

Modelos Autônomos “Segue-Faixas”: Uma Análise Comparativa dos Algoritmos de Controle tradicional e PID

Emanuel C. A. Cardoso¹, Henrique S Lourenço², Rafael G de Barros³, Mario T Shimanuki⁴

¹ Graduando em Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Instituto Federal de São Paulo, IFSP, Campus Caraguatatuba, emanuelc279@gmail.com

² Graduando em Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Instituto Federal de São Paulo, IFSP, Campus Caraguatatuba, szabopessoa@gmail.com

³ Graduando em Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Instituto Federal de São Paulo, IFSP, Campus Caraguatatuba, rafael.graciliano@aluno.ifsp.edu.br

⁴ Professor do curso de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Instituto Federal de São Paulo, IFSP, Campus Caraguatatuba, mario@ifspcaragua.net

Área de conhecimento: Análise de Algoritmos e Complexidade de Computação – 1.03.01.03-8

RESUMO:

O presente trabalho tem como objetivo discorrer sobre veículos autônomos que utilizam de algoritmos de controle capazes de, por meio de técnicas de correção, seguir percursos determinados por faixas. Buscou-se reunir, discutir e descrever técnicas de implementação, métodos de construção e aplicação. Analisando: 1) o modelo Tradicional, que busca através de decisões binárias, dado um ponto referência (setpoint), corrigir eventuais erros de trajeto; e 2) o modelo PID, que busca minimizar o erro entre o valor desejado e o valor real (saída do sistema) através de três componentes principais: Proporcional, Integral e Derivativo. Tratou-se principalmente do controlador PID e suas especificidades quando em aplicação e teoria. Para tanto, foram definidos indicadores de performance, visando possibilitar a visualização de uma comparação direta entre controladores aplicados a um mesmo protótipo. Considerando os dados obtidos durante o processo de pesquisa, evidencia-se as vantagens na aplicação dos modelos de controle e sua eficácia no objetivo final: Desenvolver um modelo capaz de seguir um percurso determinado (uma faixa) de forma autônoma, precisa e constante.

PALAVRAS-CHAVE: algoritmo de controle; PID; modelos autônomos; segue faixas;

1 INTRODUÇÃO

“Um veículo é considerado autônomo quando este é apto a realizar navegação automática, ou seja, é capaz de dirigir e reagir ao meio sem controle externo” [1]. Logo, veículos autônomos baseados em seguir faixas de forma eficaz e segura é um

elemento-chave dessa tecnologia. Desta forma, prover o controle em ambientes dinâmicos com precisão é um desafio significativo, sendo necessário tratar com diversas variáveis, tais como: Adaptabilidade, complexidade e implementação, erros e/ou perda do percurso, precisão e etc.

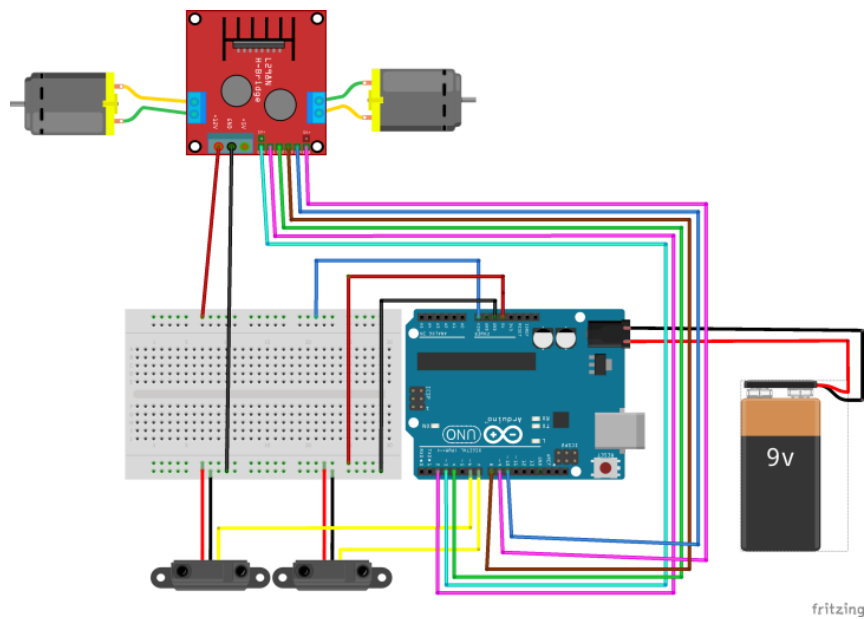
Os algoritmos de controle desempenham um papel fundamental na determinação do comportamento de um veículo autônomo ao seguir faixas. Dois paradigmas de controle têm sido amplamente estudados e implementados: os sistemas de controle tradicional e os controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Enquanto os sistemas de controle tradicional oferecem uma abordagem estabelecida com base em regras lógicas, os controladores PID utilizam uma realimentação em tempo real para ajustar continuamente o comportamento do veículo. A escolha entre essas abordagens pode influenciar significativamente o desempenho e a eficácia dos veículos autônomos.

