageiros pelo bem maior), mas, por outro lado, os mesmos consumidores não prefeririam andar no mesmo veículo. O estudo de Bonnefon et al. [70] concluiu que uma troca racional é essencial para escolher os tipos certos de algoritmos entre algoritmos utilitários e de autoproteção (no caso de decisões morais) para o carro sem motorista. A discussão sobre os desafios sociais precisa de mais pesquisas. No entanto, nas discussões atuais, limitam-se os desafios sociais (como o comportamento das pessoas em relação aos carros autônomos e as implicações desses na sociedade, que incluem a perda de empregos para motoristas e de empresas) enfrentados pelos carros autônomos. Para isso, os desafios sociais incluem o comportamento humano dinâmico, bem como os desafios éticos e morais.

Durante a fase inicial de implantação, em que carros autônomos e não-autônomos compartilharão as estradas, é importante compreender o comportamento dos motoristas em relação aos carros sem motorista. Da mesma forma, o padrão de direção e comportamento dos autônomos também influenciará sua adoção. Portanto, é importante saber se os usuários serão capazes de ajustar o comportamento do veículo [71]. Outro desafio diz respeito a questões éticas. Os seres humanos possuem poder discricionário de julgamento, enquanto as máquinas não possuem. A tecnologia do carro autônomo é, em

princípio, desenvolvida para segurança e conforto, onde a segurança e proteção de seus ocupantes devem ser a mais alta prioridade. Isso deixa ao automatizado nenhuma margem para erros na estrada. No entanto, como mencionado anteriormente, o comportamento humano é altamente dinâmico e, portanto, será bastante desafiador lidar com diversas situações. Além disso, para imitar o comportamento humano, o carro deve ser flexível em se adaptar a qualquer situação imprevista na estrada. Atualmente, essa característica, juntamente com o comportamento dinâmico, não é totalmente realizada e mais pesquisas são necessárias nos campos de aprendizado de máquina, inteligência artificial humana para capacitar a tecnologia autônoma a reagir com segurança e sem atrasos a eventos imprevisíveis na estrada [72, 73].

O uso de diferentes modos de direção para carros autônomos pode ter impactos significativos em diferentes setores, como transporte, saúde e segurança pública. Por exemplo, o modo pacífico pode ser usado em áreas residenciais ou de tráfego intenso, ajudando a reduzir a congestão do trânsito e melhorar a qualidade de vida das pessoas que vivem em áreas urbanas. Já o modo em alta velocidade pode ser usado em situações de emergência, como o transporte de pacientes em ambulâncias, reduzindo o tempo de resposta e aumentando a eficiência do sistema de saúde.

Outro aspecto importante a ser considerado é a segurança do veículo, dos passageiros e dos demais usuários das vias. Diferentes modos de direção podem apresentar diferentes níveis de risco e é essencial entender como esses riscos podem ser mitigados por meio de tecnologias de segurança, como sistemas de detecção e resposta a obstáculos.

#### 1.4 Objetivo

No contexto da movimentação de carros autônomos, a proposta desta dissertação é adaptar o controlador de perseguição pura para o controle lateral e implementar um controlador híbrido para o controle longitudinal, que combina o controlador de duas posições com o controlador preditivo. Neste contexto, quando não há outros veículos na rota, o sistema prioriza a maximização da velocidade para reduzir o tempo de viagem. Por outro lado, quando outros veículos estão presentes, o foco do sistema é garantir a segurança e promover o respeito mútuo entre os condutores. Para avaliar o desempenho desse modo de direção em diferentes cenários, este trabalho utiliza o simulador CARLA, uma ferramenta de código aberto que permite testar algoritmos de direção autônoma em ambientes

realistas. A validação do modo de direção em diferentes cenários é fundamental para garantir que esse possa ser utilizado de forma segura e eficiente em aplicações reais, como o transporte de passageiros ou o uso em veículos de emergência.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está organizado em seis capítulos:

- **Capítulo 1:** Apresenta a introdução do trabalho, descrevendo o contexto em que a pesquisa se insere, os objetivos propostos e a justificativa para a realização do trabalho.
- **Capítulo 2:** Realiza o levantamento teórico, onde são apresentados os principais conceitos e teorias que embasam o trabalho.
- **Capítulo 3:** Apresenta o sistema de controle desenvolvido.
- **Capítulo 4:** Apresenta a implementação do simulador, descrevendo os aspectos técnicos e metodológicos para a aplicação do ambiente computacional.
- **Capítulo 5:** Discorre sobre os resultados obtidos a partir da execução de experimentos com o simulador, analisando os dados coletados e discutindo suas implicações.
- **Capítulo 6:** Traz a conclusão da pesquisa, destacando as principais contribuições e limitações do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

## 2 LEVANTAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados conceitos fundamentais relacionados aos desenvolvimentos realizados nesta Dissertação.

### 2.1 Modelo cinemático

A determinação do modelo cinemático é uma etapa fundamental no projeto e controle de robôs. Esse modelo matemático se concentra na descrição das relações entre as posições, velocidades e acelerações dos componentes do sistema, permitindo planejar movimentos e trajetórias desejadas. Esta seção apresenta o desenvolvimento do modelo cinemático para o robô tipo veículo.

A cinemática do veículo é emulada através do modelo de bicicleta [74]. Na Figura 3, é possível observar que o quadro de referência do veículo, responsável por descrever o seu caminho plano, tem origem no centro do eixo traseiro e é denotado por  $P$ .

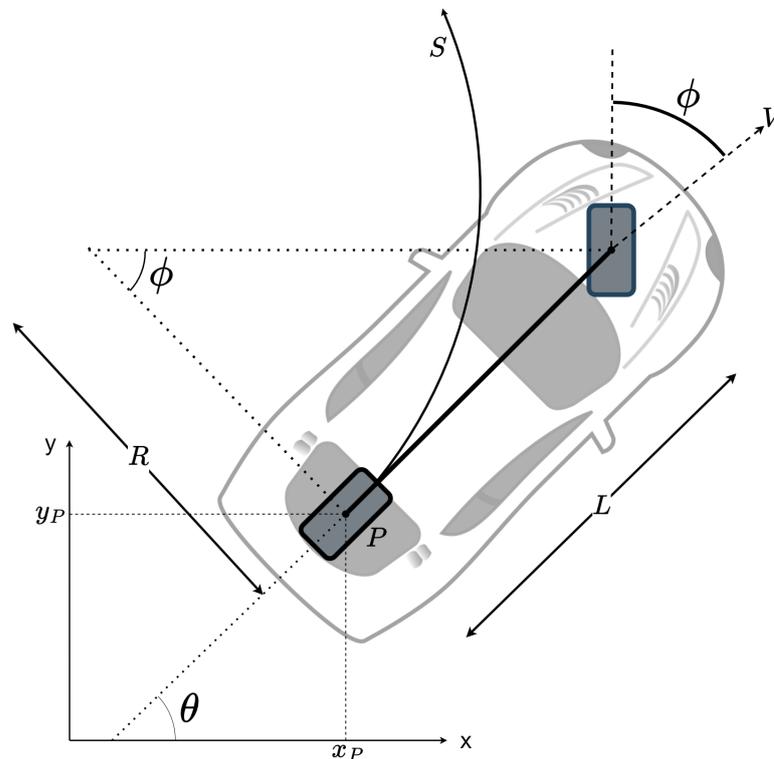


Figura 3 : Modelo cinemático do veículo.

Fonte: O Autor.

O raio de curvatura ( $R$ ) do caminho pode ser obtido como:

$$R = \frac{L}{\tan(\phi)} \quad (2.1)$$

onde,

$$\phi_{\min} \leq \phi \leq \phi_{\max} \quad (2.2)$$

que utiliza a distância entre os eixos do veículo ( $L$ ) e o ângulo de esterçamento ( $\phi$ ). Os valores desses e dos demais parâmetros do modelo podem ser encontrados na Tabela 1, sendo importante notar que o ângulo de esterçamento ( $\phi$ ) está sujeito a limitações.

Tabela 1 : Parâmetros da Cinemática do Veículo.

Parâmetro	Descrição
L	Distância entre os eixos do veículo
$\theta$	Ângulo do veículo em relação ao eixo x
R	Raio de curvatura instantâneo
P	Ponto de referência entre eixo traseiro
V	Velocidade linear
$\phi$	Ângulo de esterçamento do veículo
S	Distância percorrida pelo ponto de guiamento

Tem-se a distância percorrida ( $S$ ) pelo ponto de guiamento e a sua respectiva derivada ( $V$ ):

$$S = R\theta \quad (2.3)$$

$$\dot{\theta} = \frac{V}{R} \quad (2.4)$$

Sendo a decomposição da velocidade, no plano  $x$  e  $y$ :

$$\dot{x}(t) = V \cos(\theta(t)) \quad (2.5)$$

$$\dot{y}(t) = V \sin(\theta(t)) \quad (2.6)$$

A orientação do veículo ( $\theta$ ) e a sua derivada podem ser expressas da seguinte maneira:

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{\dot{y}(t)}{\dot{x}(t)}\right) \quad (2.7)$$

$$\dot{\theta}(t) = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (2.8)$$

Assim, a velocidade linear do automóvel e o seu ângulo de esterçamento são definidos:

$$V = \pm\sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2} \quad (2.9)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{L\dot{\theta}}{V}\right) \quad (2.10)$$

## 2.2 Velocidade crítica

A antecipação de uma curva é uma habilidade crucial para a condução segura de veículos, especialmente em curvas de alta velocidade. Uma das principais razões para tal, é a definição da velocidade crítica em uma curva, que é a velocidade limite na qual um veículo pode percorrer uma curva sem derrapar para fora da pista [75]. Antecipar a curva permite que o motorista reduza a velocidade do veículo com segurança antes de realizá-la, evitando ultrapassar a velocidade crítica e garantindo que o veículo permaneça na pista.

Ao percorrer uma curva em uma estrada plana, pode-se considerar que o veículo desempenha uma trajetória circular. A força que o mantém nesta trajetória, pode ser calculada utilizando a equação:

$$F = \frac{mV^2}{R} \quad (2.11)$$

na qual  $m$  é a massa do veículo,  $V$  a sua velocidade e  $R$  o raio da curva. Essa força aponta em direção do centro da curva.

A força centrípeta fornecida pelo atrito entre os pneus e a superfície da estrada ( $F_{at}$ ) é dada por:

$$F_{at} = \mu mg \quad (2.12)$$

onde  $\mu$  é coeficiente de atrito dos pneus com a estrada,  $m$  é a massa do veículo e  $g$  a aceleração da gravidade.

Substituindo a Equação (2.12) na (2.11), pode-se então definir a velocidade crítica para a curva ( $V_c$ ) como:

$$V_c = \sqrt{\mu g R} \quad (2.13)$$

Observa-se que a velocidade crítica não está relacionada à massa do veículo, sendo influenciada exclusivamente pelo coeficiente de atrito entre os pneus e a estrada, bem como pelo raio de curvatura da trajetória.

A Tabela 2 apresenta os coeficientes de atrito para carros de passeio em vários tipos de terreno [76].

Tabela 2 : Coeficientes de atrito para carros de passeio em vários tipos de terreno.

Tipo de Pista	$\mu$
Asfalto	0,6 a 0,95
Pedra britada	0,5 a 0,65
Terra seca	0,5 a 0,70
Terra úmida	0,5 a 0,60
Areia	0,2 a 0,3
Neve	0,3 a 0,35

Estabelecendo-se um caminho específico e conhecendo os coeficientes de atrito entre os pneus e a superfície do terreno, torna-se possível calcular a velocidade máxima que o veículo pode atingir com segurança.

### 2.3 Modelo do ambiente

De acordo com Thrun [77], para representar o ambiente no qual o veículo se movimenta, utiliza-se um mapa geométrico. Este mapa emprega primitivas geométricas a fim de construir uma abstração de alto nível do ambiente. Essa abordagem possibilita uma representação consistente e de fácil interpretação do ambiente, além de ser facilmente modelada computacionalmente. A Figura 4 ilustra a representação do veículo por quatro pontos que delimitam um retângulo, dentro do qual se inscrevem seu contorno verdadeiro. A representação delimitado por um retângulo é preferível à utilização de uma circunferência devido à sua maior fidelidade, mesmo que isso implique um custo

computacional mais elevado [78].

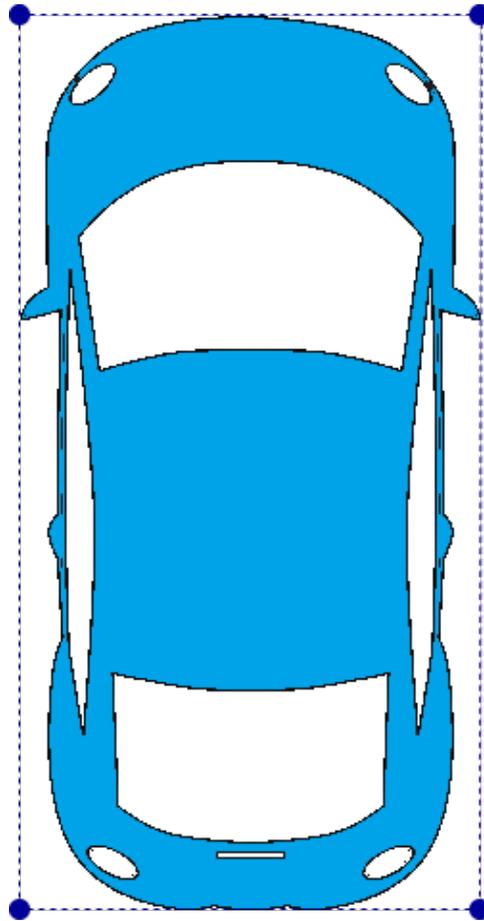


Figura 4 : Representação geométrica simplificada do veículo.

Fonte: O Autor.

### 2.3.1 Detecção de Colisões

A representação computacional deste modelo de ambiente permite também detectar colisões entre veículos. Cada veículo é representado por um retângulo, assim, para determinar se dois veículos colidiram, verifica-se se os retângulos que os representam apresentam sobreposição [79]. Isto é, analisa-se se existem vértices de um retângulo dentro da área do outro. Caso positivo, isto caracteriza uma colisão entre os veículos segundo esta modelagem.

Matematicamente, dado um veículo  $V$  representado por um retângulo com vértices  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ , e outro veículo  $V'$  representado, de forma similar, por  $V'_1$ ,  $V'_2$ ,  $V'_3$  e  $V'_4$  (conforme ilustrado na Figura 5). Pode-se detectar uma colisão entre  $V$  e  $V'$  da seguinte

maneira, para cada  $V_x \in V$  e  $V'_x \in V'$ , tem-se:

$$\sum_{i=1}^4 F_a(V'_x, V_i, V_{i+1}) > F_a(V_1, V_2, V_3, V_4) \quad (2.14)$$

$$\sum_{i=1}^4 F_a(V_x, V'_i, V'_{i+1}) > F_a(V'_1, V'_2, V'_3, V'_4) \quad (2.15)$$

onde a função  $F_a$  calcula a área definida pelos pontos de entrada.

Caso ambas as funções 2.14 e 2.15 sejam satisfeitas, pode-se afirmar que não há colisão entre os veículos  $V$  e  $V'$ . A Figura 5(a) mostra a representação dos dois veículos sem colisão e a Figura 5(b) apresenta um exemplo com colisão.

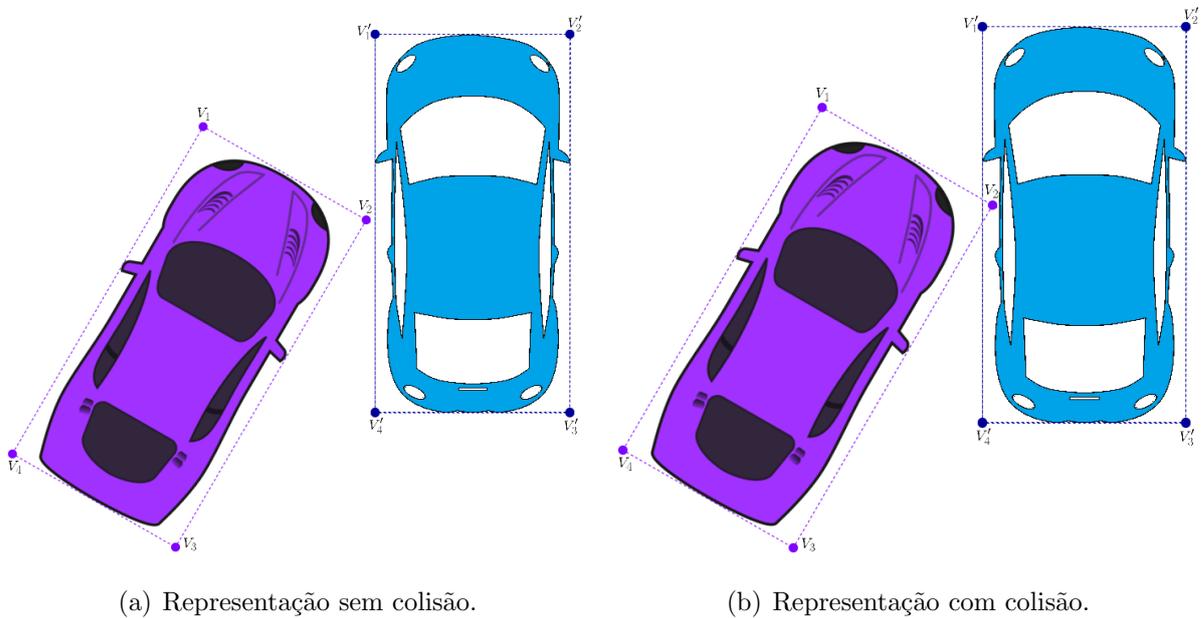


Figura 5 : Representação de dois veículos  $V$  e  $V'$ .

Fonte: O Autor.

#### 2.4 Controlador de duas posições ou *on-off*

Em um sistema de controle de duas posições, o componente atuante assume exclusivamente duas posições fixas, frequentemente representadas como “ligado” ou “desligado”. O controle de duas posições, também conhecido como controle *on-off*, é notavelmente simples e econômico. Em virtude dessa simplicidade e eficiência, esse tipo de controle encontra ampla aplicação em sistemas tanto domésticos quanto industriais [80].

Considere que o sinal de saída do controlador é  $u(t)$  e o sinal de erro atuante é  $e(t)$ .

No controle de duas posições, o sinal de controle ( $u(t)$ ) permanece em um valor máximo ou em um valor mínimo, dependendo se o sinal de erro atuante for negativo ou positivo. Assim,

$$u(t) = U_1, \text{ para } e(t) > 0 \quad (2.16)$$

$$= U_2, \text{ para } e(t) < 0 \quad (2.17)$$

onde  $U_1$  e  $U_2$  desempenham um papel crucial, sendo que  $U_2$ , em sua configuração mínima, tipicamente assume valores de zero ou  $-U_1$ . Esses controladores de duas posições são, em sua maioria, dispositivos elétricos, com destaque para as válvulas acionadas por solenoides, as quais são amplamente empregadas nesses controladores.

Neste trabalho, emprega-se um controlador de duas posições para gerenciar a operação do acelerador e do freio do veículo. Quando a velocidade do automóvel está abaixo do valor de referência desejado, o acelerador é acionado para aumentar a velocidade. Por outro lado, quando a velocidade excede o valor de referência, o sistema de freios é ativado para reduzir a velocidade do veículo.

## 2.5 Controlador preditivo

Sob uma perspectiva filosófica, o controlador preditivo imita o comportamento humano em muitas situações, uma vez que os seres humanos geralmente tomam ações que os levarão aos melhores resultados previstos dentro de um horizonte limitado de acordo com algum critério. Para escolher essa ação, usa-se uma ideia preexistente sobre o sistema em questão e, portanto, constantemente reavalia-se as decisões por meio de novas observações disponíveis [81]. Essa é a premissa fundamental do controlador preditivo, conforme será visto nessa seção.

