

Controle Longitudinal de um Veículo Autônomo em Ambiente de Simulação

André L. Tomé, Italo A. Pereira

*Undergraduate Students in Control and Automation Engineering;
Department of Electronic Engineering, Universidade Federal de Minas
Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brazil.*

Abstract: This document summarizes the outcomes of the "Introduction to Autonomous Vehicles" course, focusing on the development of assistance and autonomous driving systems for vehicles. The work aims to solidify the studied concepts towards building solutions for autonomy levels 0 and 1, to be validated using the CoppeliaSim simulator. The tasks involve implementing longitudinal speed controllers, obtaining vehicle model parameters, designing control systems, and testing controller performance under various scenarios, culminating in real-world validation.

Keywords: Autonomous Vehicles, Autonomous Driving Systems, Autonomy Levels, CoppeliaSim Simulator, Longitudinal Speed Controller, Vehicle Model Parameters, Control Systems, Performance Testing, Real-world Validation

1 Introdução

A evolução dos veículos autônomos representa uma das grandes revoluções dos últimos anos, prometendo transformar não apenas a maneira como nos deslocamos, mas também a própria concepção do transporte. Desde os sistemas de assistência à condução até os veículos totalmente autônomos, avanços significativos têm sido alcançados, impulsionados pela combinação de tecnologias como inteligência artificial, sensores avançados e algoritmos de controle. Este trabalho tem como objetivo explorar um dos fundamentos essenciais do funcionamento dos veículos autônomos, com foco particular na modelagem e controle longitudinal, que desempenham um papel central na dinâmica e na segurança desses veículos.

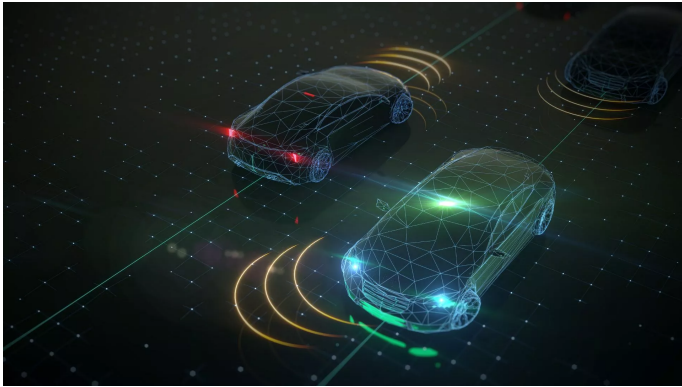


Fig. 1. Elton (2023) Sistemas de carros autônomos representam a interconexão inteligente da tecnologia para o futuro da mobilidade.

A necessidade de modelar e controlar longitudinalmente um veículo autônomo surge da demanda por sistemas capazes de manter uma trajetória segura e estável em diferentes condições de operação. A dinâmica longitudinal abrange aspectos como aceleração, frenagem, controle de

velocidade e resistências ao movimento, todos cruciais para o desempenho e a eficiência do veículo. Além disso, a modelagem pode considerar variáveis como carga, inclinação da pista, resistência ao rolamento e arrasto aerodinâmico, entre outros, para garantir uma representação precisa do comportamento do veículo em tempo real.

A implementação de sistemas de controle longitudinal eficazes não apenas aumenta a segurança e a estabilidade dos veículos autônomos, mas também permite a otimização do consumo de energia, a redução do desgaste mecânico e uma experiência de condução mais confortável para os passageiros. Neste contexto, explorar os princípios fundamentais da modelagem e controle longitudinal é essencial para avançar no desenvolvimento e na adoção de veículos autônomos, preparando o caminho para um futuro de mobilidade mais seguro, eficiente e sustentável.

2 Modelagem Longitudinal e Distribuição de Forças

Nesta seção, será descrita a modelagem longitudinal do veículo, incluindo a distribuição de forças que afetam seu movimento.

2.1 Equacionamento da Dinâmica Longitudinal

A dinâmica longitudinal do veículo pode ser descrita pela seguinte equação de movimento:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F_x - F_{\text{aero}} - F_{\text{grad}} - R_x \quad (1)$$

onde:

- m é a massa do veículo,
- x é a posição longitudinal,
- t é o tempo,
- F_x é a força de propulsão,
- F_{aero} é a força de arrasto aerodinâmico,

- F_{grad} é a força devido ao gradiente da pista, e
- R_x é a resistência de rolamento.