Neste contexto, este estudo propõe uma avaliação comparativa abrangente entre algoritmos de controle tradicional e controladores PID em veículos autônomos segue-faixas, no ambiente de uma competição. Para tanto, optou-se por analisar os dados considerando indicadores de performance que cabíveis dado o contexto citado que são 1) Aplicabilidade, 2) Correção de erros, 3) Desempenho em curvas, 4) Adaptabilidade.

Ao realizar esta análise comparativa, pretende-se contribuir para maiores discussões e compreensão, de modo geral, quando dada a questão de comparação entre modelos de controle. Busca-se sintetizar, discutir e enfatizar pontos chaves (positivos e negativos) da utilização de ambos.

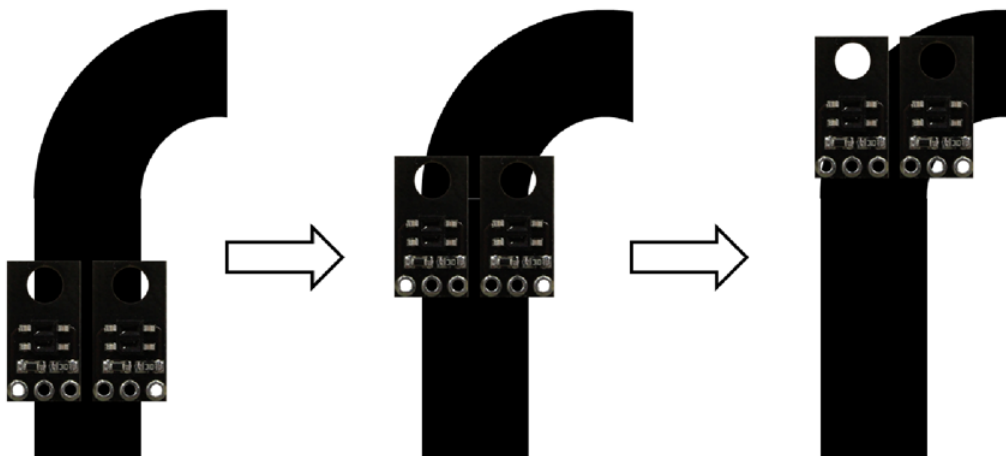
2 TEORIA

O controle de um veículo autônomo segue-faixas é normalmente composto por: micro controlador, ponte H, motores DC e sensores de refletância.. A figura 1 é o esquema de um segue-faixa com dois sensores de refletância:i



”Figura 1: Esquema de ligações básico de um veículo autônomo segue-faixas.” Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/robo-seguidor-de-linha/>. Acessado em: 16/10/2023

No modelo ilustrado na Figura 1, o sistema de controle normalmente implementado é o controle tradicional, por sua baixa quantidade de sensores necessários. No exemplo da figura 2, enquanto ambos os sensores estiverem detectando a faixa o robô segue reto, se um dos sensores não estiver detectando a faixa o sistema saberá que é uma curva e realizará este percurso.



“Figura 2: Comportamento dos sensores em uma curva.” Disponível em: <https://www.robocore.net/tutoriais/robo-seguidor-de-linha/>. Acessado em: 16/10/2023

Em casos onde o veículo possua mais sensores, será possível a implementação do sistema de controle PID, que funciona de forma semelhante ao tradicional, mas realizando o controle de forma proporcional ao erro, caso a faixa esteja no meio do robô

o erro é zero e o veículo continua seguindo reto, a medida que a faixa desvia do centro do segue-faixa o erro aumenta e o sistema de controle calcula uma correção, dessa forma quanto maior o erro maior a correção.

2.1 CONTROLE TRADICIONAL

O controle tradicional abrange uma grande variedade de controles que utilizam, primariamente, de decisões binárias, como por exemplo o controle liga-desliga (on-off). Nesses controles o algoritmo verifica se uma variável de processo está acima ou abaixo de um determinado valor de referência e então executa uma das duas possibilidades. No controlador liga-desliga a saída ou sinal de controle desse controlador alterna entre "totalmente LIGADO" ou "totalmente DESLIGADO", sem estados intermediários [2], contudo os controles tradicionais podem alterna entre parâmetros pré-estabelecidos, não ligado ou desligado necessariamente, como no caso do segue-faixas com dois sensores de refletância, caso o sensor estiver fora da faixa o segue-faixas irá seguir para frente com as duas rodas girando a mesma velocidade, caso um dos sensores esteja sobre a faixa a roda do mesmo lado do sensor sofrerá uma redução na velocidade, fazendo com que o segue-faixas faça uma curva. Dessa forma, em nenhum momento as rodas estavam desligadas ou paradas, mas a saída dependia de uma decisão binária.

2.2 CONTROLADOR PID

O controlador PID é uma técnica de controle de malha fechada, ou seja, a saída do sistema ou a variável controlada é medida por um sensor e a informação é retransmitida a um controlador usado para fazer o controle ou influenciar a variável controlada [3]. No PID os valores de saída medidos pelos sensores são comparados com o setpoint (valor desejado) e então é calculada uma correção da saída para que o sistema possa se aproximar do setpoint. O cálculo para a correção da saída é dividido em três componentes: proporcional, integral e derivativo.