O controle preditivo tornou-se muito popular nos últimos anos devido à sua versatilidade e capacidade de lidar com problemas complexos de controle com restrições. Sua formulação como otimização sobre um horizonte de predição decrescente permite que integre uma variedade de técnicas de controle. Isso torna o controlador bem adequado para lidar com os processos não lineares comumente encontrados na indústria [82].

O controle preditivo não se refere a uma estratégia de controle única, mas a toda uma classe de métodos de controle que compartilham conceitos fundamentais em comum.

As principais características que definem um controlador preditivo são:

- A predição do comportamento futuro das variáveis dinâmicas de um processo, num determinado horizonte de tempo, é realizada através de um modelo explícito desse mesmo processo
- As ações de controle são calculadas ao longo de todo o horizonte de predição por meio da minimização de uma função objetivo (ou custo) especificada.
- Utiliza-se uma estratégia de horizonte deslizante, onde a cada período de amostragem, o horizonte de predição é deslocado um passo à frente no tempo. As ações de controle futuras são então recalculadas dentro desse novo horizonte, porém apenas a primeira ação de controle é aplicada no processo, enquanto as demais são descartadas.

As diferenças entre os diversos algoritmos de controle preditivo baseiam-se principalmente no tipo de modelo utilizado para representar o processo e perturbações, na forma da função objetivo a minimizar e nos procedimentos para tratamento das restrições e cálculo da lei de controle. A escolha do modelo de predição é um dos fatores chave, devendo este representar, de melhor maneira, a dinâmica do processo e ser suficiente para capturar seu comportamento, permitindo o cálculo das predições da saída. A lei de controle resultante é de simples implementação e requer poucos cálculos, quando a dinâmica do processo é invariante no tempo e não há restrições. Porém, no caso de controle adaptativo, todos os cálculos devem ser refeitos a cada intervalo de amostragem. Além disso, a consideração de restrições aumenta significativamente a carga computacional necessária.

### 2.5.1 Elementos sobre controle preditivo

Todos os algoritmos de controle preditivo possuem os seguintes elementos em comum:

#### 2.5.1.1 O modelo de predição

O modelo de predição é essencial no controlador, pois precisa simular precisamente a dinâmica do processo para calcular predições da saída, ser intuitivo e ainda possibilitar

análise teórica do sistema. Neste caso, é utilizado o modelo cinemático [83], apresentado na Seção 2.1, da seguinte forma:

$$x_{t+1} = x_t + V \cos(\theta_t) \Delta t \quad (2.18)$$

$$y_{t+1} = y_t + V \sin(\theta_t) \Delta t \quad (2.19)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \frac{V \tan(\phi)}{L} \Delta t \quad (2.20)$$

onde  $x_{t+1}$  e  $y_{t+1}$  representam a posição do veículo e  $\theta_{t+1}$  sua orientação no próximo instante de tempo definido por  $\Delta t$ , diante da sua velocidade ( $V$ ) e seu ângulo de esterçamento ( $\phi$ ).

### 2.5.1.2 A função objetivo

A função objetivo calcula a lei de controle visando minimizar a diferença entre a saída futura e o valor de referência almejado. Neste trabalho, a aplicação do controlador preditivo busca controlar a velocidade do veículo evitando colisão com outros veículos. Diante dessa meta, adotou-se função de custo ( $J$ ) como:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} [\text{coli}(e_k, \Delta t) V_k^2] \quad (2.21)$$

no qual,

- $\text{coli}(e_k, \Delta t)$  é uma função que verifica se há uma colisão prevista dentro do intervalo de tempo  $\Delta t$  a partir do instante de tempo  $k$ , com base no estado do sistema  $e_k$ . Essa função retorna 1 se houver uma colisão prevista no intervalo de tempo  $\Delta t$ , e 0 caso contrário.
- $V_k$  é a velocidade do veículo no instante de tempo  $k$

### 2.5.1.3 Método para obtenção da lei de controle

Nos controladores preditivos, visa-se minimizar o erro calculando a lei de controle ótima futura. Isso requer previsões da saída baseadas no modelo em função das ações de controle. Em modelos lineares irrestritos, encontra-se analiticamente o ótimo. Caso contrário, utilizam-se métodos numéricos iterativos. Nesta aplicação é utilizada a atualização iterativa, no qual a ação de controle é aplicada ao sistema. Em seguida, o processo

é repetido em um novo horizonte de predição, com base na nova estimativa do estado do sistema.

Neste trabalho, é integrado um controlador preditivo para gerenciar as ações do veículo. Considerando um determinado horizonte temporal, quando uma colisão é prevista, o controlador aciona imediatamente os freios do veículo. Por outro lado, quando não é detectada a possibilidade de colisão, o controlador mantém a velocidade atual do veículo.

## 2.6 Controlador de perseguição pura

O controle lateral de um veículo autônomo é uma das funções chave de um sistema de direção autônoma, que permite ao veículo se mover lateralmente na estrada, mudar de faixa, ultrapassar outros veículos e manter uma trajetória segura e eficiente na pista. A técnica mais comum para desenvolvimento de controle lateral é baseado na geometria, que usa como argumento principal a relação entre o veículo e a trajetória a ser seguida, aqui a estratégia de controle é chamada perseguição pura. Trata-se de um algoritmo de rastreamento, baseado na geometria da cinemática do veículo [27]. Tomando como referência o modelo cinemático e dado um ponto alvo,  $l_{d\phi}$  e  $\alpha$  são definidos respectivamente como a distância e a inclinação entre ele e o veículo, conforme mostrado na Figura 6.

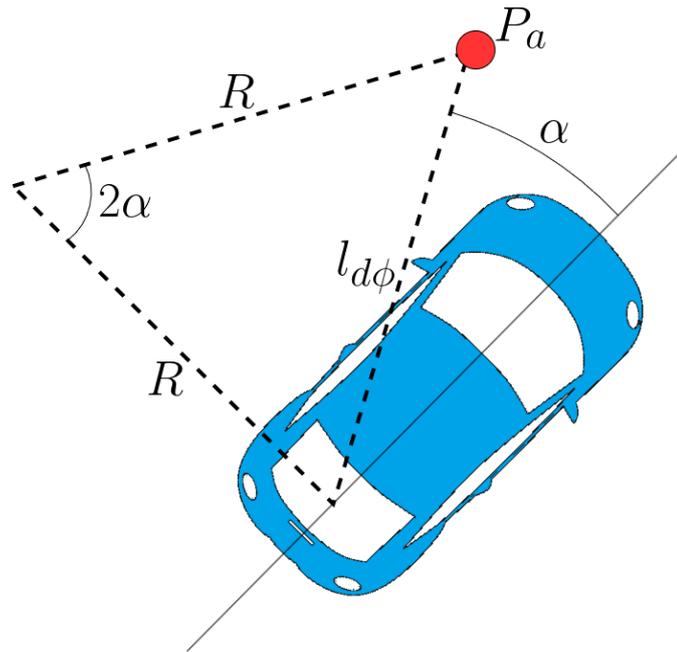


Figura 6 : Geometria do controlador de perseguição pura.

Fonte: O Autor.

Definindo o raio de curvatura ( $R$ ), chega-se ao triângulo isósceles mostrado na Figura 6 e tem-se a seguinte relação [27]:

$$R = \frac{l_{d\phi}}{2 \operatorname{sen}(\alpha)} \quad (2.22)$$

Correlacionando com o modelo cinemático do veículo, detalhado na Seção 2.1, o ângulo de direção ( $\phi$ ) pode ser calculado como:

$$\phi = \arctan\left(\frac{2L \operatorname{sen}(\alpha)}{l_{d\phi}}\right) \quad (2.23)$$

no qual  $L$  é a distância entre os eixos do veículo, apresentado na Seção 2.1.

O objetivo é garantir o controle contínuo do veículo ao longo de seu trajeto. No entanto, como a sequência de pontos que descrevem o trajeto é frequentemente muito próxima, pode haver dificuldade em manter a trajetória em curvas acentuadas ou em situações de perturbação. Por isso, é necessário adaptar o algoritmo para torná-lo mais resistente [27]. Uma solução comum é usar uma distância de antecipação ( $L_{ad}$ ), que é a distância mínima necessária para que o algoritmo possa prever o próximo ponto de destino e, assim, suavizar a curva e manter a rota estável.

Em muitas aplicações, é comum utilizar uma distância de antecipação ( $L_{ad}$ ) constante para ajudar a garantir a estabilidade do veículo em curvas e outras situações de direção [84–86]. No entanto, em altas velocidades, uma distância de antecipação constante pode ser perigosamente agressivo e não conseguir manter o controle do veículo. Uma melhoria é variar a distância antecipação ( $L_{ad}$ ) com base na velocidade do veículo [27], como:

$$L_{ad} = K_{d\phi}V \quad (2.24)$$

onde  $K_{d\phi}$  é a constante da distância de antecipação e  $V$  a velocidade do veículo.

A principal vantagem de utilizar uma distância de antecipação para antecipar uma curva é que isso permite que o sistema de controle ajuste a trajetória do veículo com antecedência, antes que ele chegue na curva. Isso significa que o veículo pode fazer uma transição mais suave e controlada para a nova trajetória, sem precisar realizar manobras bruscas ou arriscadas que possam comprometer a segurança dos passageiros ou de outros veículos na estrada.

### 3 RASTREAMENTO DE CAMINHO

O caminho que um veículo autônomo deve percorrer para seguir uma de referência com precisão pode ser dividido em uma sequência de pontos alvos ( $P_a$ ). Cada um desses pontos contém informações cruciais para o controlador que é responsável por gerar os comandos necessários para o veículo rastrear o caminho de forma precisa.

Para assegurar uma navegação eficiente, é imprescindível que o controlador emita comandos para gerenciar tanto a velocidade ( $V$ ) quanto o ângulo de esterçamento ( $\phi$ ) do veículo. Com base nisso, uma estratégia é apresentada, a qual se baseia em ações de controle lateral e longitudinal.

O caminho de referência, plano, é definido por uma sequência de pontos alvo, unidos por interpolação linear [87]. Cada ponto alvo contém informações como sua posição no plano cartesiano e sua velocidade de referência, determinada pela velocidade crítica. O controlador usa essas informações para determinar a ordem correta dos pontos alvos, garantindo a melhor performance do veículo durante a navegação e alcançando o caminho de referência com segurança.

#### 3.1 Controle lateral

O controle lateral em veículos autônomos refere-se aos algoritmos e técnicas utilizados para controlar o movimento lateral do veículo, ou seja, a direção das rodas de modo a seguir um caminho desejado. Esse controle é realizado por meio da técnica de perseguição pura, como já descrito anteriormente, baseada na geometria da cinemática do veículo. Contudo, uma vez definido o caminho de referência por uma sequência de pontos alvos, é comum que o veículo siga esse caminho de forma ordenada e respeitando a distância de antecipação ( $L_{ad}$ ) [27, 84, 85].

Neste trabalho, uma adaptação é realizada em relação à ordem dos pontos de caminho a serem perseguidos. Ao invés de o veículo segui-los sequencialmente de forma ordenada, o veículo escolhe como próximo ponto de caminho aquele com o menor custo associado. O custo associado a cada ponto de caminho é definido pela seguinte função:

$$F_c = \sqrt{l_{d\phi}^2 + \theta_e^2} \quad (3.1)$$

na qual,  $l_{d\phi}$  é a distância euclidiana entre o veículo e o ponto alvo avaliado e  $\theta_e$  ( $\theta_e = \theta - \theta_a$ ) é o erro de orientação, dado pela diferença entre o ângulo de orientação do veículo e o ângulo da tangente à trajetória de referência no ponto de caminho avaliado. A Figura 7 apresenta a relação entre o veículo e o caminho de referência para definir o custo.

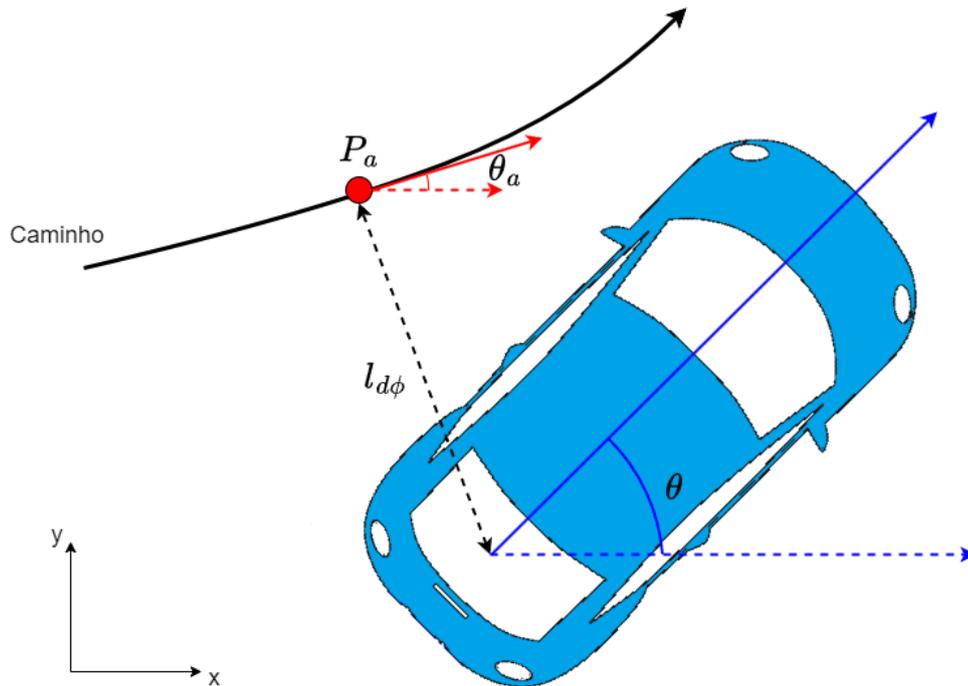


Figura 7 : Relação entre o veículo e o caminho de referência.

Fonte: O Autor.

### 3.2 Controle longitudinal

O controle longitudinal refere-se aos algoritmos e técnicas utilizados para controlar o movimento para frente e para trás do veículo, isto é, sua velocidade e aceleração. Similarmente ao controle lateral, o controle longitudinal também adota um horizonte de predição dado por uma distância de antecipação ( $L_{adv}$ ), conforme ilustrado na Figura 8. Esta distância ( $L_{adv}$ ) deve ser superior à distância lateral  $L_{ad}$ , de modo que o controlador possa, com base na referência de velocidade crítica, selecionar dentre os pontos de caminho neste horizonte aquele com menor velocidade associada. Esta estratégia garante que o veículo inicie procedimentos de desaceleração ao ingressar em trechos de curva do caminho, ajustando sua velocidade de acordo com a geometria local da curva, o que evita a perda de controle durante a saída da curva.

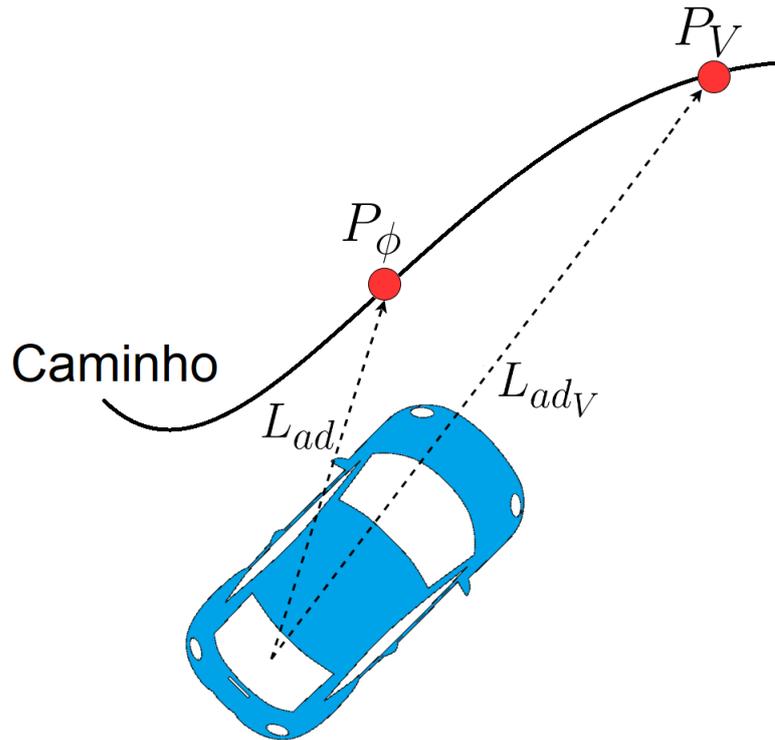


Figura 8 : Distância de antecipação

Fonte: O Autor.

Utilizando a mesma estratégia do controlador lateral, o  $l_{dV}$  varia em função da velocidade do veículo [27], da seguinte maneira:

$$L_{adV} = K_{dV}V \quad (3.2)$$

onde  $K_{dV}$  é a constante da distância de antecipação para o controle longitudinal e  $V$  a velocidade do veículo.

Uma vez determinada a velocidade de referência ao longo do caminho, o controle longitudinal é realizado através de um controlador de duas posições ou *on-off* [80].

### 3.2.1 Prevenção de colisões

Apesar dos algoritmos de controle longitudinal garantirem o seguimento de um caminho e velocidade de referência, situações inesperadas como a aparição súbita de um outro veículo na rota podem levar ao risco de uma colisão. Para lidar com essas possibilidades e garantir não apenas o controle adequado do veículo mas também a segurança, são empregadas técnicas específicas de prevenção de colisões. Essas técnicas complementam

o sistema de controle longitudinal, monitorando continuamente a presença de obstáculos à frente por meio de sensores e, em caso de risco iminente de colisão, age de forma autônoma sobre os freios para desacelerar o veículo bruscamente, evitando assim o impacto.

Neste trabalho, a técnica de prevenção de colisões adotada baseia-se em controle preditivo (Seção 2.5.1.1), aproveitando o modelo cinemático do veículo. O algoritmo realiza a predição em um horizonte de tempo ( $\Delta t$ ) de 0,5 segundos considerando o estado atual do veículo (velocidade e ângulo de esterçamento) assim como a configuração dos demais veículos em sua vizinhança. Com isso, é possível simular a trajetória futura do veículo e verificar a ocorrência de possíveis colisões neste intervalo de tempo. Caso uma possível colisão seja detectada na simulação, o sistema de frenagem é acionado imediatamente a fim de desacelerar o veículo e evitar tal colisão. Por outro lado, se a predição não apresentar riscos, o controle longitudinal segue normalmente utilizando como referência a velocidade crítica associada ao ponto alvo do caminho.

O fluxograma ilustrado na Figura 9 descreve o processo de integração dos controladores para o controle longitudinal.