É válido destacar que a Equação (1) não considera efeitos oriundos do acoplamento entre o motor e os eixos. Isto é o mesmo que considerar que a equação descreve o movimento do carro desengrenado, isto é, com a marcha no ponto morto.

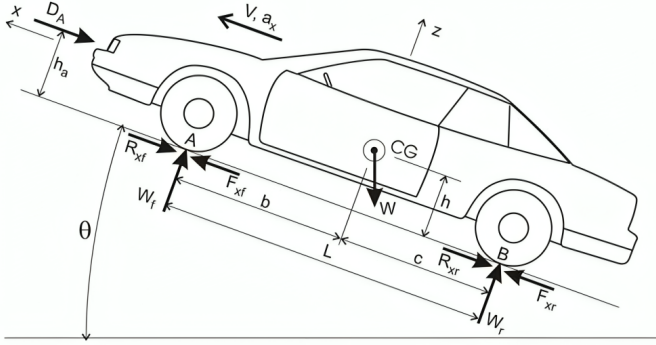


Fig. 2. Distribuição de Forças existentes no carro para análise da modelagem longitudinal.

2.1.1 Força de Propulsão A força de propulsão, F_x , é gerada pelo motor do veículo e é responsável por impulsionar o veículo para frente.

2.1.2 Força de Arrasto Aerodinâmico A força de arrasto aerodinâmico, F_{aero} , surge devido à resistência do ar e é proporcional à velocidade do veículo ao quadrado. A equação correspondente é dada por:

$$F_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f (V_x + V_w)^2 \quad (2)$$

onde:

- ρ é a massa específica do ar,
- C_d é o coeficiente de arrasto,
- A_f é a projeção da área frontal,
- V_x é a velocidade do veículo, e
- V_w é a velocidade do vento.

O termo $(V_x + V_w)^2$ pode ser aproximado por \dot{x}^2 , onde \dot{x} é a velocidade do veículo.

2.1.3 Força devido ao Gradiente da Pista A força devido ao gradiente da pista, F_{grad} , surge quando o veículo está subindo ou descendo uma rampa e é calculada como:

$$F_{\text{grad}} = -mg \sin(\theta) \quad (3)$$

onde:

- m é a massa do veículo,
- g é a aceleração da gravidade, e
- θ é o ângulo de inclinação da pista.

2.1.4 Resistência de Rolamento A resistência de rolamento pode ser modelada pela seguinte equação:

$$F_{\text{rr}} = f \cdot F_z \quad (4)$$

onde F_{rr} é a resistência de rolamento, f é o coeficiente de resistência de rolamento e F_z é a carga vertical sobre a roda.

2.1.5 Modelo Completo da Dinâmica Longitudinal O modelo completo da dinâmica longitudinal do veículo autônomo pode ser representado pelas seguintes equações, utilizando as equações previamente definidas:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x - F_{\text{aero}} - F_{\text{grad}} - R_x \quad (5)$$

$$F_{\text{rr}} = f \cdot F_z \quad (6)$$

$$F_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f \cdot \dot{x}^2 \quad (7)$$

$$F_{\text{grad}} = mg \sin(\theta) \quad (8)$$

$$R_x = fmg \cos(\theta) \quad (9)$$

onde:

- m é a massa do veículo,
- x é a posição longitudinal,
- t é o tempo,
- F_x é a força de propulsão,
- F_{aero} é a força de arrasto aerodinâmico,
- F_{grad} é a força devido ao gradiente da pista,
- R_x é a resistência de rolamento,
- f é o coeficiente de resistência de rolamento,
- F_z é a carga vertical sobre a roda,
- ρ é a massa específica do ar,
- C_d é o coeficiente de arrasto,
- A_f é a projeção da área frontal, e
- \dot{x} é a velocidade do veículo.

2.2 Modelagem do Carrinho com uso do CoppeliaSim e Testes de Coastdown

Nesta seção, será descrita como a modelagem do carrinho foi realizada com auxílio do software CoppeliaSim e como os testes de coastdown foram conduzidos para obter os parâmetros de arrasto (C_d) e resistência de rolagem (R_x).

2.2.1 Modelagem no CoppeliaSim Para realizar a modelagem do carrinho, utilizamos o modelo disponibilizado no GitHub da disciplina Neto and Mozelli (2024), que representa as características dinâmicas do veículo. Esse modelo leva em consideração parâmetros da pista, bem como os parâmetros físicos estimados do veículo real, como massa, área frontal e coeficientes de arrasto.



Fig. 3. Modelo do carrinho a ser utilizado nas simulações e pista utilizada para obtenção dos resultados

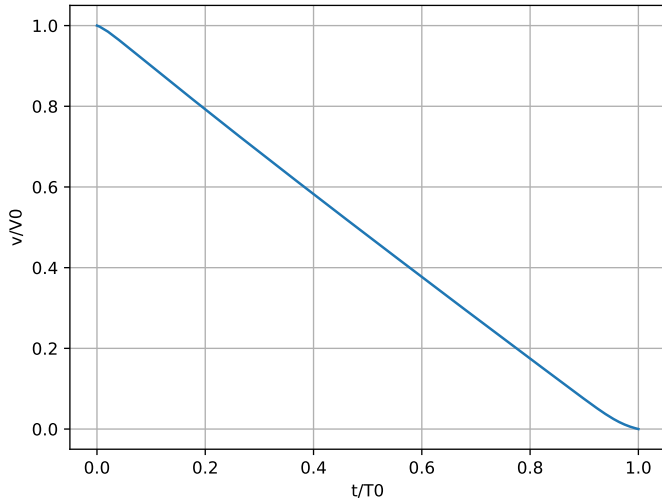


Fig. 4. Gráfico normalizado para determinação de β

2.2.2 Testes de Coastdown Os testes de coastdown foram conduzidos para determinar os parâmetros de arrasto (C_d) e resistência de rolagem (R_x) do veículo. Durante esses testes, o veículo foi colocado para acelerar em uma superfície plana e livre de obstáculos. Após atingir uma velocidade de 3m/s, o carro manteve seu movimento por 2 segundos e, em seguida, foi deixado desacelerar naturalmente até parar.

2.2.2.1 Determinação de β Através do teste descrito, foi gerado o gráfico da Figura 4 para a determinação do parâmetro β , que é necessário para os cálculos analíticos do coeficiente de arrasto C_d e da resistência de rolagem R_x .

A equação que descreve β segundo os parâmetros levantados por meio da Figura 4 é apresentada em (10), onde V_0 e T_0 são, respectivamente, a velocidade inicial do teste e a duração deste.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{\beta} \tan \left[\left(1 - \frac{T}{T_0} \right) \arctan \beta \right] \quad (10)$$

Percebe-se que isolar β na Equação (10) é uma tarefa complicada e, por isso, a equação foi solucionada de maneira gráfica no *software* Geogebra. Para tal, é necessário perceber que, quando V/V_0 é 0.6, t/T_0 vale cerca de 0.38. Com isto, é possível gerar o gráfico $y = 0.6\beta$ e o gráfico $y = \tan[0.62 \arctan \beta]$. A intersecção das curvas ocorre em $\beta = 0.41$.

2.2.2.2 Determinação de C_d O coeficiente de arrasto (C_d) foi determinado utilizando a fórmula:

$$C_d = \frac{2 \cdot m \cdot \beta \cdot \tan^{-1}(\beta)}{v_0 \cdot T \cdot \rho \cdot A_f} \quad (11)$$

onde:

- m é a massa do veículo;
- β é a taxa de desaceleração, que vale 0.41;
- v_0 é a velocidade inicial;

- T é o tempo de coastdown;
- ρ é a densidade do ar e
- A_f é a área frontal.

2.2.2.3 Determinação de R_x A resistência de rolagem (R_x) foi determinada utilizando a fórmula:

$$R_x = \frac{v_0 \cdot m \cdot \tan^{-1}(\beta)}{\beta \cdot T} \quad (12)$$

onde os símbolos têm o mesmo significado que na equação para C_d .

2.2.3 Modelo final Nesta subseção, estão apresentados os parâmetros utilizados na simulação do carrinho no Coppeliasim, conforme definidos nos scripts fornecidos, os parâmetros calculados analiticamente e o modelo analítico obtido.