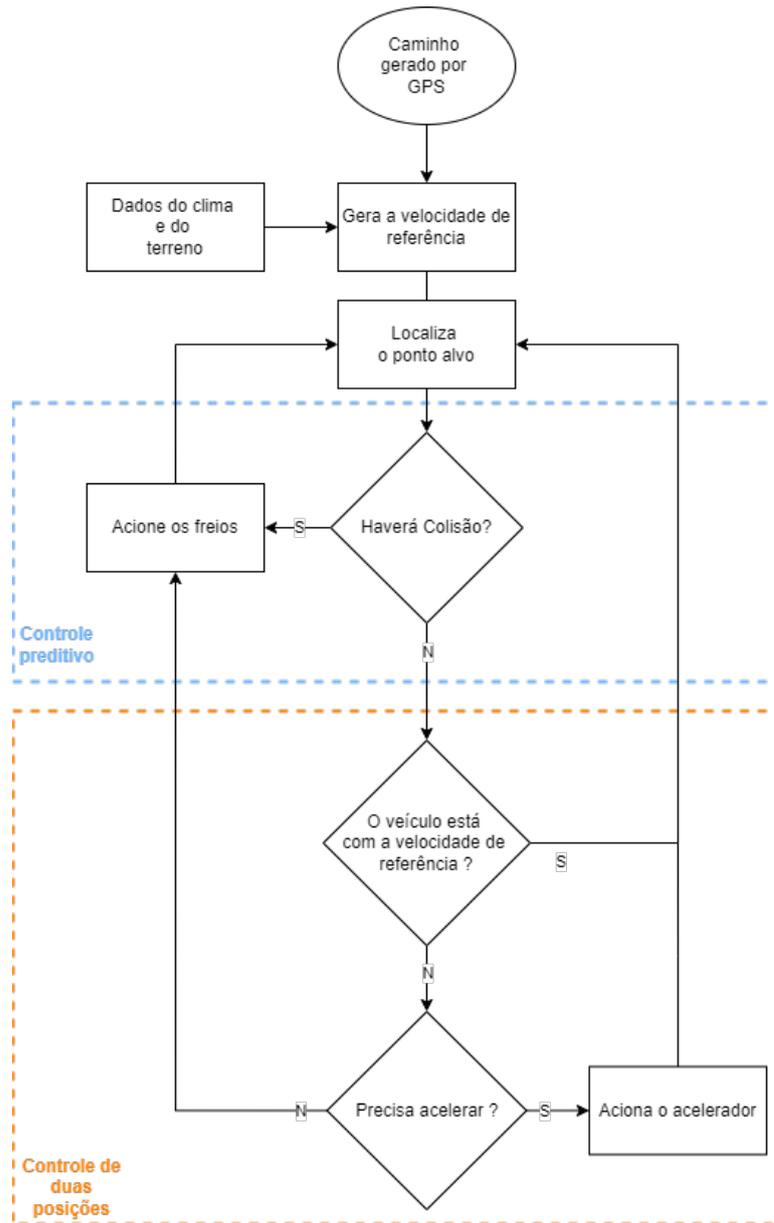


Figura 9 : Fluxograma do controle longitudinal

Fonte: O Autor.

## 4 SIMULADOR

O controle em ambientes tridimensionais continua sendo um grande desafio em aprendizado de máquina e robótica. O desenvolvimento de veículos terrestres autônomos é uma instância bem estudada desse problema [88,89]. Sua forma mais difícil é a navegação em ambientes urbanos povoados [14]. Isso é particularmente desafiador devido à complexa dinâmica multiagente em interseções de tráfego; a necessidade de rastrear e responder ao movimento de dezenas ou centenas de outros atores; regras de tráfego prescritivas que exigem reconhecer sinais de rua, semáforos e demarcações viárias; eventos raros; e a necessidade de reconciliar rapidamente objetivos conflitantes.

A pesquisa em direção urbana autônoma é dificultada por custos de infraestrutura e dificuldades logísticas. A simulação democratiza a pesquisa, sendo também necessária para verificação do sistema. A simulação tem sido usada para treinar e validar modelos de direção desde o início da pesquisa [90]. Mais recentemente, simuladores de corrida foram usados para avaliar novas abordagens [91]. As plataformas existentes são limitadas. Simuladores *open-source* como o TORCS [91] não apresentam a complexidade de ambientes urbanos. E jogos comerciais que simulam ambientes urbanos [92, 93] têm pouca customização e controle, limitada especificação de conjuntos de sensores e detalhamento de infrações.

Neste capítulo é apresentado o simulador CARLA (Inglês: *Car Learning to Act*) [94]. Este *software* é uma plataforma aberta e suporta configuração flexível de conjuntos de sensores e fornece sinais que podem ser usados para treinar e validar estratégias de direção e uma ampla gama de condições ambientais. Os requisitos mínimos para instalar o CARLA [95] estão na Tabela 3.

Tabela 3 : Requisitos mínimos para instalar o CARLA.

Parâmetro	Requisito mínimo
Sistema Operacional	Windows e Linux
Placa de vídeo	6GB
Espaço de armazenamento	20GB
Python	3

## 4.1 Mecanismo de Simulação

O CARLA foi construído para ter flexibilidade e realismo na renderização e simulação de física. Ele é implementado como uma camada de código aberto sobre o *Unreal Engine 4* (UE4) [96], permitindo extensões futuras pela comunidade. O mecanismo fornece qualidade de renderização, física realista, lógica básica de NPC (Inglês: *Non Playable Character*) e um ecossistema de *plugins* interoperáveis.

O CARLA emula um mundo dinâmico e fornece uma interface simples entre o mundo e um agente que interage com ele. Para dar suporte a essa funcionalidade, o simulador é projetado como um sistema cliente-servidor, onde o servidor executa a simulação e renderiza a cena. A API (Interface de Programação de Aplicação, do inglês *Application Programming Interface*) do cliente é implementada em Python e é responsável pela interação entre o agente autônomo e o servidor.

A Figura 10 apresenta o fluxograma da metodologia do funcionamento do simulador, o cliente envia comandos e meta-comandos para o servidor e recebe leituras de sensores em retorno. Os comandos controlam o veículo e incluem direção, aceleração e frenagem. Os meta-comandos controlam o comportamento do servidor e são usados para redefinir a simulação, alterar as propriedades do ambiente e modificar o conjunto de sensores.

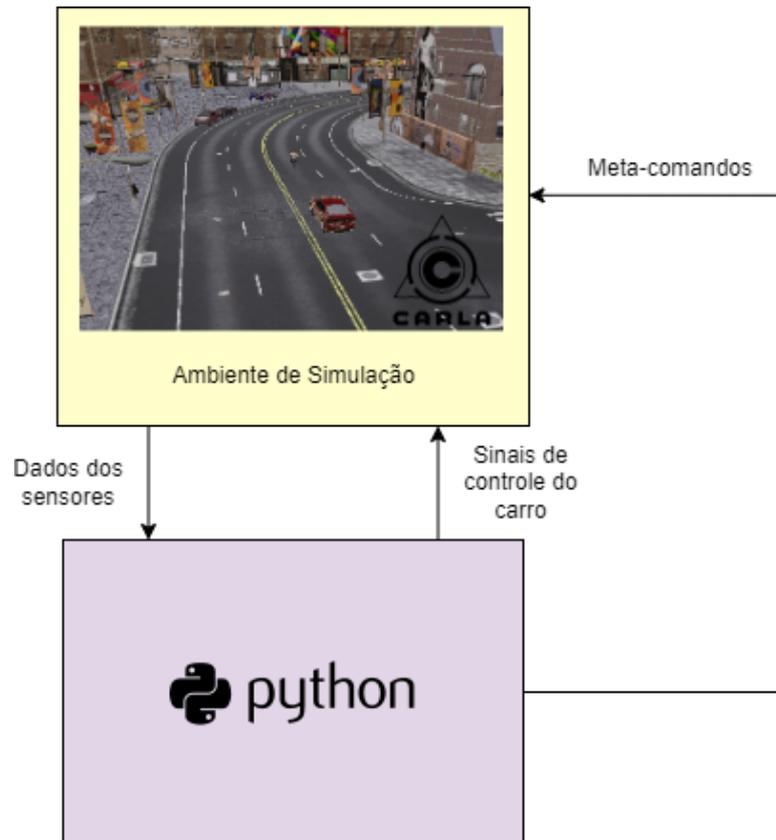


Figura 10 : Metodologia do simulador CARLA.

Fonte: O Autor.

#### 4.1.1 Ambiente

O ambiente é composto por modelos 3D de objetos estáticos como prédios, vegetação, sinais de trânsito e infraestrutura, bem como objetos dinâmicos como veículos e pedestres. Todos os modelos são projetados para reconciliar qualidade visual e velocidade de renderização. A Figura 11 exibe o ambiente de simulação do CARLA em uma cidade.



Figura 11 : Ambiente de simulação CARLA.

Fonte: O Autor.

#### 4.1.2 Sensores

O CARLA permite configuração flexível do conjunto de sensores do agente. Os sensores são limitados a câmeras RGB e pseudo-sensores que fornecem profundidade e segmentação semântica verdadeiras. O número de câmeras e seus tipos e posições podem ser especificados. Os parâmetros da câmera incluem localização 3D, orientação 3D em relação ao sistema de coordenadas do carro, campo de visão e profundidade de campo.

Além das leituras de sensores e pseudo-sensores, o simulador fornece uma variedade de medições associadas ao estado do agente e ao cumprimento das regras de trânsito. As medições do estado do agente incluem localização e orientação do veículo com relação ao sistema de coordenadas do mundo, velocidade, vetor de aceleração e impacto acumulado de colisões. As medições relativas às regras de trânsito incluem a porcentagem da pegada do veículo que avança em vias ou calçadas erradas, bem como estados dos semáforos e o limite de velocidade no local atual do veículo.

Por fim, o CARLA fornece acesso aos locais exatos e quadros delimitadores de todos os objetos dinâmicos no ambiente. Esses sinais desempenham um papel importante

no treinamento e avaliação de políticas de direção.

#### 4.1.3 Planejamento de caminho

O simulador CARLA possui recursos avançados de planejamento de rota por GPS [94], que é capaz de traçar o caminho mais curto entre dois pontos em um ambiente urbano simulado, respeitando regras de trânsito como sentidos de vias e preferenciais.

Essa funcionalidade é crucial para testar e validar sistemas de direção autônoma. O planejador de caminhos do CARLA recebe um destino desejado pelo usuário ou sistema e traça de forma eficiente um trajeto para chegar ao local [97–99].

## 5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A abordagem dos resultados é fundamentada no ambiente de simulação CARLA, conforme discutido no Capítulo 4. O veículo emulado é o carro elétrico Tesla Model 3 [100], ilustrado na Figura 12.

As características do veículo, os ganhos dos controladores e outros parâmetros relevantes para a simulação estão detalhados na Tabela 4.



Figura 12 : Tesla Model 3 no CARLA.

Fonte: O Autor.

Tabela 4 : Parâmetros e ganhos gerais.

Parâmetro	Valor
$L$	2,875 m
$V_{\max}$	200 km/h
$\mu$ Sem chuva	0,77
$\mu$ Com chuva	0,55
$g$	9,98 m/s <sup>2</sup>
$K_{d\phi}$	0,3
$K_{dV}$	3

Para esta aplicação, foram geradas rotas de referência para o veículo autônomo, utilizando o sistema de GPS integrado ao simulador. As rotas foram cuidadosamente sele-

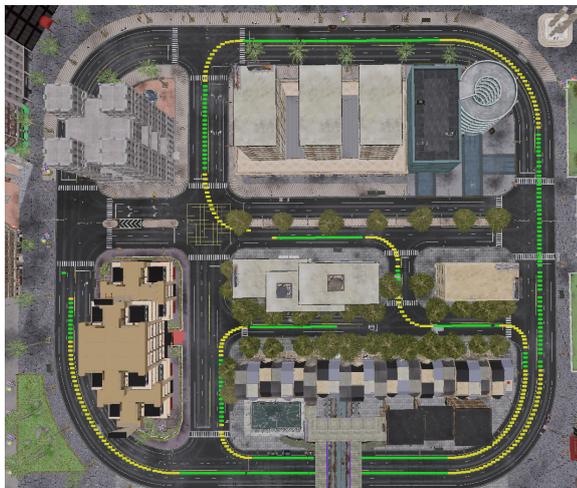
cionadas para incluir uma variedade de curvas, interseções e outras características típicas de ambientes urbanos. O objetivo foi avaliar a eficácia do algoritmo de controle de seguimento de trajetória em uma ampla gama de cenários. A Figura 13 mostra três trajetórias geradas pelo sistema, onde aplicando-se o conceito de velocidade crítica, as rotas em verde representam os trechos de maior velocidade e as em amarelo, os trechos de velocidade reduzida. Observa-se que as curvas apresentam velocidades menores para garantir maior segurança e estabilidade durante a condução autônoma, sendo que o carro é controlado para manter-se dentro desses limites mesmo em situações adversas. A Figura 14 ilustra as rotas no plano cartesiano  $(x, y)$ . As velocidades de referência em pontos específicos de cada rota em diferentes tipos de clima são indicadas na Tabela 5 e na Tabela 6.



(a) Rota 1.



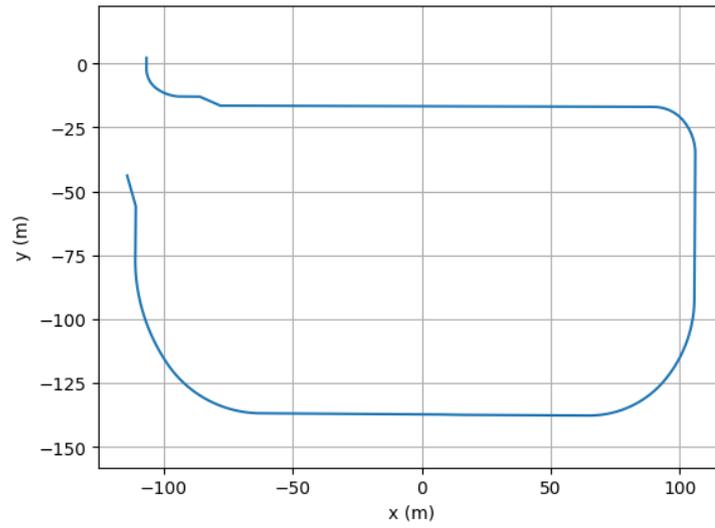
(b) Rota 2.



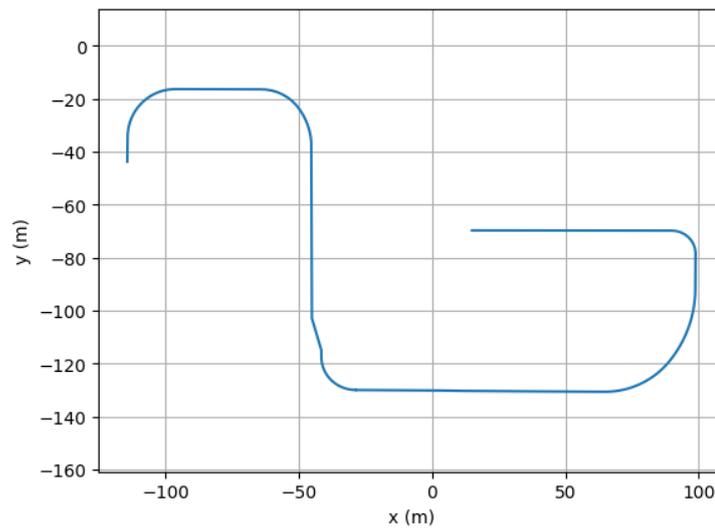
(c) Rotas 3.

Figura 13 : Rotas de referência.

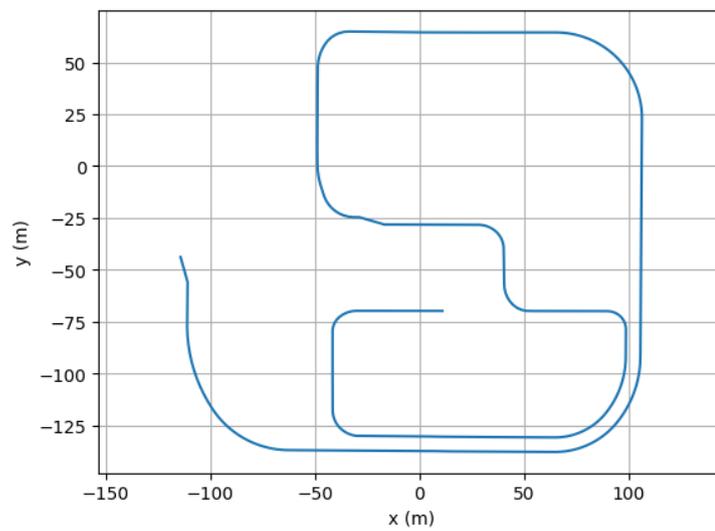
Fonte: O Autor.



(a) Rota 1.



(b) Rota 2.



(c) Rota 3.

Figura 14 : Rotas de referência representadas no plano cartesiano  $(x, y)$ .

Fonte: O Autor.

Tabela 5 : Velocidades de referência para o ambiente sem chuva.

Rota 1			Rota 2			Rota 3		
x (m)	y (m)	Vref (km/h)	x (m)	y (m)	Vref (km/h)	x (m)	y (m)	Vref (km/h)
-114,23	-43,82	200,00	14,98	-69,77	200,00	-114,23	-43,82	200,00
-110,89	-82,00	85,43	37,14	-69,80	200,00	-102,36	-111,29	85,43
-101,36	-113,08	85,43	60,05	-69,83	200,00	-49,75	-136,91	200,00
-76,80	-134,35	63,13	85,98	-69,86	200,00	7,79	-137,30	200,00
-45,75	-136,93	200,00	98,80	-82,89	200,00	69,56	-137,42	61,53
-14,56	-137,12	200,00	97,17	-103,37	65,75	105,73	-92,89	86,56
15,80	-137,44	200,00	85,53	-122,85	55,58	106,15	-32,19	200,00
45,35	-137,61	200,00	66,94	-130,65	56,98	106,33	26,83	64,01
77,70	-135,49	61,53	43,32	-130,59	200,00	63,81	64,42	8,00
101,10	-112,94	70,86	17,40	-130,45	200,00	3,43	64,43	200,00
105,81	-80,94	200,00	-6,15	-130,17	200,00	-48,37	50,39	46,74
106,03	-49,27	200,00	-30,30	-129,93	41,80	-47,90	-6,62	62,68
97,82	-19,16	38,51	-41,48	-114,95	66,78	11,27	-28,22	200,00
69,07	-16,88	200,00	-45,07	-82,64	200,00	41,23	-61,04	37,45
37,44	-16,79	200,00	-45,14	-58,64	200,00	97,18	-73,49	29,16
6,44	-16,70	200,00	-45,26	-36,43	54,77	85,53	-122,85	55,58
-25,56	-16,61	200,00	-60,11	-16,94	41,79	29,32	-130,52	200,00
-56,69	-16,53	200,00	-84,04	-16,45	200,00	-28,52	-130,04	38,48
-88,64	-12,94	200,00	-107,00	-20,04	41,97	-41,58	-80,63	57,49
-106,72	2,25	0,00	-114,23	-43,82	0,00	10,98	-69,76	200,00

Tabela 6 : Velocidades de referência para o ambiente com chuva.

Rota 1			Rota 2			Rota 3		
x (m)	y (m)	Vref (km/h)	x (m)	y (m)	Vref (km/h)	x (m)	y (m)	Vref (km/h)
-114,23	-43,82	200,00	14,98	-69,77	200,00	-114,23	-43,82	200,00
-110,89	-82,00	72,20	37,14	-69,80	200,00	-102,36	-111,29	72,20
-101,36	-113,08	72,20	60,05	-69,83	200,00	-49,75	-136,91	200,00
-76,80	-134,35	53,36	85,98	-69,86	200,00	7,79	-137,30	200,00
-45,75	-136,93	200,00	98,80	-82,89	200,00	69,56	-137,42	52,00
-14,56	-137,12	200,00	97,17	-103,37	55,57	105,73	-92,89	73,16
15,80	-137,44	200,00	85,53	-122,85	46,97	106,15	-32,19	200,00
45,35	-137,61	200,00	66,94	-130,65	48,16	106,33	26,83	54,10
77,70	-135,49	52,00	43,32	-130,59	200,00	63,81	64,42	6,76
101,10	-112,94	59,89	17,40	-130,45	200,00	3,43	64,43	174,42
105,81	-80,94	200,00	-6,15	-130,17	200,00	-48,37	50,39	39,50
106,03	-49,27	200,00	-30,30	-129,93	35,32	-47,90	-6,62	52,97
97,82	-19,16	32,55	-41,48	-114,95	56,44	11,27	-28,22	200,00
69,07	-16,88	200,00	-45,07	-82,64	200,00	41,23	-61,04	31,65
37,44	-16,79	200,00	-45,14	-58,64	200,00	97,18	-73,49	24,65
6,44	-16,70	200,00	-45,26	-36,43	46,29	85,53	-122,85	46,97
-25,56	-16,61	200,00	-60,11	-16,94	35,31	29,32	-130,52	200,00
-56,69	-16,53	200,00	-84,04	-16,45	200,00	-28,52	-130,04	32,52
-88,64	-12,94	200,00	-107,00	-20,04	35,47	-41,58	-80,63	48,59
-106,72	2,25	0,00	-114,23	-43,82	0,00	10,98	-69,76	200,00

Os resultados são apresentados em duas etapas principais. Inicialmente, será avaliado o desempenho do sistema de controle em alta velocidade em ambientes desprovidos de outros veículos. Essas simulações abrangem situações tanto sem quanto com chuva, visando verificar a robustez do controlador em diferentes condições climáticas. Em seguida, são conduzidos novos testes introduzindo outros veículos nas cenas. Dessa maneira, é possível investigar a eficiência do sistema tanto em situações ideais quanto em cenários mais desafiadores, que exigem adaptação às circunstâncias específicas.