2.2.3.1 Parâmetros do Carro no Coppeliasim

- Velocidade Máxima (VELMAX): 5.0 m/s
- Aceleração Máxima (ACCELMAX): 0.5 m/s²
- Ângulo Máximo de Estiramento (STEERMAX): 20.0°
- Área Frontal (A_f): 1m²
- Massa (MASS): 6.35 kg
- Distância entre Eixos (L): 0.302 m
- Força de Resistência de Rolagem (R_x): 1,81 N
- Coeficiente de Arrasto (C_d): 0,055

2.2.3.2 Modelo analítico Segundo os valores apresentados e a discussão apresentada na seção 2.1.5, o movimento do carro pode ser descrito segundo a seguinte equação:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_x}{6.35} - 0.006\dot{x}^2 - 0,28 \quad (13)$$

O ponto de operação escolhido é velocidade igual à 1m/s e aceleração igual a 0,1m/s². Através da linearização da equação apresentada acima em torno do ponto de operação definido, é possível encontrar a seguinte função de transferência:

$$G = \frac{13}{83s + 1} \quad (14)$$

Entretanto, deve-se lembrar que o modelo obtido não leva em consideração o acoplamento do motor e, por isso, não é adequado para a definição do controlador. Por este motivo, foi realizada uma modelagem *data driven* utilizando a simulação existente com o auxílio com o monitor da disciplina.

2.3 Modelagem data driven do Carrinho com uso do Coppeliasim

A fim de se realizar a modelagem *data driven*, o monitor da disciplina disponibilizou os códigos que ele utiliza para fazer a identificação do sistema e explicou a teoria por trás destes. Por meio desta identificação, o efeito do acoplamento do motor será contabilizado. Inicialmente foi realizado um novo teste Coastdown, cujo resultado é

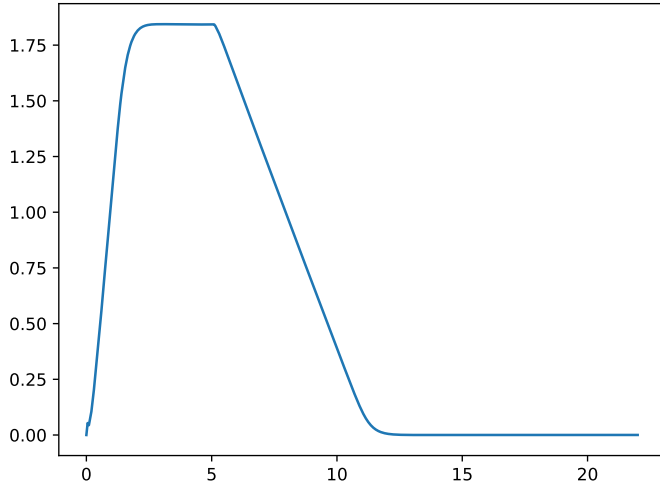


Fig. 5. Novo teste para identificação do sistema.

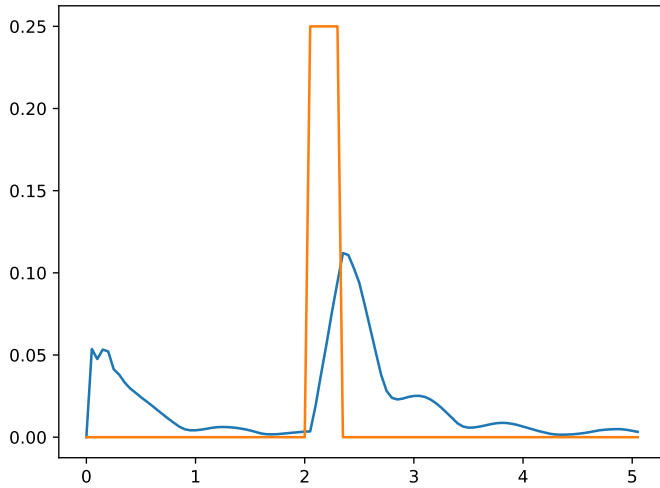


Fig. 6. Resposta ao pulso simulada. A linha laranja representa a entrada e a azul o sinal de velocidade obtido na simulação.

exibido na Figura 5. Este teste foi realizado, pois a *pipeline* desenvolvida no código necessitava destes dados para um novo cálculo de β . Entretanto, como o valor de β já havia sido calculado, esta parte da *pipeline* não foi levada em consideração e aqui está presente apenas por motivos de completude.