Em mais detalhes, o [link](#)<sup>1</sup> apresenta o vídeo da execução do controlador para as diferentes rotas, condições climáticas e tráfego.

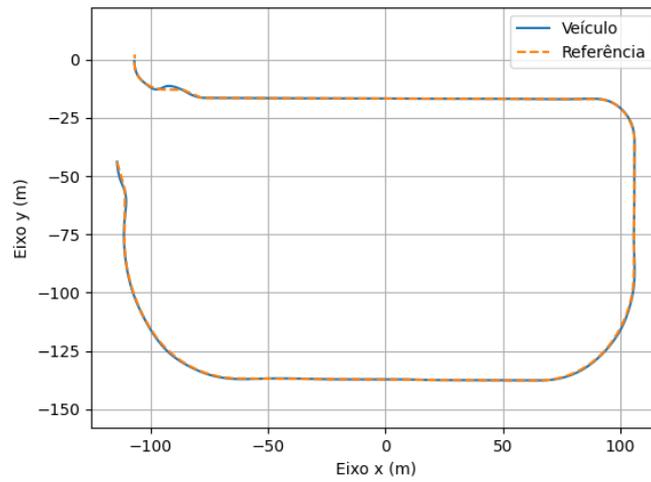
<sup>1</sup><https://www.youtube.com/watch?v=te0w5yKwuRs>

## 5.1 Ambientes Livres de Tráfego

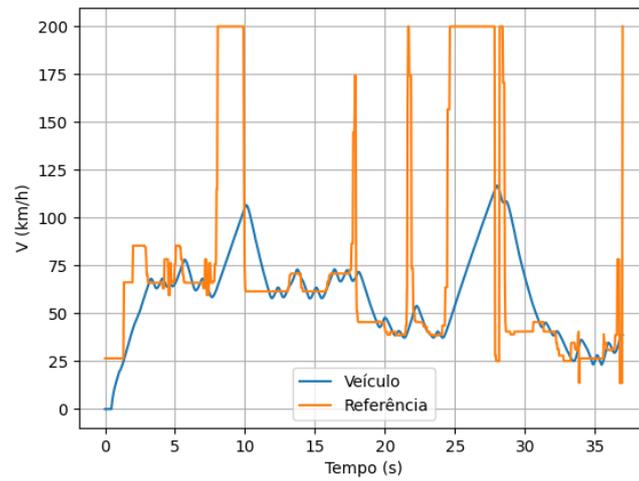
Aqui são apresentados os resultados obtidos em um ambiente isento de tráfego, com a finalidade de investigar o desempenho otimizado do controlador em relação à sua velocidade máxima.

### 5.1.1 Sem chuva

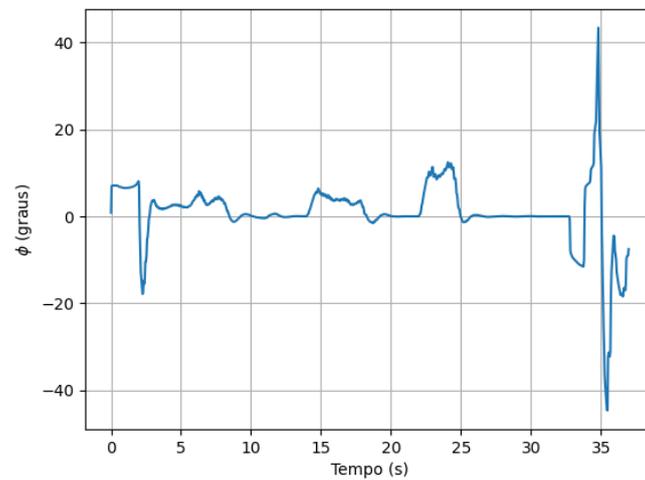
A Figura 15 apresenta o resultado para o ambiente sem chuva e livre de tráfego na rota 1. Pode-se notar pela Figura 15(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 15(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 15(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

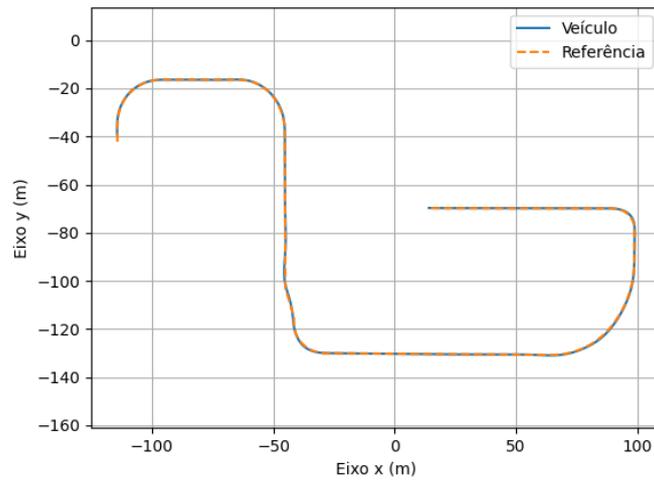


(c) Ângulo de esterçamento.

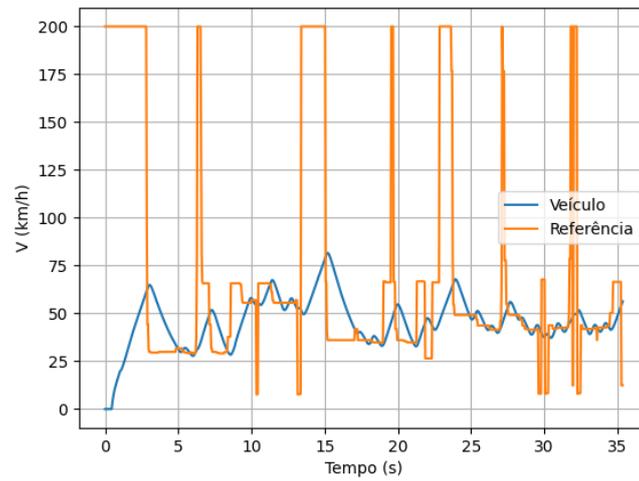
Figura 15 : Resultado para rota 1 sem chuva e sem tráfego.

Fonte: O Autor.

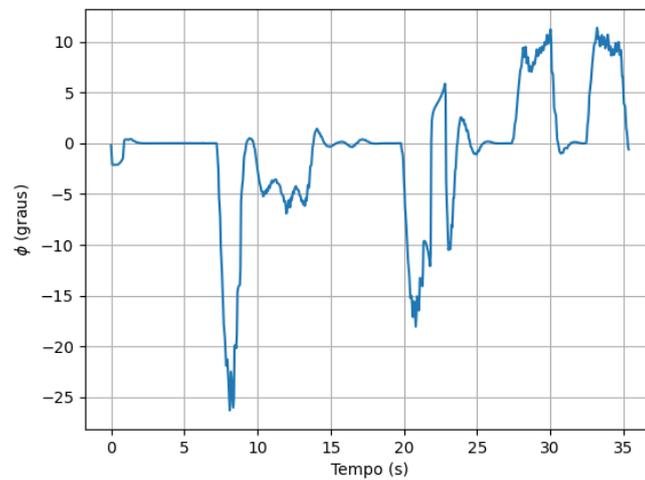
A Figura 16 apresenta o resultado para o ambiente sem chuva e livre de tráfego na rota 2. Pode-se notar pela Figura 16(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 16(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 16(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

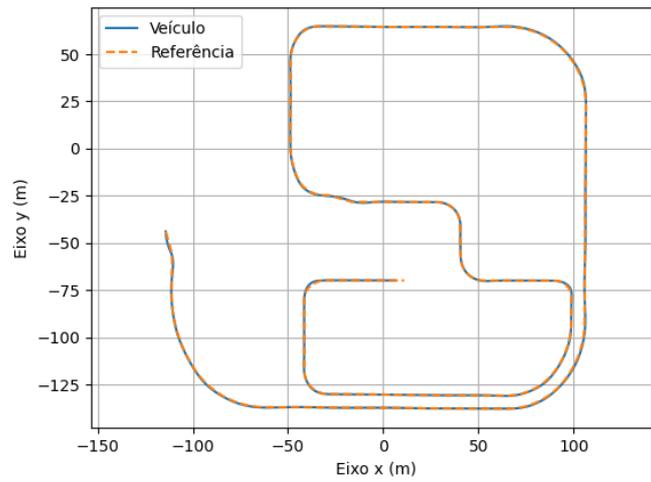


(c) Ângulo de esterçamento.

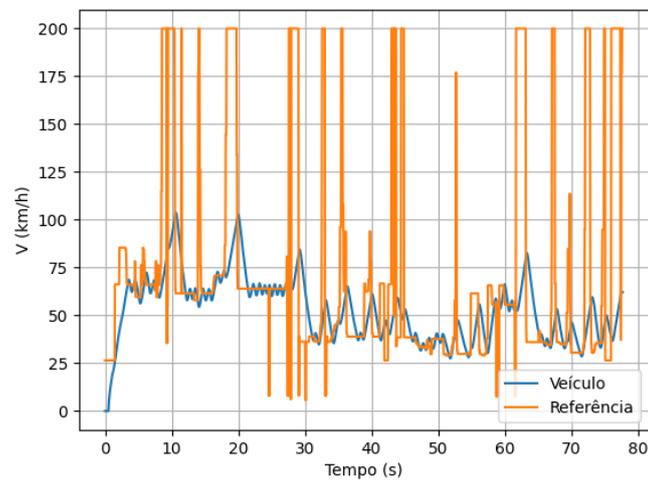
Figura 16 : Resultado para Rota 2 sem chuva e sem tráfego.

Fonte: O Autor.

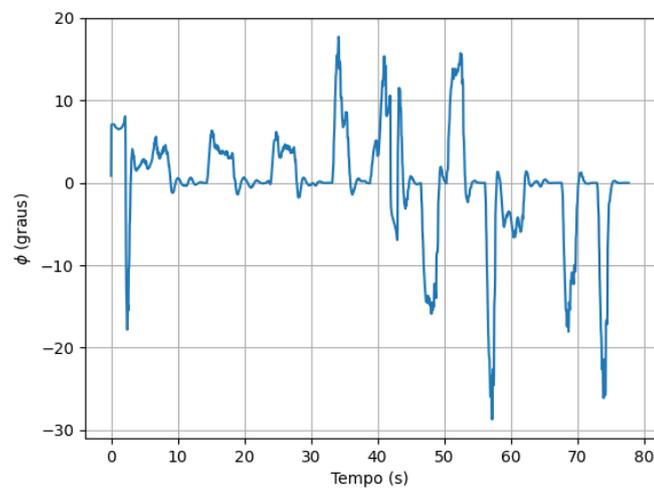
A Figura 17 apresenta o resultado para o ambiente sem chuva e livre de tráfego na rota 3. Pode-se notar pela Figura 17(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 17(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 17(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.



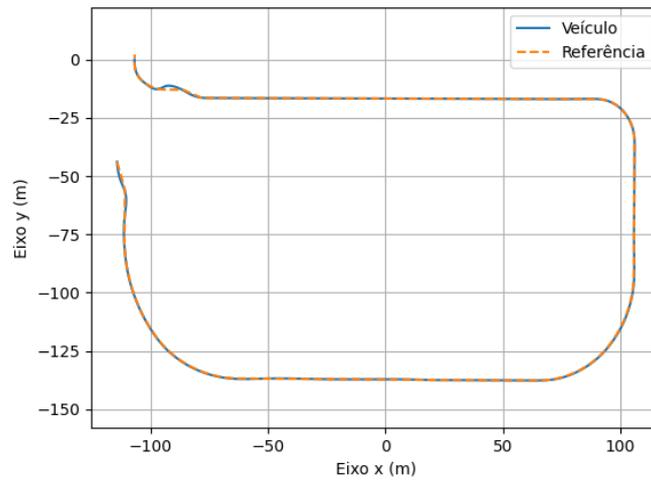
(c) Ângulo de esterçamento.

Figura 17 : Resultado para Rota 3 sem chuva e sem tráfego.

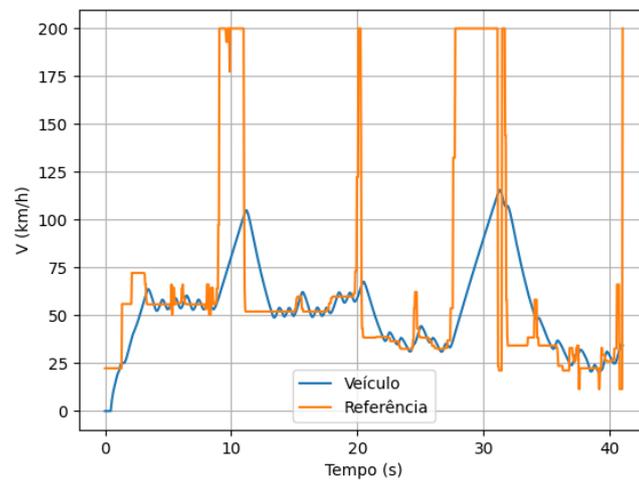
Fonte: O Autor.

### 5.1.2 Com chuva

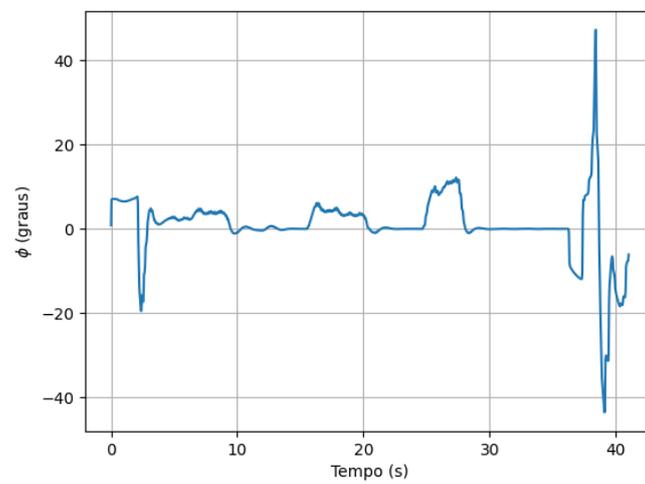
A Figura 18 apresenta o resultado para o ambiente com chuva e livre de tráfego na rota 1. Pode-se notar pela Figura 18(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 18(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 18(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

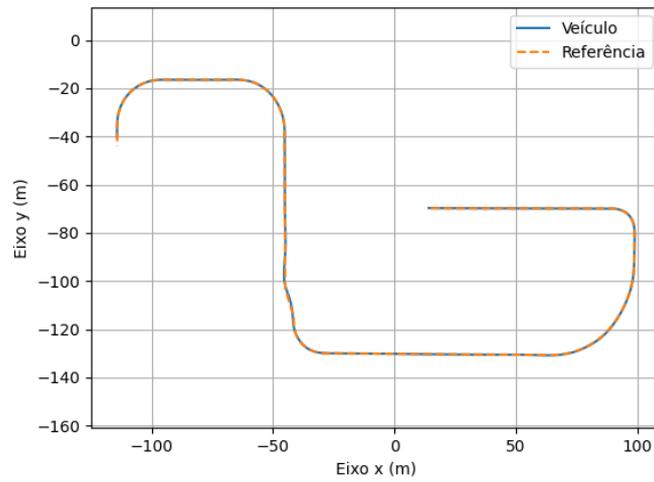


(c) Ângulo de esterçamento.

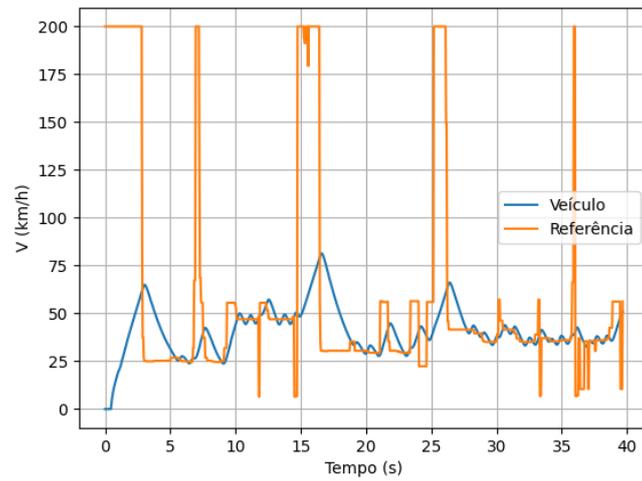
Figura 18 : Resultado para Rota 1 com chuva e sem tráfego.

Fonte: O Autor.

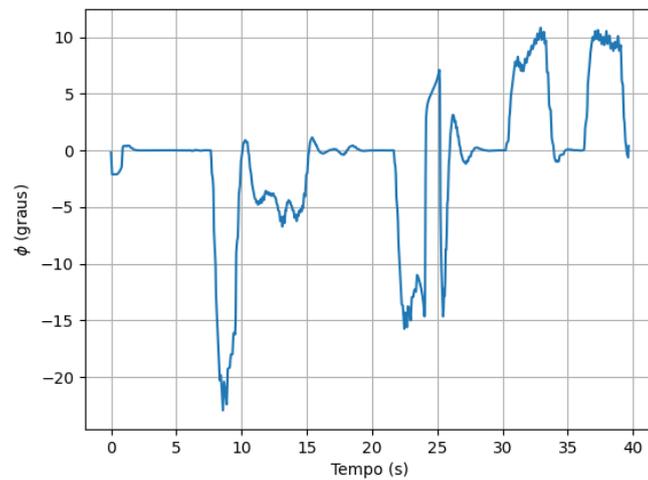
A Figura 19 apresenta o resultado para o ambiente com chuva e livre de tráfego na rota 2. Pode-se notar pela Figura 19(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 19(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 19(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

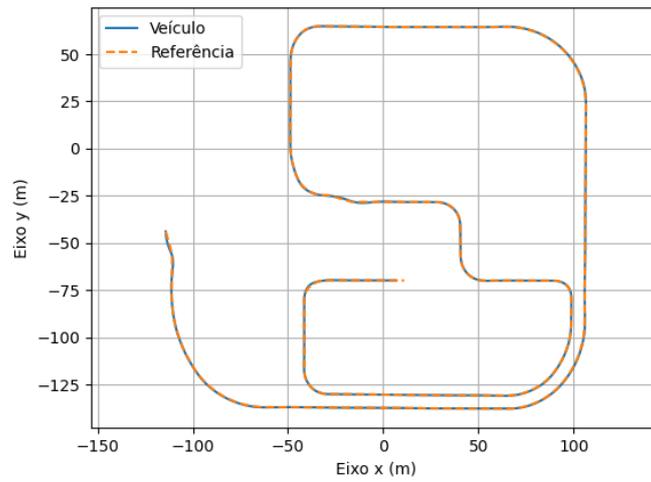


(c) Ângulo de esterçamento.

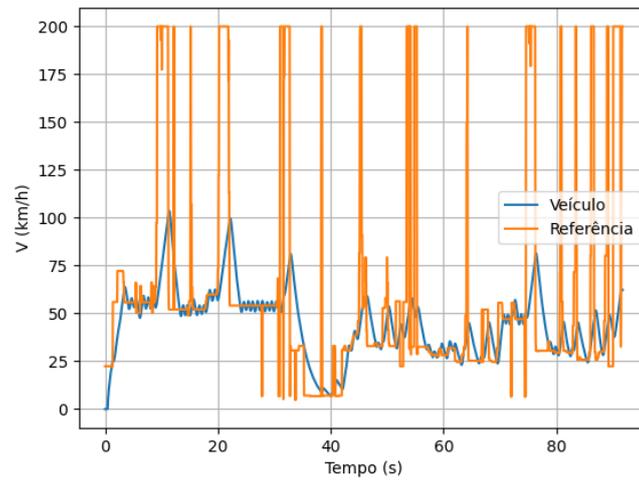
Figura 19 : Resultado para Rota 2 com chuva e sem tráfego.

Fonte: O Autor.

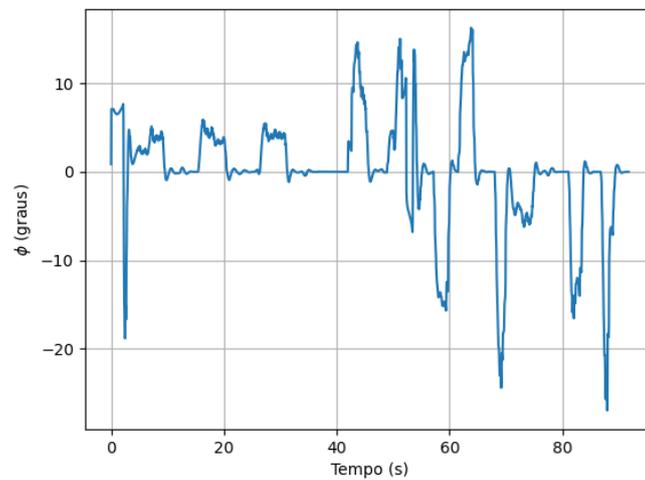
A Figura 20 apresenta o resultado para o ambiente com chuva e livre de tráfego na rota 3. Pode-se notar pela Figura 20(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 20(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 20(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.



(c) Ângulo de esterçamento.

Figura 20 : Resultado para Rota 3 com chuva e sem tráfego.

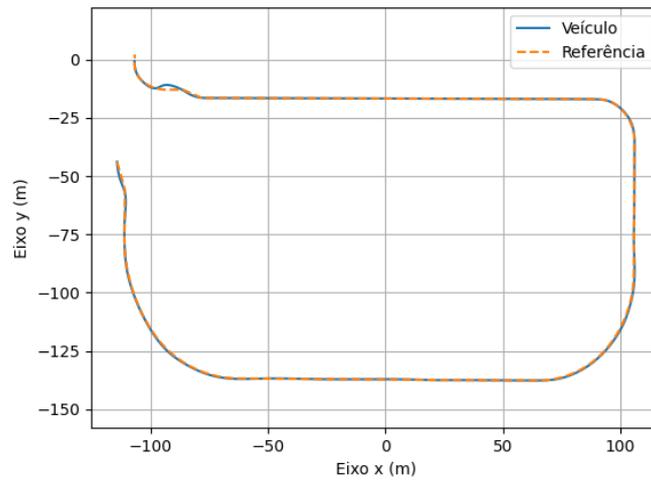
Fonte: O Autor.

## 5.2 Ambientes com Tráfego

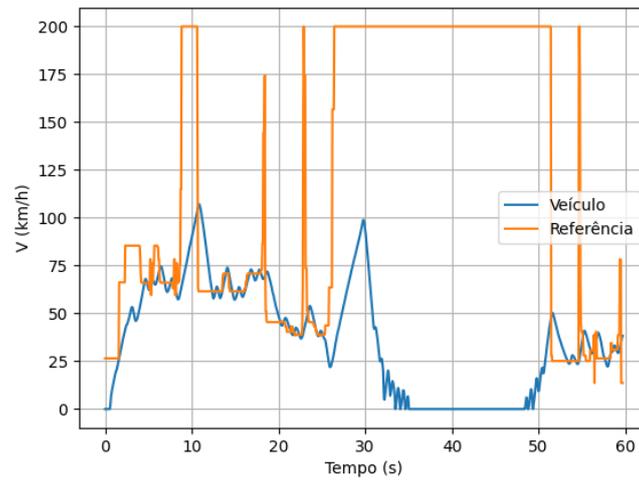
Nesta seção, enfatizam-se os resultados alcançados em um ambiente com presença de tráfego, com o propósito de investigar a eficácia do controlador em evitar colisões com outros veículos.

### 5.2.1 Sem chuva

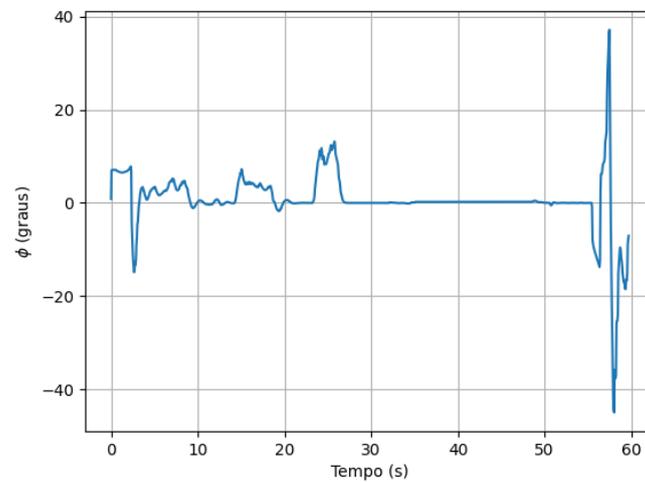
A Figura 21 apresenta o resultado para o ambiente sem chuva e com tráfego na rota 1. Pode-se notar pela Figura 21(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 21(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 21(c) o seu ângulo de esterçamento. Observa-se que o veículo mantém sua velocidade nula temporariamente devido à presença de outro veículo na rota.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

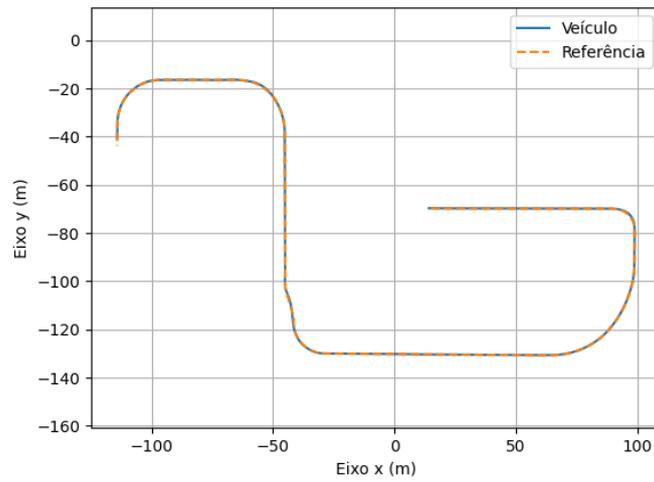


(c) Ângulo de esterçamento.

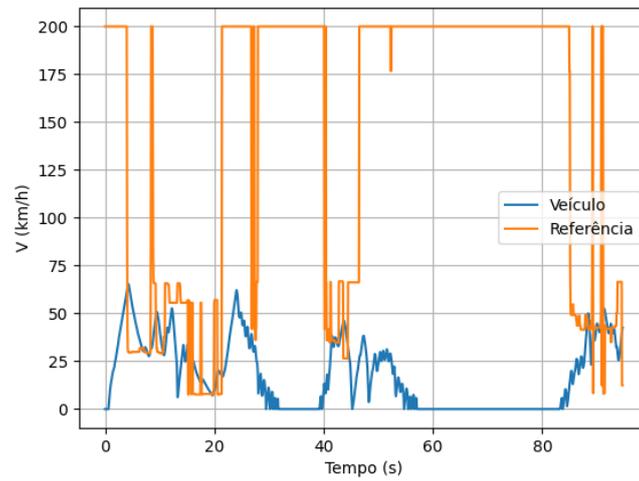
Figura 21 : Resultado para Rota 1 sem chuva e com tráfego.

Fonte: O Autor.

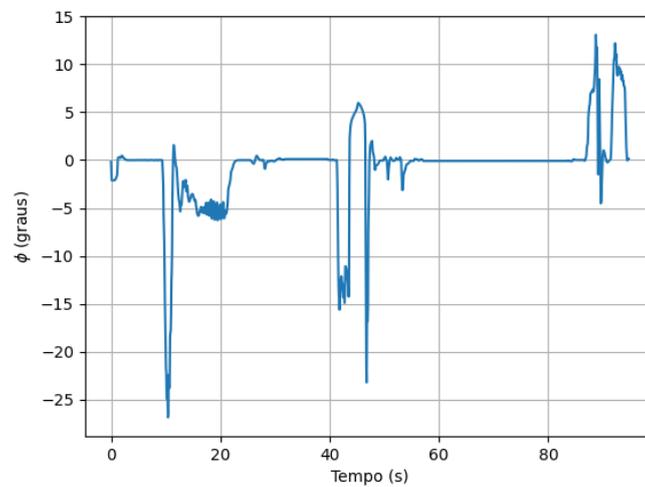
A Figura 22 apresenta o resultado para o ambiente sem chuva e com tráfego na rota 2. Pode-se notar pela Figura 22(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 22(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 22(c) o seu ângulo de esterçamento. Observa-se que o veículo mantém sua velocidade nula temporariamente devido à presença de outro veículo na rota.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

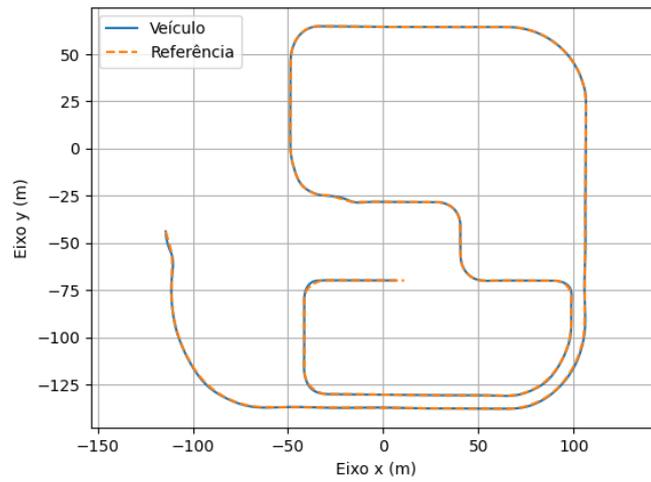


(c) Ângulo de esterçamento.

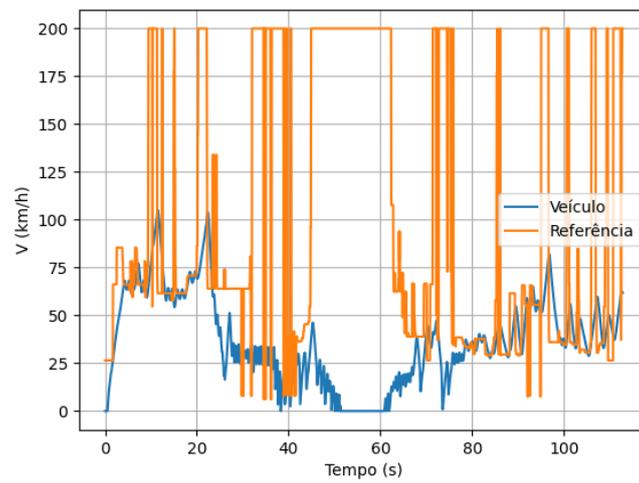
Figura 22 : Resultado para Rota 2 sem chuva e com tráfego.

Fonte: O Autor.

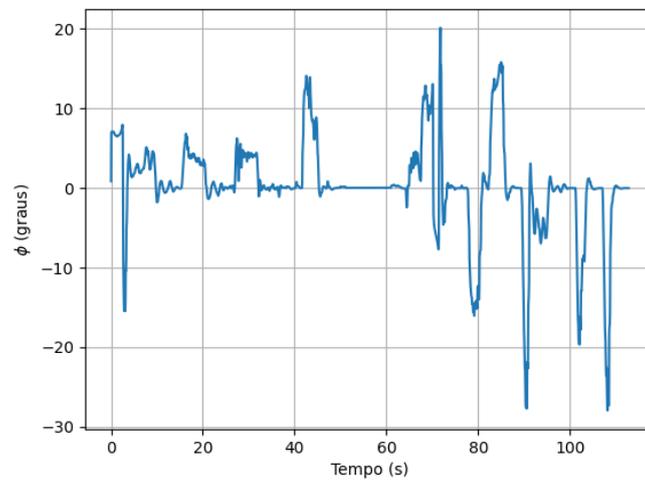
A Figura 23 apresenta o resultado para o ambiente sem chuva e com tráfego na rota 3. Pode-se notar pela Figura 23(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 23(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 23(c) o seu ângulo de esterçamento. Observa-se que o veículo mantém sua velocidade nula temporariamente devido à presença de outro veículo na rota.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.



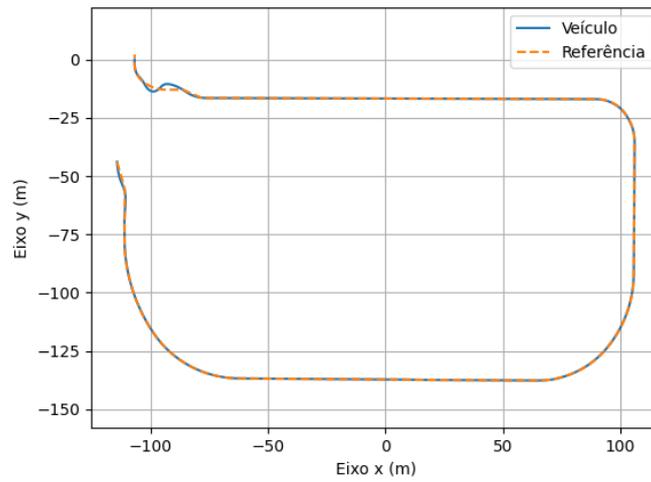
(c) Ângulo de esterçamento.

Figura 23 : Resultado para Rota 3 sem chuva e com tráfego.

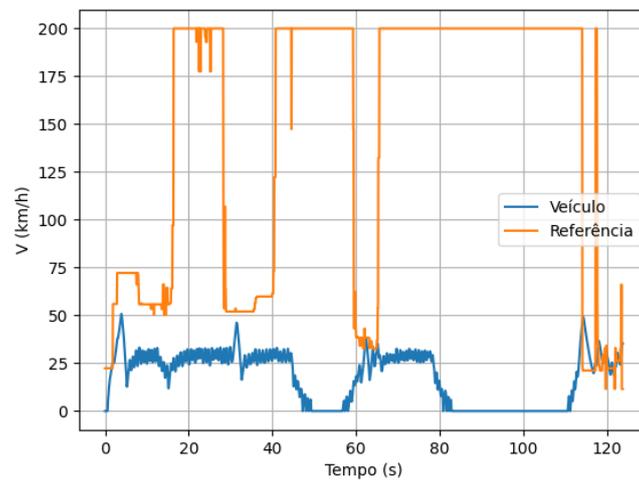
Fonte: O Autor.

### 5.2.2 Com chuva

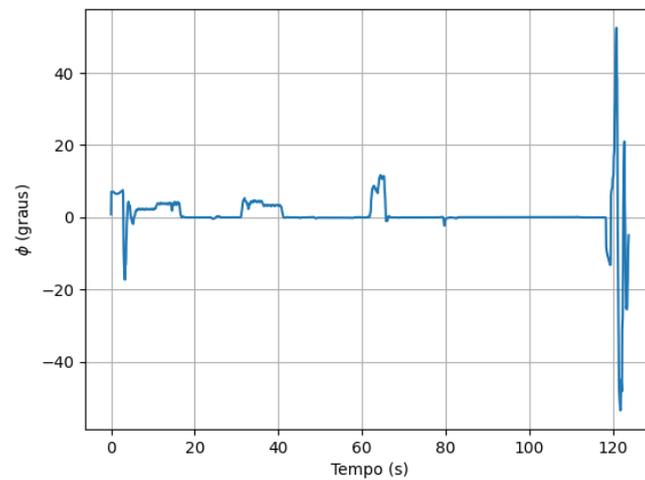
A Figura 24 apresenta o resultado para o ambiente com chuva e com tráfego na rota 1. Pode-se notar pela Figura 24(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 24(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 24(c) o seu ângulo de esterçamento. Observa-se que o veículo mantém sua velocidade nula temporariamente devido à presença de outro veículo na rota.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

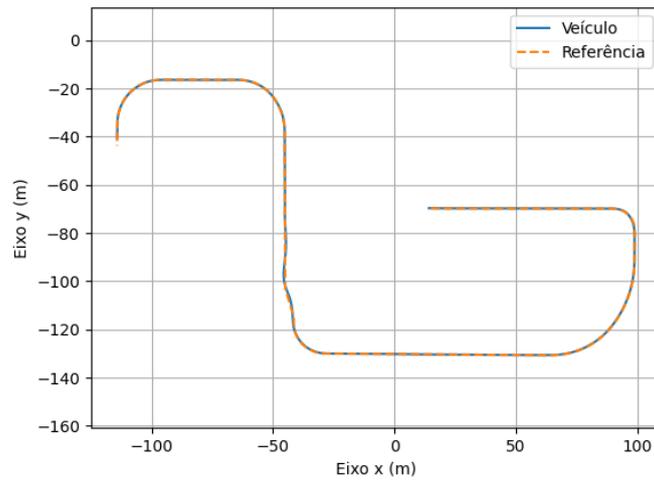


(c) Ângulo de esterçamento.

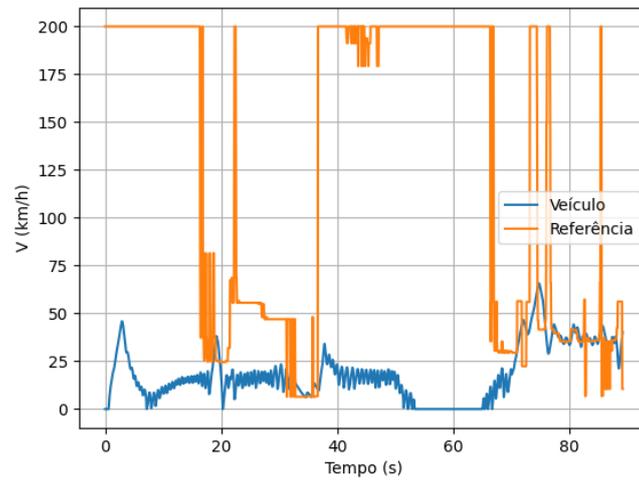
Figura 24 : Resultado para Rota 1 com chuva e com tráfego.

Fonte: O Autor.