Após a realização do teste, foi feita uma nova simulação para obter a resposta a um pulso de curta duração do sistema, visto que a técnica de identificação proposta irá modelar o sistema com base nesta resposta, que pode-se considerar que aproxima o impulso. O resultado é apresentado na figura 6.

Com os dados coletados anteriormente, foi executado o código para de fato realizar a identificação do sistema. Primeiramente, a partir do valor de β anteriormente estimado, são calculados novos R_x e C_d . Por meio destes, valores de ganho e constante de tempo do sistema podem ser calculados. Depois, os dados coletados da resposta ao pulso são tratados e uma região é selecionada para a etapa

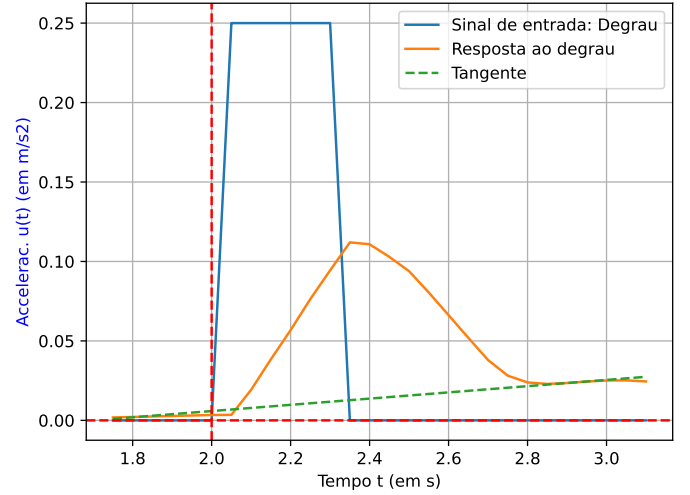


Fig. 7. Região selecionada para procedimento de identificação e validação.

de validação do modelo. Tal região é ilustrada na Figura 7.

O modelo obtido será de segunda ordem, com um polo integrador, visto que o sistema identificado leva em conta que a saída é a posição do carrinho. O grupo foi instruído a desenvolver um modelo que se aproxime da curva de subida da resposta ao pulso, já que a entrada aplicada tem curta duração. Porém, os cálculos analíticos não originavam modelos que cumpriam este objetivo. Portanto, a fim de se obter o modelo final utilizado para criação do controlador, o grupo ajustou os valores de ganho e polo não integrador para conseguir tal aproximação. Neste sentido, o modelo identificado é apresentado na Equação (15). Para projetar o controlador PI, como o interesse se encontra na velocidade do carrinho e não na posição, o modelo considerado será a derivada da Equação (15). O gráfico de validação se encontra na Figura 8. Nota-se que o modelo aproxima bem a curva de subida da resposta simulada.

$$G = \frac{1.6}{s(0.03s + 1)} \quad (15)$$

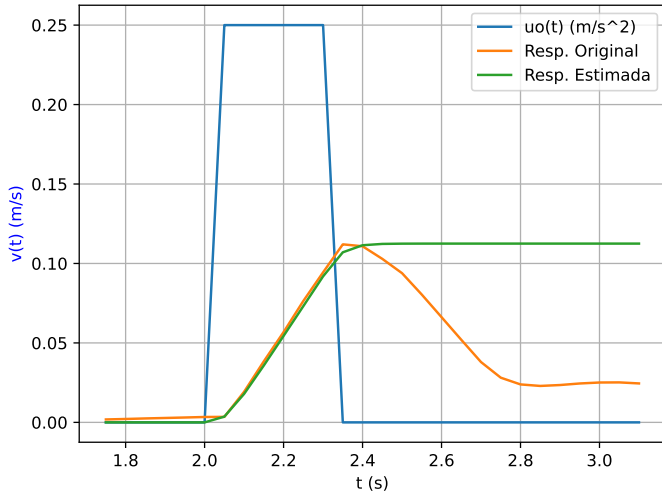


Fig. 8. Validação do modelo obtido.

3 Controle Longitudinal do Carrinho

Esta seção aborda o controle longitudinal do carrinho, focando na regulação da velocidade ao longo do tempo em torno de 1m/s. Foram utilizados dois tipos de controladores: um controlador *On-Off* para atingir um ponto de operação inicial e um controlador PI por alocação de polos para melhorar o desempenho após atingir esse ponto.

3.1 Controlador On-Off

Inicialmente, é empregado um controlador *On-Off* para regular a velocidade do carrinho em relação à referência desejada. Este tipo de controlador atua diretamente na mudança de velocidade do carrinho, aumentando ou diminuindo a aceleração de forma abrupta.

3.1.1 Funcionamento O controlador *On-Off* opera da seguinte maneira:

- Se a velocidade do carrinho for menor ou igual à referência (v_{ref}), o controlador aumenta a aceleração para acelerar o carrinho.
- Se a velocidade do carrinho for maior que a referência (v_{ref}), o controlador reduz a aceleração para desacelerar o carrinho.

Os parâmetros utilizados neste controlador são:

- Referência de Velocidade (v_{ref}): 1.0 m/s

O controle da aceleração (acc) é dado por:

$$acc = (v_{ref} - v) \times 2$$

onde v é a velocidade atual do carrinho.

Este controlador fica ativo por 4 segundos e depois o controlador PI entra em ação.

3.2 Controlador PI por Alocação de Polos

Após atingir o ponto de operação com o controlador *On-Off*, é empregado um controlador PI por alocação de polos para melhorar o desempenho do controle longitudinal.

Este controlador proporciona uma resposta mais suave e estável, reduzindo oscilações, melhorando a precisão do acompanhamento da referência de velocidade e rejeitando perturbações.

Para projetar o controlador, os requisitos de controle foram seguimento de referência em degrau sem erro e ausência de sobressinal. O tempo de acomodação (critério de 95%) tem que ser menor que 1. Uma vez obtido o controlador, percebeu-se que este era agressivo, pois atuava bastante tempo em regime de saturação e apresentava um sobressinal relativamente alto quando ocorria mudanças de referências, o que pode indicar que o modelo utilizado não estava tão adequado assim. Por isso, o critério de tempo de acomodação foi relaxado para 3 segundos e ajustes finos foram realizados para limitar o tempo de atuação na saturação, deixando o controle mais suave. Um sobressinal de 15% foi tolerado. Com isto, chegou-se no controlador final:

$$C(s) = 0.5 \left(1 + \frac{1}{2.5s} \right), \quad (16)$$

que pode ser discretizado, aproximando a integral por um somatório e considerando t_s o tempo de amostragem, como:

$$u[k+1] = 0.5 \left(e[k] + \frac{t_s \sum_0^k e_i}{2.5} \right), \quad (17)$$

sendo e o erro de seguimento.

3.2.1 Funcionamento O controlador PI (Proporcional-Integral) opera da seguinte maneira:

- O termo proporcional ($K_p \times err$) atua imediatamente para reduzir o erro entre a velocidade desejada e a velocidade medida.
- O termo integral ($K_i \times \sum err$) atua ao longo do tempo para corrigir erros persistentes, acumulando a integral do erro.
- Um saturador é empregado para limitar a ação de controle dentro de determinados limites.

Os parâmetros utilizados neste controlador são:

- Ganho Proporcional (K_p): 0.5
- Ganho Integral (K_i): $0.5 \times 0.05/2.5$

A ação de controle (u) é dada pela Equação (17):

3.2.2 Resultados Para avaliar o desempenho da malha de controle realizada, foram realizados três testes de controle:

- (1) **Teste 1:** Referência de velocidade de 1 m/s para 1,5 m/s.