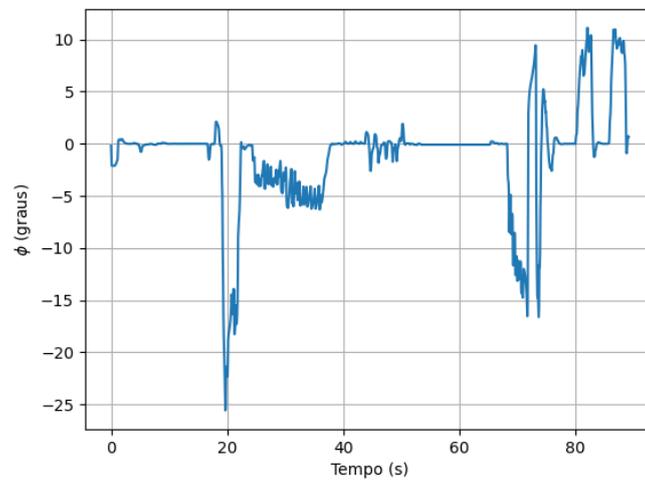
A Figura 25 apresenta o resultado para o ambiente com chuva e com tráfego na rota 2. Pode-se notar pela Figura 25(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 25(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 25(c) o seu ângulo de esterçamento. Observa-se que o veículo mantém sua velocidade nula temporariamente devido à presença de outro veículo na rota.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

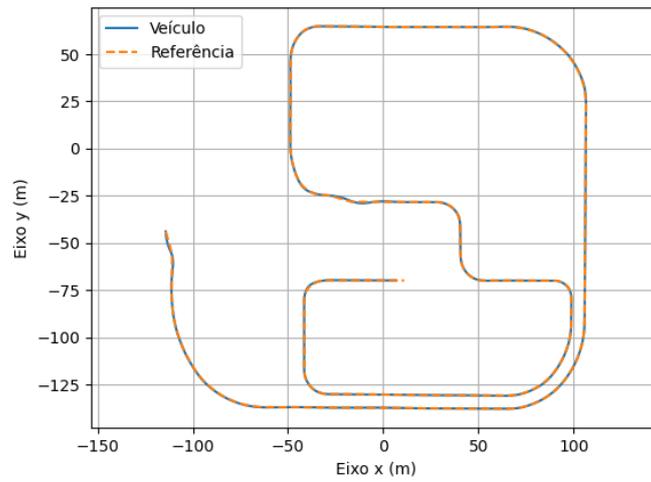


(c) Ângulo de esterçamento.

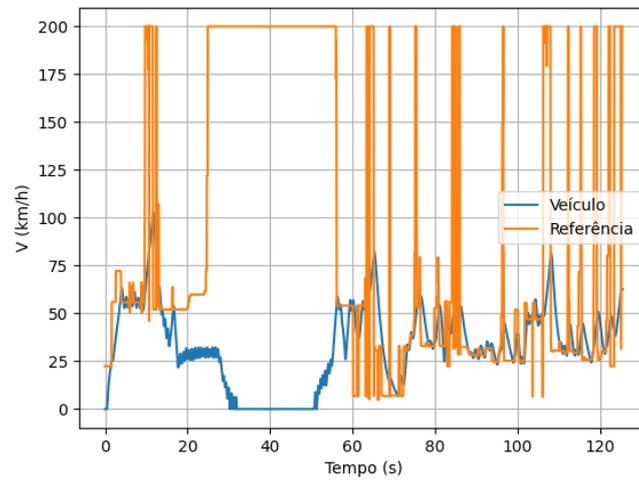
Figura 25 : Resultado para Rota 2 com chuva e com tráfego.

Fonte: O Autor.

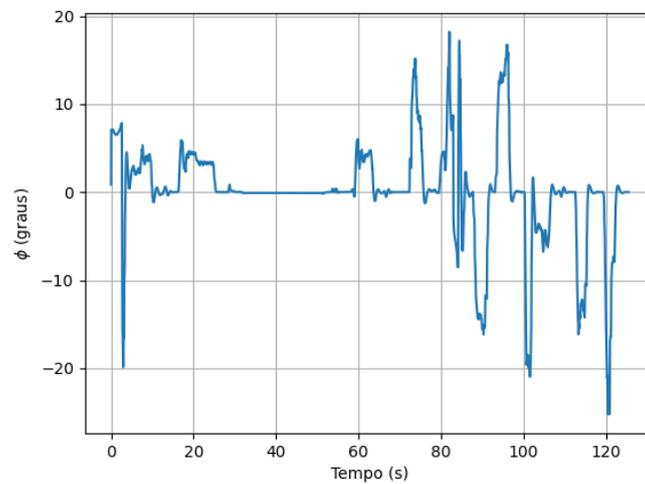
A Figura 26 apresenta o resultado para o ambiente com chuva e com tráfego na rota 3. Pode-se notar pela Figura 26(a) que o controlador tem sucesso ao seguir o caminho de referência, a Figura 26(b) apresenta a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 26(c) o seu ângulo de esterçamento. Observa-se que o veículo mantém sua velocidade nula temporariamente devido à presença de outro veículo na rota.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.



(c) Ângulo de esterçamento.

Figura 26 : Resultado para Rota 3 com chuva e com tráfego.

Fonte: O Autor.

A Tabela 7 expressa os resultados quantitativos.

Tabela 7 : Resultados.

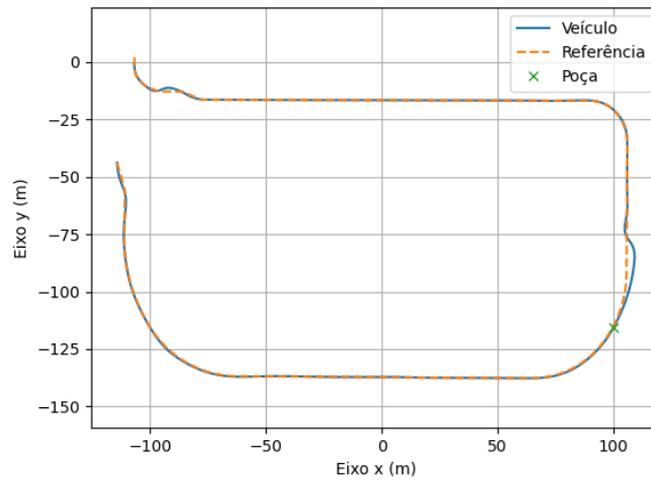
Rota	Clima	Tráfego	Velocidade Máxima (km/h)	Velocidade Média (km/h)	Tempo (s)
1	Sem chuva	Sem tráfego	116,810	58,895	36,989
2	Sem chuva	Sem tráfego	81,646	45,977	35,362
3	Sem chuva	Sem tráfego	103,739	53,017	77,746
1	Com chuva	Sem tráfego	115,608	53,124	41,009
2	Com chuva	Sem tráfego	81,458	40,982	39,669
3	Com chuva	Sem tráfego	103,585	44,840	91,765
1	Sem chuva	Com tráfego	107,120	36,474	59,714
2	Sem chuva	Com tráfego	65,380	17,196	94,708
3	Sem chuva	Com tráfego	105,185	36,527	112,798
1	Com chuva	Com tráfego	50,824	17,650	123,707
2	Com chuva	Com tráfego	65,712	18,243	89,128
3	Com chuva	Com tráfego	102,711	32,765	125,543

### 5.3 Resposta a perturbações

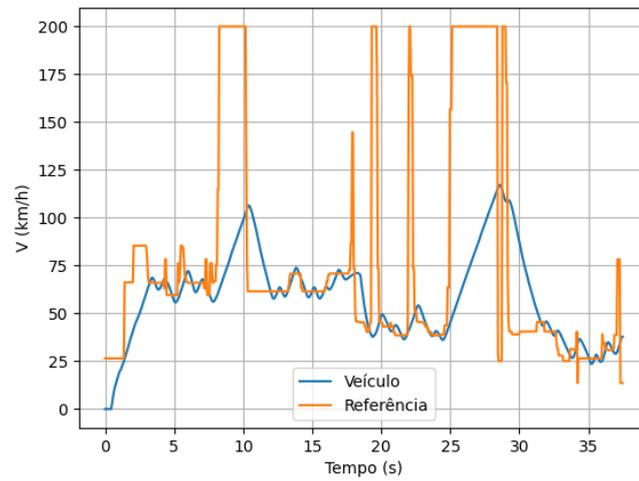
Com o propósito de avaliar o desempenho do controlador, uma perturbação é introduzida no trajeto. Esta perturbação simula a presença de uma poça d'água ou óleo na rodovia, resultando em derrapagem. O resultado pode ser visto na Figura 27, onde a Figura 27(a) ilustra o caminho efetuado pelo carro, assim como o local que simula a poça, a Figura 27(b) mostra a velocidade do veículo diante da sua referência e a Figura 27(c) seu ângulo de esterçamento.

Como observado, após passar pelo local, o veículo entra em derrapagem e sai da trajetória de referência, porém logo em seguida se realinha. Mais detalhes estão no vídeo do [link](https://www.youtube.com/watch?v=Aap8O6CzOac)<sup>2</sup>.

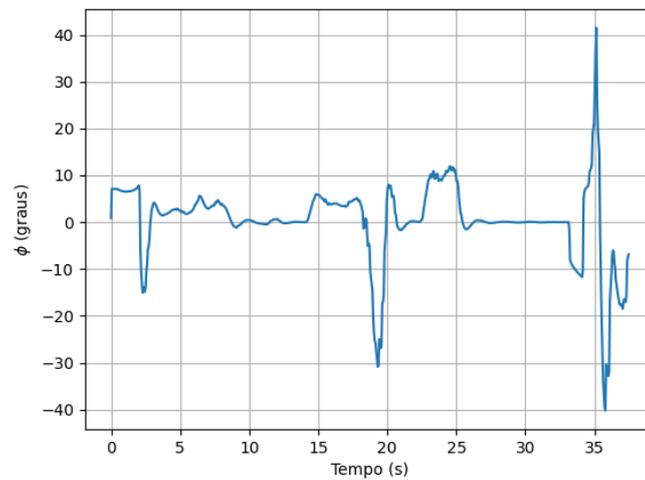
<sup>2</sup><https://www.youtube.com/watch?v=Aap8O6CzOac>



(a) Caminho.



(b) Velocidade.



(c) Ângulo de esterçamento.

Figura 27 : Resultado para Rota 1 com perturbação no caminho.

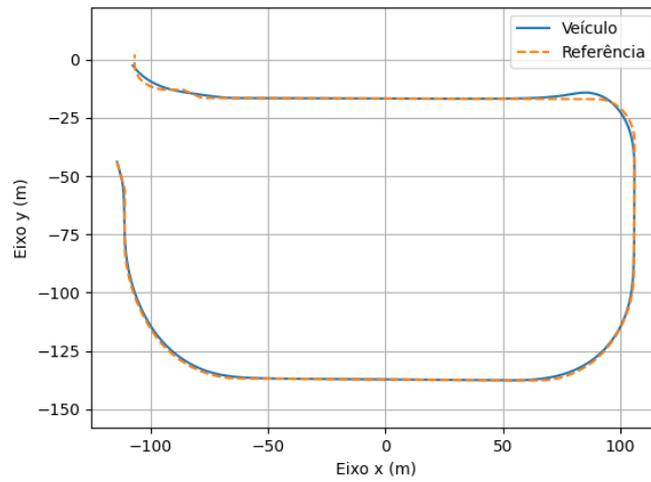
Fonte: O Autor.

#### 5.4 Comparação dos resultados

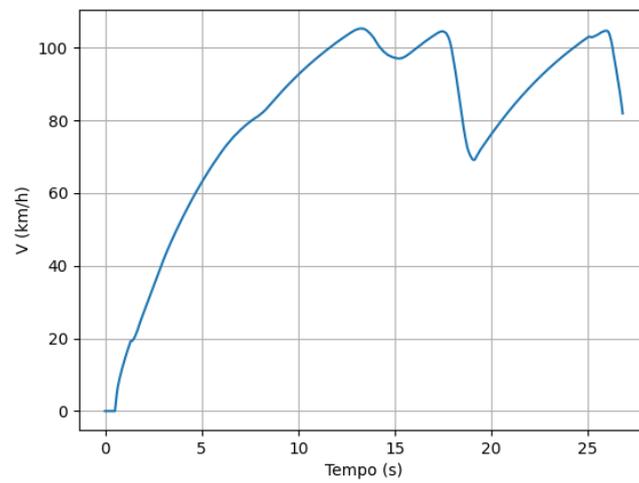
Nesta seção, os resultados obtidos nesta Dissertação são comparados com o algoritmo de piloto automático próprio do simulador CARLA [101]. O algoritmo direciona o veículo ao longo de uma rota predeterminada, utilizando controladores Proporcional Integral Derivativo (PID). O controle de direção é baseado no cálculo do ângulo entre a direção atual do veículo e o ponto alvo na rota, enquanto o controle de velocidade é realizado comparando a velocidade atual do veículo com uma velocidade de referência. Isso permite minimizar os desvios laterais em relação à rota e manter a velocidade desejada. Além disso, o algoritmo assegura simultaneamente o cumprimento das regras de trânsito e o respeito aos outros veículos [97–99, 101].

As comparações numéricas podem ser vistas na Tabela 8, no qual MP se refere aos resultados do Método Próprio desenvolvido neste trabalho e PID aos resultados do algoritmo nativo do simulador.

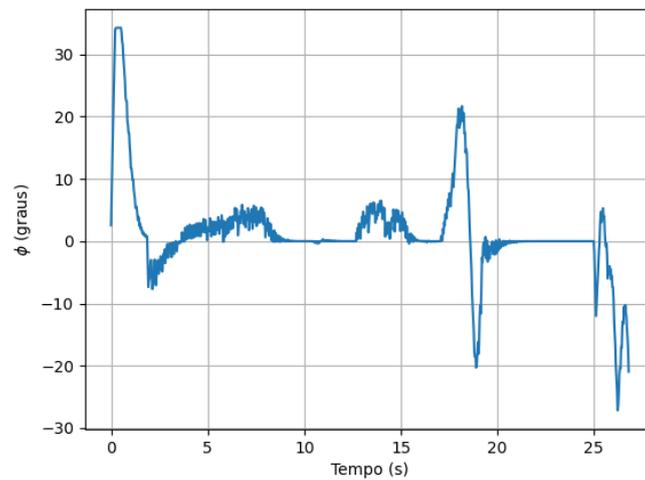
A Figura 28 apresenta o resultado para o ambiente sem chuva e livre de tráfego na rota 1. Pode-se notar pela Figura 28(a) que o controlador segue o caminho de referência, a Figura 28(b) apresenta a velocidade do veículo e a Figura 28(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

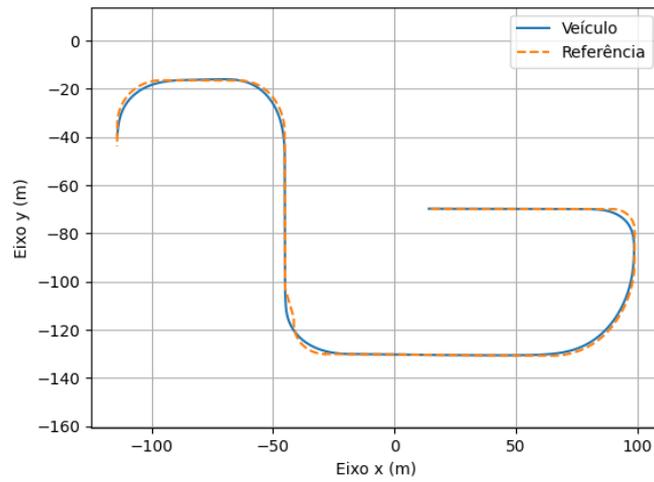


(c) Ângulo de esterçamento.

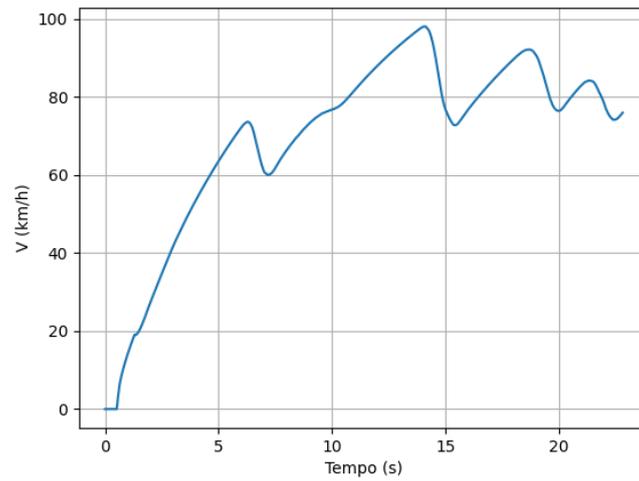
Figura 28 : Resultado para Rota 1 sem chuva e sem tráfego com o controlador PID.

Fonte: O Autor.

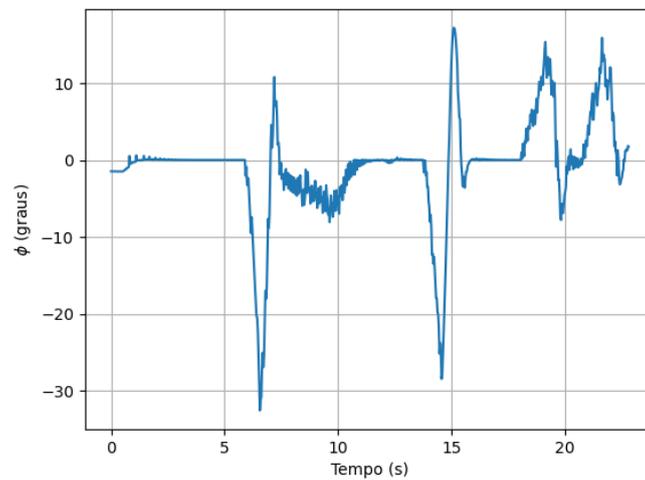
A Figura 29 apresenta o resultado para o ambiente sem chuva e livre de tráfego na rota 2. Pode-se notar pela Figura 29(a) que o controlador segue o caminho de referência, a Figura 29(b) apresenta a velocidade do veículo e a Figura 29(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

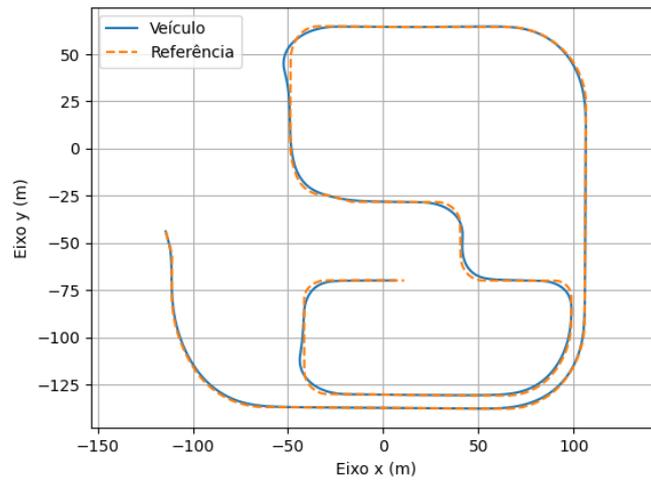


(c) Ângulo de esterçamento.

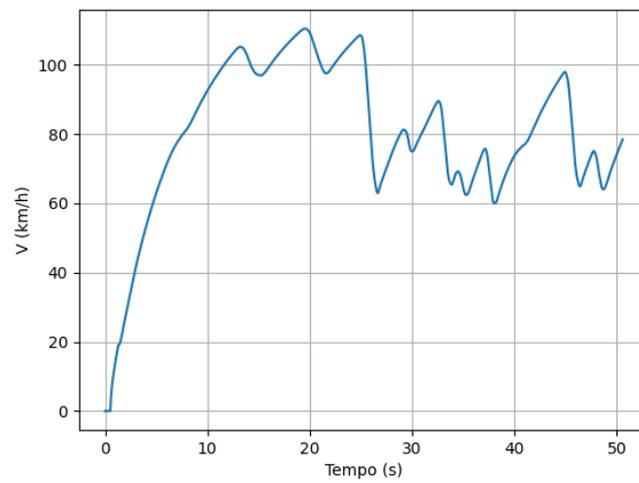
Figura 29 : Resultado para Rota 2 sem chuva e sem tráfego com o controlador PID.