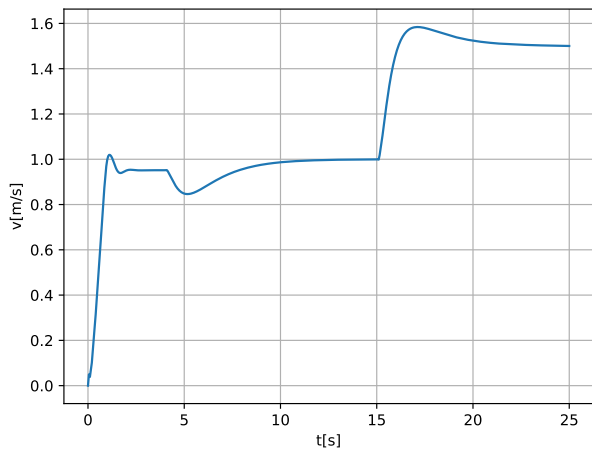


Fig. 9. Gráfico $t \times v$ obtido na simulação com degrau ($1m/s \rightarrow 1.5m/s$)

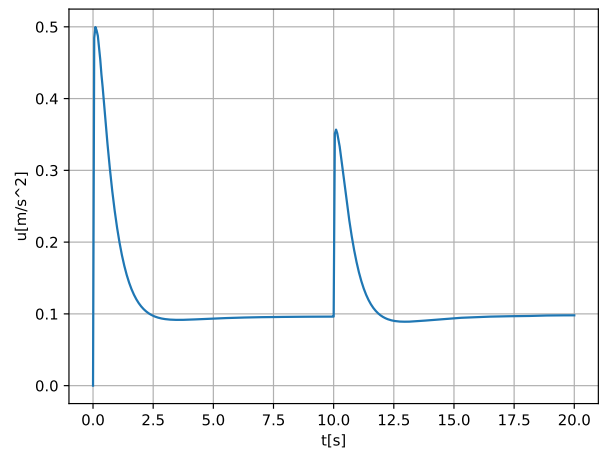


Fig. 12. Gráfico $t \times u$ obtido na simulação sem ON/OFF

(3) **Teste 3:** Rejeição de perturbação (carro subindo rampa com referência de velocidade de 1m/s).

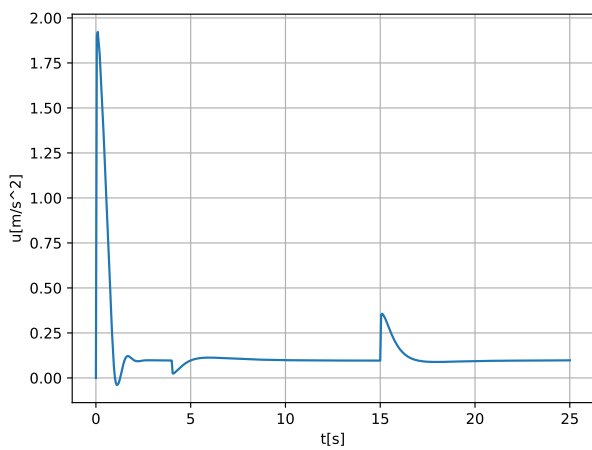


Fig. 10. Gráfico $t \times u$ obtido na simulação com degrau ($1m/s \rightarrow 1.5m/s$)

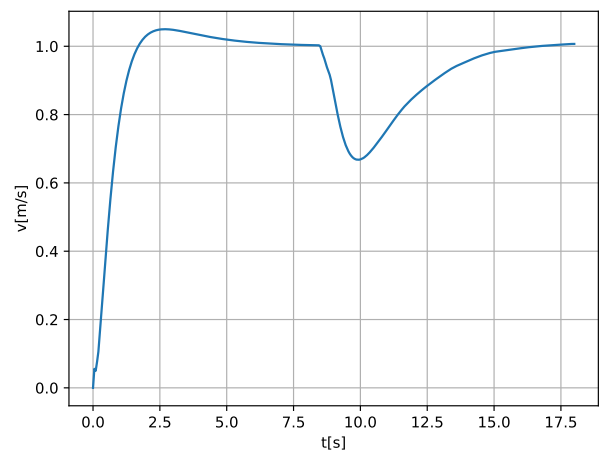


Fig. 13. Gráfico $t \times v$ obtido na simulação com o carrinho subindo rampa

(2) **Teste 2:** Referência de velocidade de 0m/s para 1m/s sem ON/OFF.