Fonte: O Autor.

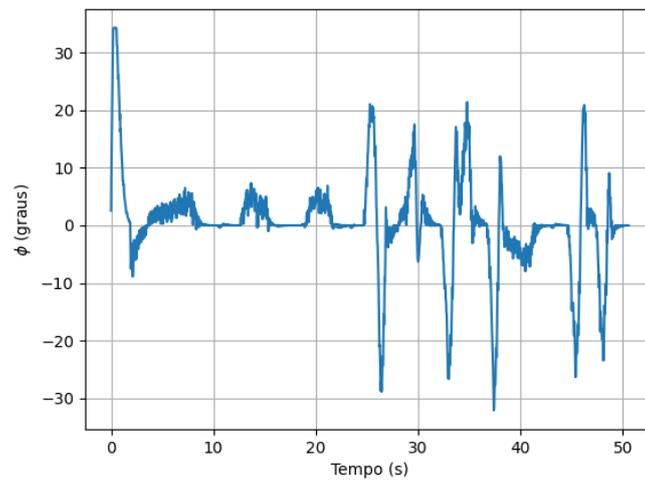
A Figura 30 apresenta o resultado para o ambiente sem chuva e livre de tráfego na rota 3. Pode-se notar pela Figura 30(a) que o controlador segue o caminho de referência, a Figura 30(b) apresenta a velocidade do veículo e a Figura 30(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

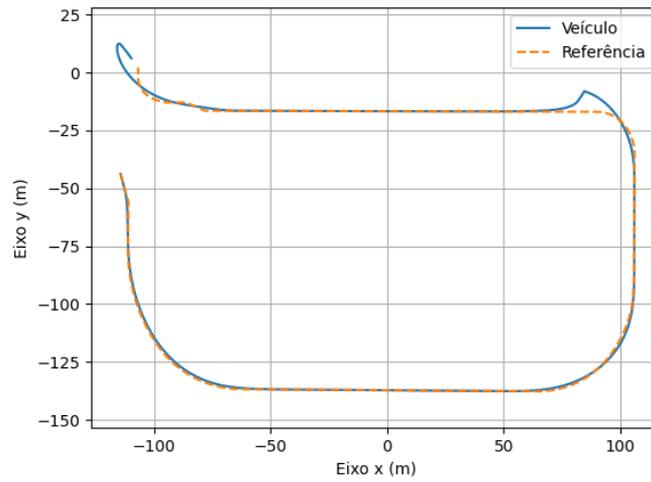


(c) Ângulo de esterçamento.

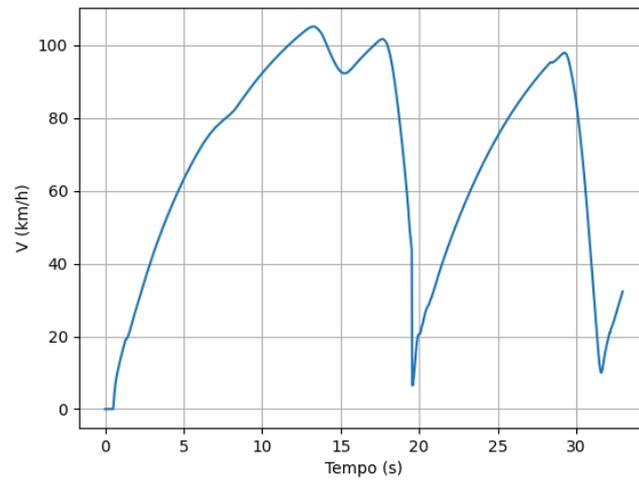
Figura 30 : Resultado para Rota 3 sem chuva e sem tráfego com o controlador PID.

Fonte: O Autor.

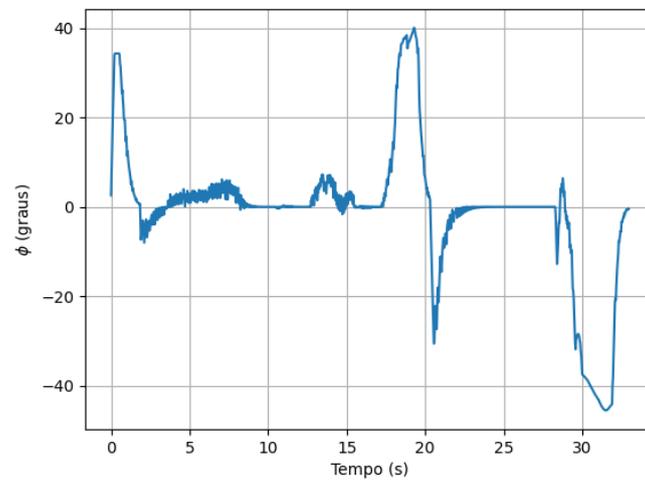
A Figura 31 apresenta o resultado para o ambiente com chuva e livre de tráfego na rota 1. Pode-se notar pela Figura 31(a) que o controlador segue o caminho de referência, a Figura 31(b) apresenta a velocidade do veículo e a Figura 31(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

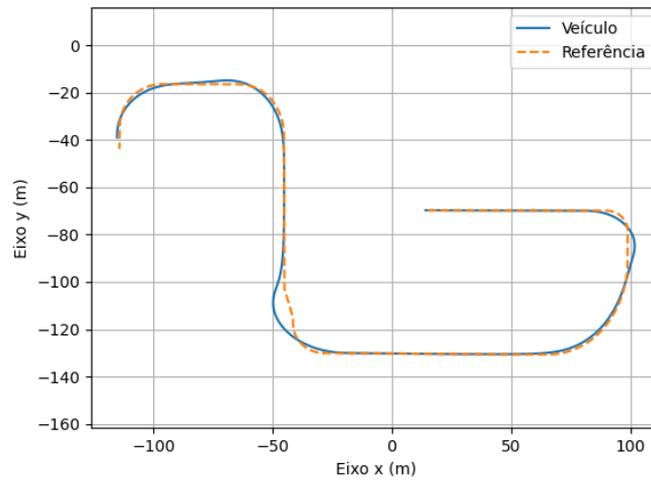


(c) Ângulo de esterçamento.

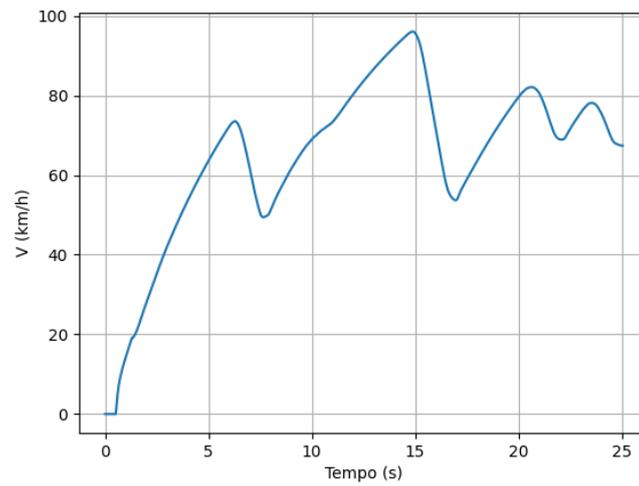
Figura 31 : Resultado para Rota 1 com chuva e sem tráfego com o controlador PID.

Fonte: O Autor.

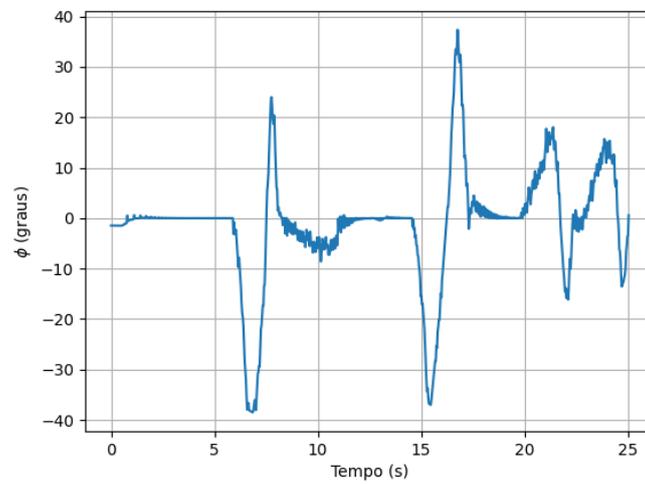
A Figura 32 apresenta o resultado para o ambiente com chuva e livre de tráfego na rota 2. Pode-se notar pela Figura 32(a) que o controlador segue o caminho de referência, a Figura 32(b) apresenta a velocidade do veículo e a Figura 32(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.

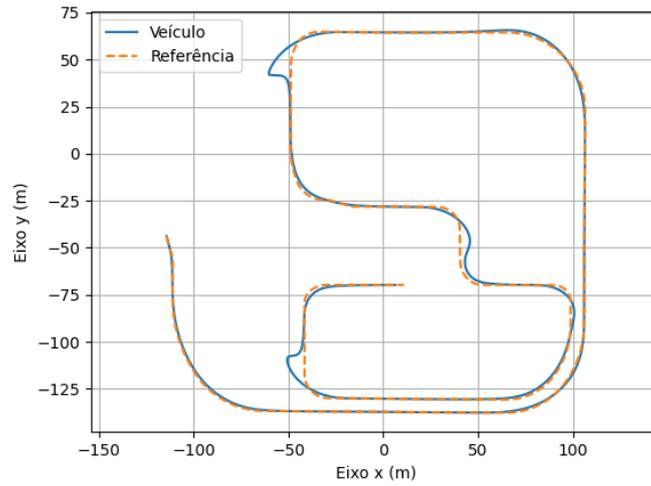


(c) Ângulo de esterçamento.

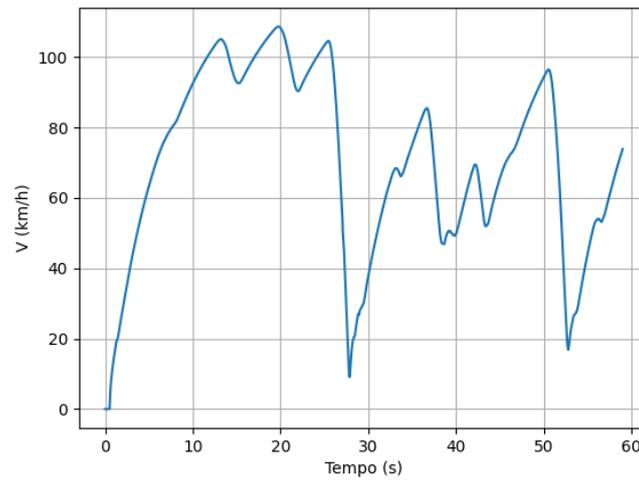
Figura 32 : Resultado para Rota 2 com chuva e sem tráfego com o controlador PID.

Fonte: O Autor.

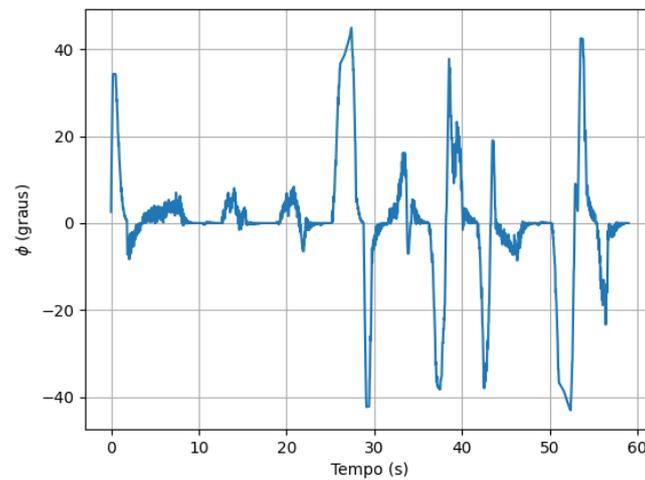
A Figura 33 apresenta o resultado para o ambiente com chuva e livre de tráfego na rota 3. Pode-se notar pela Figura 33(a) que o controlador segue o caminho de referência, a Figura 33(b) apresenta a velocidade do veículo e a Figura 33(c) o seu ângulo de esterçamento.



(a) Caminho.



(b) Velocidade.



(c) Ângulo de esterçamento.

Figura 33 : Resultado para Rota 3 com chuva e sem tráfego com o controlador PID.

Fonte: O Autor.

Como observado nas figuras, pode-se notar que o controlador PID efetua as rotas com sucesso, em mais detalhes a Tabela 8 demonstra um comportamento mais agressivo, resultando em uma velocidade média maior e, conseqüentemente, em um tempo de execução substancialmente menor para cada rota. Entretanto, essa característica resulta em um erro lateral mais significativo entre a trajetória de referência e aquela efetuada pelo veículo, como evidenciado na Figura 29(a), por exemplo. Este erro é ampliado em ambientes com chuva, onde o veículo pode sair da pista, como ilustrado na Figura 33(a). Em virtude disso, apesar de sua capacidade de evitar colisões com outros veículos, o controlador PID não obteve sucesso em ambientes com tráfego, resultando em colisões. Por fim, em termos gerais, no que tange à adaptação a diferentes ambientes, o método proposto neste trabalho, demonstra um desempenho superior.

Tabela 8 : Resultados com o controlador PID.

Rota	Tráfego	Clima	Velocidade Máxima (km/h)		Velocidade Média (km/h)		Tempo (s)	
			MP	CARLA	MP	CARLA	MP	CARLA
1	Sem tráfego	Sem chuva	<b>116,810</b>	105,249	58,895	<b>80,237</b>	36,989	<b>26,806</b>
2	Sem tráfego	Sem chuva	81,646	<b>97,997</b>	45,977	<b>69,622</b>	35,362	<b>22,825</b>
3	Sem tráfego	Sem chuva	103,739	<b>110,526</b>	53,017	<b>80,115</b>	77,746	<b>50,566</b>
1	Sem tráfego	Com chuva	<b>115,608</b>	105,172	53,124	<b>69,083</b>	41,009	<b>32,955</b>
2	Sem tráfego	Com chuva	81,458	<b>96,068</b>	40,982	<b>64,699</b>	39,669	<b>25,036</b>
3	Sem tráfego	Com chuva	103,585	<b>108,698</b>	44,840	<b>70,397</b>	91,765	<b>59,002</b>
1	Com tráfego	Sem chuva	<b>107,120</b>	x	<b>36,474</b>	x	<b>59,714</b>	x
2	Com tráfego	Sem chuva	<b>65,380</b>	x	<b>17,196</b>	x	<b>94,708</b>	x
3	Com tráfego	Sem chuva	<b>105,185</b>	x	<b>36,527</b>	x	<b>112,798</b>	x
1	Com tráfego	Com chuva	<b>50,824</b>	x	<b>17,650</b>	x	<b>123,707</b>	x
2	Com tráfego	Com chuva	<b>65,712</b>	x	<b>18,243</b>	x	<b>89,128</b>	x
3	Com tráfego	Com chuva	<b>102,711</b>	x	<b>32,765</b>	x	<b>125,543</b>	x

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de direção autônoma que integra diversos tipos de controladores para veículos, com foco na otimização da velocidade em situações sem tráfego, ao mesmo tempo que se adapta para garantir a segurança em ambientes com tráfego. Os controladores integrados abrangem o controlador de perseguição pura para controle lateral, o controlador preditivo para evitar colisões com outros veículos e o controlador de duas posições para o controle de velocidade. Essa abordagem foi implementada e validada utilizando o simulador CARLA, permitindo testar o desempenho em uma variedade de ambientes urbanos, bem como em diferentes condições climáticas e de tráfego.

A modelagem do veículo é o modelo cinemático do tipo bicicleta e para o ambiente utiliza-se mapa geométrico. Os resultados demonstram que o sistema de controle desenvolvido é capaz de seguir trajetórias de referência geradas pelo planejador de caminhos do simulador de forma precisa. Em situações sem a presença de outros veículos, o controlador mantém velocidades próximas ao limite do veículo, chegando a alcançar quase 117 km/h. Já na presença de tráfego, observa-se a eficiência da estratégia de controle em ajustar dinamicamente a velocidade de referência para zero, desacelerando ou mesmo parando o veículo quando necessário para evitar colisões. Isto valida a capacidade do sistema em priorizar a segurança nesses casos.

Os controladores integrados são o controlador de perseguição pura o controle lateral, a controlador preditivo para a prevenção de colisão com outros veículos e o controlador de duas posições para o controle de velocidade.

Adicionalmente, o controlador mostrou-se robusto tanto em condições de pista seca quanto em meio à chuva. Apesar da diminuição da velocidade devido à menor aderência, o veículo conseguiu navegar de maneira segura e estável em ambas as situações. Isso também se aplica a casos em que o veículo derrapa devido à presença de algum agente escorregadio na rodovia.

O simulador CARLA utilizado para as simulações em ambiente 3D é notavelmente abrangente, proporcionando uma aproximação da realidade. Com diferentes condições climáticas e de fricção sendo cuidadosamente simuladas, os resultados comprovam a eficácia da abordagem híbrida proposta e validam a viabilidade do algoritmo. Ademais,

essa abordagem foi comparada com outro algoritmo nativo do simulador CARLA, que utiliza controladores PID, evidenciando seu destaque na capacidade de se adaptar a uma variedade de ambientes, minimizando a probabilidade de perda de controle em curvas e de colisões com outros veículos. Isso permite que sejam estabelecidas bases sólidas para estudos mais amplos, principalmente no desenvolvimento de sistemas de controle de carros autônomos em alta velocidade.

Apesar dos resultados positivos, é importante considerar a dificuldade de transferir a experiência simulada para o mundo real, alertando para a potencial periculosidade do sistema de controle de frenagem absoluta em altas velocidades, especialmente em superfícies escorregadias.

Portanto, conclui-se que os objetivos foram alcançados, com o desenvolvimento de um modo de direção autônomo capaz de otimizar a velocidade quando possível, mas também adaptar-se às circunstâncias do tráfego e clima para garantir uma condução segura.

## 6.1 Trabalhos futuros

Este trabalho integra um contexto maior de uma linha de pesquisa em desenvolvimento focada em robótica móvel que abrange, entre outros objetivos.

- Considerar o modelo dinâmico do carro
- Ampliar a aplicação para uma variedade mais ampla e desafiadora de cenários, por exemplo:
  - sinais de trânsito;
  - faixas de pedestre;
  - regras de de tráfego e
  - presença de obstáculos, buracos e pessoas.
- Realizar manobras seguras e eficazes para navegar por espaços estreitos ou ultrapassar outros veículos
- Desenvolveremos estratégias para lidar com situações de emergência, como a presença de veículos de socorro e ambulâncias

## 6.2 Publicações

O trabalho descrito neste documento é baseado nas seguintes publicações próprias relacionadas ao tema:

- **Estacionamento Paralelo Autônomo de Veículos Leves de Passeio**, Congresso Brasileiro de Automática 2020 (DOI: <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1340>).
- **Trajectory Planning For Car-like Robots Through Curve Parametrization And Genetic Algorithm Optimization With Applications To Autonomous Parking**, IEEE Latin America Transactions, 2021 (DOI: [10.1109/TLA.2022.9661471](https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9661471)).
- **An Autonomous Parallel Parking Algorithm for Car-like Mobile Robots**, Journal of Control, Automation and Electrical Systems - Springer, 2022 (DOI: [10.1007/s40313-022-00924-z](https://doi.org/10.1007/s40313-022-00924-z)).
- **Path Planning for Automobile Urban Parking Through Curve Parametrization and Genetic Algorithm Optimization**, 2022 26th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) (DOI: [10.1109/MMAR55195.2022.9874289](https://doi.org/10.1109/MMAR55195.2022.9874289)).
- **Estacionamento Autônomo Urbano de Automóveis Através de Caminhos Otimizados por Algoritmos Genéticos**, Sociedade Brasileira de Automática (SBA), 2022 (DOI: <https://doi.org/10.20906/CBA2022/3245>).
- **Sym-to-real Emulation and Low-cost Prototyping for Undergraduate Introductory Robotics**, IEEE Latin America Transactions, 2023 (DOI: <https://doi.org/10.1109/LARS/SBR/WRE59448.2023.10332919>).

## REFERÊNCIAS

- [1] HUSSAIN, R.; ZEADALLY, S. Autonomous cars: Research results, issues, and future challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 21, n. 2, p. 1275–1313, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/comst.2018.2869360>>.
- [2] ZANCHIN, B. C. et al. On the instrumentation and classification of autonomous cars. In: *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/SMC.2017.8123022>>.
- [3] WEISS, M. C.; BERNARDES, R. C.; CONSONI, F. L. Cidades inteligentes como nova prática para o gerenciamento dos serviços e infraestruturas urbanos: a experiência da cidade de porto alegre. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 7, n. 3, p. 310–324, 2015.
- [4] LIM, H. S. M.; TAEIHAGH, A. Autonomous vehicles for smart and sustainable cities: An in-depth exploration of privacy and cybersecurity implications. *Energies*, MDPI, Open Access Journal, v. 11, n. 5, p. 1–23, 2018.
- [5] GUERRERO-IBANEZ, J. A.; ZEADALLY, S.; CONTRERAS-CASTILLO, J. Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things technologies. *IEEE Wireless Communications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 22, n. 6, p. 122–128, dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/mwc.2015.7368833>>.
- [6] HOLGUÍN-CARVAJAL, J. P. et al. Trends in traffic accidents mortality and social inequalities in ecuador from 2011 to 2020. MDPI AG, jan. 2024. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.20944/preprints202401.2091.v1>>.
- [7] HENRY, K. *Traffic fatalities up sharply in 2015*. [S.l.]: October, 2016.
- [8] LAFRANCE, A. *Your grandmother's driverless car*. Atlantic Media Company, Jun 2016. Disponível em: <<https://www.theatlantic.com/technology/archive/2016/06/beep-beep/489029/>>.

- [9] BIMBRAW, K. Autonomous cars: Past, present and future a review of the developments in the last century, the present scenario and the expected future of autonomous vehicle technology. In: IEEE. *2015 12th international conference on informatics in control, automation and robotics (ICINCO)*. [S.l.], 2015. v. 1, p. 191–198.
- [10] KANADE, T.; THORPE, C.; WHITTAKER, W. Autonomous land vehicle project at cmu. In: *Proceedings of the 1986 ACM fourteenth annual conference on Computer science*. [S.l.: s.n.], 1986. p. 71–80.
- [11] SCHMIDHUBER, J. *Robot car history*. Disponível em: <<http://people.idsia.ch/~juergen/robotcars.html>>.
- [12] PADMAJA, B. et al. Exploration of issues, challenges and latest developments in autonomous cars. *Journal of Big Data*, Springer Science and Business Media LLC, v. 10, n. 1, maio 2023. ISSN 2196-1115. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1186/s40537-023-00701-y>>.
- [13] GONZALEZ, D. et al. A review of motion planning techniques for automated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 17, n. 4, p. 1135–1145, abr. 2016.
- [14] PADEN, B. et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 1, n. 1, p. 33–55, mar. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tiv.2016.2578706>>.
- [15] ZIEGLER, J.; STILLER, C. Spatiotemporal state lattices for fast trajectory planning in dynamic on-road driving scenarios. In: *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/iro.2009.5354448>>.
- [16] CHU, K.; LEE, M.; SUNWOO, M. Local path planning for off-road autonomous driving with avoidance of static obstacles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 13, n. 4, p. 1599–1616, dez. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tits.2012.2198214>>.

- [17] MCNAUGHTON, M. et al. Motion planning for autonomous driving with a conformal spatiotemporal lattice. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/icra.2011.5980223>>.
- [18] WANG, S. *State Lattice-based Motion Planning for Autonomous On-Road Driving*. Freie Universität Berlin, 2015. Disponível em: <<https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/3043>>.
- [19] GU, T.; DOLAN, J. M.; LEE, J.-W. On-road trajectory planning for general autonomous driving with enhanced tunability. In: MENEGATTI, E. et al. (Ed.). *Intelligent Autonomous Systems 13*. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 247–261. ISBN 978-3-319-08338-4.
- [20] ZIEGLER, J. et al. Trajectory planning for bertha — a local, continuous method. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 450–457.
- [21] DICKMANN, J.; APPENRODT, N.; BRENNK, C. Making bertha. *IEEE Spectrum*, v. 51, n. 8, p. 44–49, 2014.
- [22] URMSON, C. et al. Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, v. 25, n. 8, p. 425–466, 2008.
- [23] ZIEGLER, J. et al. Trajectory planning for bertha—a local, continuous method. In: IEEE. *2014 IEEE intelligent vehicles symposium proceedings*. [S.l.], 2014. p. 450–457.
- [24] NILSSON, J. et al. Longitudinal and lateral control for automated yielding maneuvers. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 17, n. 5, p. 1404–1414, 2016.
- [25] LIM, W. et al. Hierarchical trajectory planning of an autonomous car based on the integration of a sampling and an optimization method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 19, n. 2, p. 613–626, fev. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tits.2017.2756099>>.
- [26] SNIDER, J. M. et al. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking. *Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RITR-09-08*, 2009.

- [27] COULTER, R. C. *Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm*. [S.l.], 1992.
- [28] CORKE, P. *Robotics, Vision and Control*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-642-20144-8>>.
- [29] WIT, J.; CRANE, C. D.; ARMSTRONG, D. Autonomous ground vehicle path tracking. *Journal of Robotic Systems*, Wiley, v. 21, n. 8, p. 439–449, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/rob.20031>>.
- [30] YANG, J. et al. An algorithm of curved path tracking with prediction model for autonomous vehicle. In: *2017 13th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS)*. IEEE, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/cis.2017.00094>>.
- [31] ANDERSEN, H. et al. Geometric path tracking algorithm for autonomous driving in pedestrian environment. In: *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. IEEE, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/aim.2016.7577010>>.
- [32] ĀRZĒN, K.-E.; JOHANSSON, M.; BABUŠKA, R. Fuzzy control versus conventional control. In: *International Series in Intelligent Technologies*. [S.l.]: Springer Netherlands, 1999. p. 59–81.
- [33] LI, T.-H.; CHANG, S.-J. Autonomous fuzzy parking control of a car-like mobile robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 33, n. 4, p. 451–465, jul. 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tsmca.2003.811766>>.
- [34] YILIN, C.; JIANHUA, W. Optimization and implementation of fuzzy logic controllers for precise path tracking in autonomous driving. *Journal of Sustainable Urban Futures*, v. 12, n. 12, p. 1–15, 2022.
- [35] KORKMAZ, B. et al. Fuzzy logic based self-driving racing car control system. In: *2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*. IEEE, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/CEIT.2018.8751900>>.

- [36] SANCHEZ, O.; OLLERO, A.; HEREDIA, G. Adaptive fuzzy control for automatic path tracking of outdoor mobile robots. application to romeo 3r. In: *Proceedings of 6th International Fuzzy Systems Conference*. IEEE, 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/fuzzy.1997.616433>>.
- [37] VANS, E.; VACHKOV, G.; SHARMA, A. Vision based autonomous path tracking of a mobile robot using fuzzy logic. In: *Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering*. IEEE, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/apwccse.2014.7053862>>.
- [38] KAYACAN, E.; RAMON, H.; SAEYS, W. Robust trajectory tracking error model-based predictive control for unmanned ground vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 21, n. 2, p. 806–814, abr. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tmech.2015.2492984>>.
- [39] GUO, H. et al. Dual-envelop-oriented moving horizon path tracking control for fully automated vehicles. *Mechatronics*, Elsevier BV, v. 50, p. 422–433, abr. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.02.001>>.
- [40] LI, S. et al. NMPC-based yaw stability control by active front wheel steering. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier BV, v. 51, n. 31, p. 583–588, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.141>>.
- [41] SERNA, C. G.; RUICHEK, Y. Dynamic speed adaptation for path tracking based on curvature information and speed limits. *Sensors*, MDPI AG, v. 17, n. 6, p. 1383, jun. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s17061383>>.
- [42] ORJUELA, R. et al. From a classic renauld twizy towards a low cost autonomous car prototype: a proof of concept. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier BV, v. 53, n. 2, p. 15161–15166, 2020. ISSN 2405-8963. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2083>>.
- [43] PANNU, G. S.; ANSARI, M. D.; GUPTA, P. Design and implementation of autonomous car using raspberry pi. *International Journal of Computer Applications*, Foundation of Computer Science, v. 113, n. 9, 2015.

- [44] EL-HASSAN, F. T. Experimenting with sensors of a low-cost prototype of an autonomous vehicle. *IEEE Sensors Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 20, n. 21, p. 13131–13138, nov. 2020. ISSN 2379-9153. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2020.3006086>>.
- [45] POZNA, C.; ANTONYA, C. Issues about autonomous cars. In: *2016 IEEE 11th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*. IEEE, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/SACI.2016.7507360>>.
- [46] SINGH, S.; SAINI, B. S. Autonomous cars: Recent developments, challenges, and possible solutions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, v. 1022, n. 1, p. 012028, jan. 2021. ISSN 1757-899X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1022/1/012028>>.
- [47] YAQOOB, I. et al. Autonomous driving cars in smart cities: Recent advances, requirements, and challenges. *IEEE Network*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 34, n. 1, p. 174–181, jan. 2020. ISSN 1558-156X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2019.1900120>>.
- [48] ZEADALLY, S. et al. Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, Springer Science and Business Media LLC, v. 50, n. 4, p. 217–241, dez. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11235-010-9400-5>>.
- [49] EICHLER, S. Performance evaluation of the ieee 802.11p wave communication standard. In: *2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 2199–2203.
- [50] PENG, H. et al. Performance analysis of ieee 802.11p dcf for multiplatooning communications with autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 66, n. 3, p. 2485–2498, 2017.
- [51] NDJIONGUE, A. R.; FERREIRA, H. C.; NGATCHED, T. M. N. *Visible Light Communications (VLC) Technology*. John Wiley & Sons, Inc., jun. 2015. 1–15 p. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/047134608x.w8267>>.

- [52] XIAO, L. et al. Hybrid conditional random field based camera-lidar fusion for road detection. *Information Sciences*, Elsevier BV, v. 432, p. 543–558, mar. 2018. ISSN 0020-0255. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2017.04.048>>.
- [53] CONTRERAS-CASTILLO, J.; ZEADALLY, S.; IBAÑEZ, J. A. G. Solving vehicular ad hoc network challenges with big data solutions. *IET Networks*, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 5, n. 4, p. 81–84, jul. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1049/iet-net.2016.0001>>.
- [54] JO, K.; SUNWOO, M. Generation of a precise roadway map for autonomous cars. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 15, n. 3, p. 925–937, 2014.
- [55] ALAM, M. S. U. et al. Securing vehicle ecu communications and stored data. In: *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ICC.2019.8762043>>.
- [56] BARDELANG, T. Can im hardware in the loop (hil) simulator-erfahrungen mit vernetzten fahrzeugfunktionen und deren prüfung im rahmen der anwendung eines hil-simulators für schwere lkw. In: *Vector Symposium CAN im Nutzfahrzeug*. [S.l.: s.n.], 2004.
- [57] WHO, V. Global status report on road safety 2023. *World Health Organization*, 2023.
- [58] SINGH, S. *Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey*. [S.l.], 2015.
- [59] RAMSEY, M. *Self-Driving Cars Could Cut Down on Accidents, Study Says*. 2015. <https://www.wsj.com/articles/self-driving-cars-could-cut-down-on-accidents-study-says-1425567905>. [Accessed 06-Nov-2022].
- [60] KAMAU, J. et al. Demand responsive mobility as a service. In: *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 001741–001746.
- [61] VOSOOGHI, R. et al. Shared autonomous vehicle simulation and service design. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Else-

- vier BV, v. 107, p. 15–33, out. 2019. ISSN 0968-090X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.006>>.
- [62] STERN, R. E. et al. Quantifying air quality benefits resulting from few autonomous vehicles stabilizing traffic. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier BV, v. 67, p. 351–365, fev. 2019. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2018.12.008>>.
- [63] RAHMAN, M. M. et al. How the older population perceives self-driving vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Elsevier BV, v. 65, p. 242–257, ago. 2019. ISSN 1369-8478. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2019.08.002>>.
- [64] DUARTE, F.; RATTI, C. The impact of autonomous vehicles on cities: A review. *Journal of Urban Technology*, Informa UK Limited, v. 25, n. 4, p. 3–18, jul. 2018. ISSN 1466-1853. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10630732.2018.1493883>>.
- [65] ANDERSON, J. M. et al. *Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers*. [S.l.]: Rand Corporation, 2014.
- [66] CHEN, Y. et al. Quantifying autonomous vehicles national fuel consumption impacts: A data-rich approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier BV, v. 122, p. 134–145, abr. 2019. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2017.10.012>>.
- [67] XU, S.; PENG, H. Design and comparison of fuel-saving speed planning algorithms for automated vehicles. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, p. 9070–9080, 2018. ISSN 2169-3536. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2805883>>.
- [68] SCHREURS, M. A.; STEUWER, S. D. Autonomous driving - political, legal, social, and sustainability dimensions. In: *Autonomes Fahren*. Springer Berlin Heidelberg, 2015. p. 151–173. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9_8)>.
- [69] GRUNWALD, A. Societal risk constellations for autonomous driving. analysis, historical context and assessment. In: *Autonomous Driving*. Springer Berlin Heidelberg, 2016. p. 641–663. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_30)>.

- [70] BONNEFON, J.-F.; SHARIFF, A.; RAHWAN, I. The social dilemma of autonomous vehicles. *Science*, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 352, n. 6293, p. 1573–1576, jun. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1126/science.aaf2654>>.
- [71] SIKKENK, M.; TERKEN, J. Rules of conduct for autonomous vehicles. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. ACM, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2799250.2799270>>.
- [72] CHEN, C. et al. Deepdriving: Learning affordance for direct perception in autonomous driving. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. [S.l.: s.n.], 2015.
- [73] AL-QIZWINI, M. et al. Deep learning algorithm for autonomous driving using googlenet. In: *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/IVS.2017.7995703>>.
- [74] PINHEIRO, B. C. Sistema de controle tempo real embarcado para automação de manobra de estacionamento. *Dissertação de Mestrado em Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina*, 2009.
- [75] KLEER, A. A.; THIELO, M. R.; SANTOS, A. d. C. K. d. A física utilizada na investigação de acidentes de trânsito. *Unidversidade Federal do Rio Grande Repositório Institucional*, 1997.
- [76] LEAL, L. d. C. M.; ROSA, E. da; NICOLAZZI, L. C. Uma introdução à modelagem quase estática de veículos automotores de rodas. *Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*, 2008.
- [77] THRUN, S. Robotic mapping: a survey. *Exploring Artificial Intelligence in the New-Millennium, San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.*, p. 1–35, 2003.
- [78] DINAS, S.; BAÑÓN, J. M. A literature review of bounding volumes hierarchy focused on collision detection. *Ingeniería y competitividad*, Universidad del Vall, v. 17, n. 1, p. 49–62, 2015.

- [79] GUO, K.; XIA, J. An improved algorithm of collision detection in 2d grapple games. In: *2010 Third International Symposium on Intelligent Information Technology and Security Informatics*. IEEE, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/IITSI.2010.176>>.
- [80] OGATA, K. et al. *Modern control engineering*. [S.l.]: Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2010.
- [81] ROSSITER, J. A. *Model-based predictive control: a practical approach*. [S.l.]: CRC press, 2017.
- [82] NORMEY-RICO, J.; GÓMEZ-ORTEGA, J.; CAMACHO, E. A smith predictor based generalized predictive controller for mobile robot path-tracking. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier BV, v. 31, n. 3, p. 153–158, mar. 1998. ISSN 1474-6670. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)44077-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670(17)44077-8)>.
- [83] LU, D. et al. Carom air – vehicle localization and traffic scene reconstruction from aerial videos. 05 2023.
- [84] VIEIRA, R.; ARGENTO, E.; REVOREDO, T. Trajectory planning for car-like robots through curve parametrization and genetic algorithm optimization with applications to autonomous parking. *IEEE Latin America Transactions*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 20, n. 2, p. 309–316, fev. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tla.2022.9661471>>.
- [85] VIEIRA, R. P.; REVOREDO, T. C. Path planning for automobile urban parking through curve parametrization and genetic algorithm optimization. In: *2022 26th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. IEEE, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/mmar55195.2022.9874289>>.
- [86] VIEIRA, R. P.; ARGENTO, E. V.; REVOREDO, T. C. An autonomous parallel parking algorithm for car-like mobile robots. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer Science and Business Media LLC, v. 33, n. 6, p. 1762–1772, jun. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40313-022-00924-z>>.

- [87] FERGUSON, D.; STENTZ, A. Using interpolation to improve path planning: The field d\* algorithm. *Journal of Field Robotics*, Wiley, v. 23, n. 2, p. 79–101, fev. 2006. ISSN 1556-4967. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/rob.20109>>.
- [88] CHEN, G. et al. Dynamic drifting control for general path tracking of autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, n. 3, p. 2527–2537, mar. 2023. ISSN 2379-8858. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/TIV.2023.3235007>>.
- [89] FAYYAZI, M. et al. Real-time self-adaptive q-learning controller for energy management of conventional autonomous vehicles. *Expert Systems with Applications*, Elsevier BV, v. 222, p. 119770, jul. 2023. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119770>>.
- [90] POMERLEAU, D. A. Alvin: An autonomous land vehicle in a neural network. *Advances in neural information processing systems*, v. 1, 1988.
- [91] WYMAN, B. et al. Torcs, the open racing car simulator. *Software available at <http://torcs.sourceforge.net>*, v. 4, n. 6, p. 2, 2000.
- [92] RICHTER, S. R. et al. Playing for data: Ground truth from computer games. In: \_\_\_\_\_. *Lecture Notes in Computer Science*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016. p. 102–118. ISBN 9783319464756.
- [93] RICHTER, S. R.; HAYDER, Z.; KOLTUN, V. Playing for benchmarks. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. [S.l.: s.n.], 2017.
- [94] DOSOVITSKIY, A. et al. CARLA: An open urban driving simulator. In: *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–16.
- [95] QUICK start package installation - CARLA Simulator — [carla.readthedocs.io](https://carla.readthedocs.io). [https://carla.readthedocs.io/en/latest/start\\_quickstart/](https://carla.readthedocs.io/en/latest/start_quickstart/). [Accessed 11-01-2024].
- [96] SANDERS, A. *An introduction to Unreal engine 4*. [S.l.]: CRC Press, 2016.

- [97] DING, Y. et al. Glad: Grounded layered autonomous driving for complex service tasks. *arXiv preprint arXiv:2210.02302*, 2022.
- [98] RODIONOVA, A. et al. How safe is safe enough? automatic safety constraints boundary estimation for decision-making in automated vehicles. In: *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2020. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304756>>.
- [99] SADEGHI, J. et al. A step towards efficient evaluation of complex perception tasks in simulation. *arXiv preprint arXiv:2110.02739*, 2021.
- [100] TESLA. *Model 3 — Tesla — tesla.com*. 2023. <https://www.tesla.com/model3>. [Accessed 30-Jan-2023].
- [101] CARLA. *CARLA Agents - CARLA Simulator — carla.readthedocs.io*. 2024. [https://carla.readthedocs.io/en/0.9.13/adv\\_agents/](https://carla.readthedocs.io/en/0.9.13/adv_agents/). [Accessed 19-02-2024].