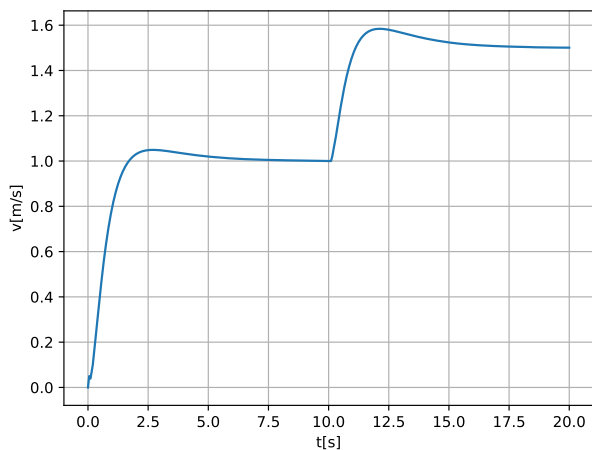


Fig. 11. Gráfico $t \times v$ obtido na simulação sem ON/OFF

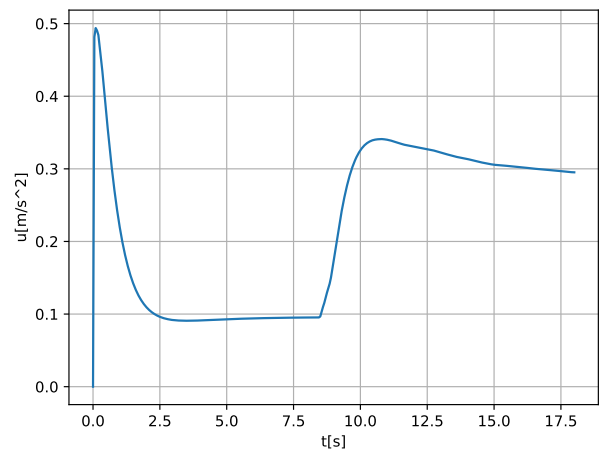


Fig. 14. Gráfico $t \times u$ obtido na simulação com o carrinho subindo rampa

3.2.2.1 Análise dos Resultados Os resultados obtidos nos testes de controle na simulação foram positivos, apesar da malha fechada ter uma atuação mais lenta. Mesmo diante de perturbações, como a subida de uma rampa, o controlador demonstrou capacidade de reagir de forma adequada ainda que lenta, mantendo a resposta do sistema próxima à referência de velocidade desejada. Isto de certa forma era esperado, pois a ação de controle original foi bastante suavizada para evitar a saturação do controlador e permitir uma implementação prática mais direta, que, apesar disto, não se mostrou satisfatória.

Nos testes de troca de referência, observou-se que os requisitos de controle foram atendidos. Além disso, durante o teste com o controlador ON-OFF desativado, foi observado que não há necessidade de tal, visto que o controlador PI conseguiu atuar de forma adequada dentro dos requisitos.

No entanto, é importante ressaltar que o grupo enfrentou muitos empecilhos na etapa de modelagem, pois insistiu, na maior parte do tempo, em realizá-la de forma analítica sem saber que o acoplamento do motor estava sendo desconsiderado. Por isso, o grupo teve pouco tempo de aula para corrigir o modelo e fazer uma identificação melhor. Portanto, é necessário rever o modelo utilizado a fim de melhorar o controlador.

Os testes realizados com o carro real não foram positivos. Foi constatado que, na prática, o controlador ainda tende a saturar bastante, levando a um comportamento quase que chaveado que impede o seguimento de referência sem oscilação. Porém, dado as dificuldades em se conectar ao wi-fi e o atraso em encontrar um bom modelo para a dinâmica do carro, o grupo não conseguiu melhorar o controlador. Novamente, atenta-se para a necessidade de melhorar o modelo.

Por fim, um controlador neural também foi proposto e apresentado aos professores. Este controlador, porém, não foi abordado neste relatório para mantê-lo sucinto e com um foco maior nos métodos clássicos, pois estes são mais viáveis de serem implementados na prática e de maior interesse do grupo para essa disciplina em específico.

References

- Elton, C. (2023). Driverless cars: The dark side of autonomous vehicles that no one's talking about. URL https://static.euroneews.com/articles/stories/07/31/02/02/1920x1080_cmsv2_cccec74ce-888e-5f64-b08a-c35082abbc35-7310202.jpg.
- Neto, A.A. and Mozelli, L.A. (2024). Fundamentos de Veículos Autônomos. https://github.com/GTI-UFGM/fundamentos_veiculos_autonomos. Acessado em 24/04/24.