Ação Proporcional (P): Nesse componente, a saída do sistema é ajustada proporcionalmente ao erro (e), a diferença entre o valor desejado e o valor medido. O ganho proporcional (K_p) controla a sensibilidade do controlador em relação ao erro, ou seja, com um K_p de 5 e um erro de 10, a resposta proporcional do sistema seria 50, enquanto com um k_p de 10, a resposta do sistema seria 100. Dessa forma um valor alto de K_p pode resultar em respostas rápidas, mas também pode introduzir oscilações. Por outro lado, um valor baixo de K_p pode resultar em uma resposta lenta do sistema [4, 5].

Ação Integral (I): A Ação Integral é a soma dos erros que acontecem ao longo do tempo multiplicado pelo ganho integral (K_i), ou seja, ela continua aumentando até que o erro seja 0, dessa forma, a ação integral tem como objetivo estabilizar erro em zero [4, 5].

Ação Derivativa (D): A Ação Derivativa considera a taxa de variação do erro e fornece uma correção antecipada. Isso ajuda a melhorar a estabilidade e a reduzir o tempo de resposta do sistema. O ganho derivado (K_d) controla a sensibilidade à taxa de mudança do erro [4 - 6].

O cálculo do controle PID pode ser melhor visualizado na equação 1.

$$(1) \quad u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Onde:

$u(t)$ é a resposta do controlador em determinado tempo (t).

$e(t)$ é a diferença entre o valor desejado e o valor medido no tempo (t).

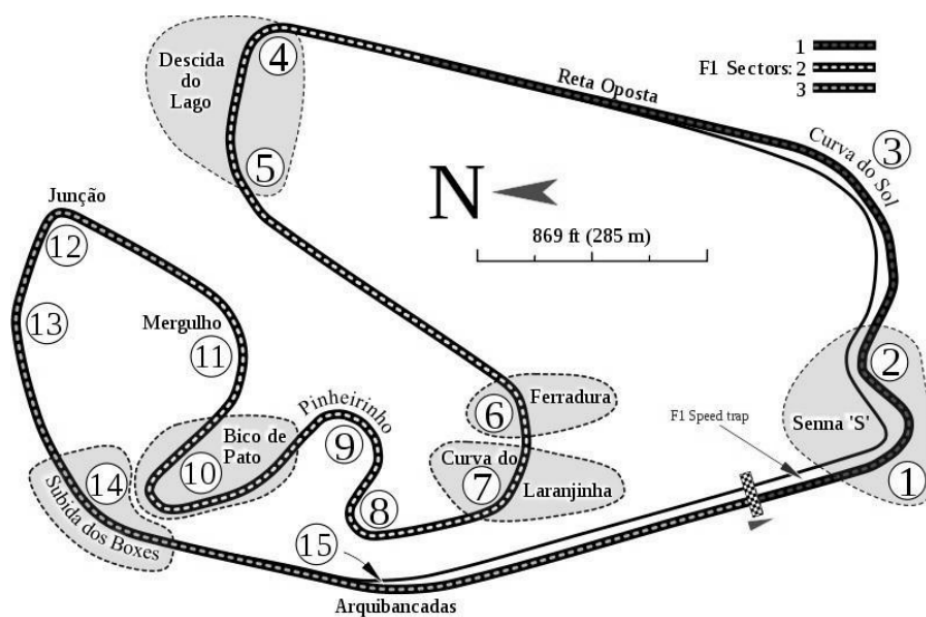
3 MATERIAL E MÉTODOS

A título de comparação direta e, posteriormente, discussão sobre desempenho, buscou-se reunir e organizar materiais que utilizam um mesmo protótipo e controle de variáveis como tempo de teste e percurso utilizado, dado o objetivo do presente trabalho. Variáveis, como por exemplo, o tempo de testagem, são controladas durante o processo de obtenção de dados, para que a análise e conclusão sejam mais concretas e assertivas.

3.1 DADOS COLETADOS

No artigo [7] foram realizadas testes com o robô Lego, testes realizados com o robô Lego, onde foi testado 5 variações do mesmo robô, a 1 foi implementado o sistema de controle PID, na 2, 3 e 5 foi implementada um controle tradicional, onde, se o robô encontrasse a cor branca ele faria um pequeno movimento para esquerda até encontrar a cor preta e ao encontrar a cor preta ele faria uma pequena curva para direita. No 4, além de também ser programado em Java, possui uma estratégia diferente: o robô segue reto enquanto estiver detectando a cor preta, ao detectar a cor branca o robô faria um pequeno giro para esquerda e, caso não ache a cor preta, o robô faria uma curva para direita. Para os testes, todas as versões do robô foram submetidas ao mesmo trajeto

(figura 3) onde foi cronometrado o tempo médio em que o robô realiza uma volta, exposta na tabela 1. Portanto com os testes realizados pela citação acima é possível analisar e colocar em prova uma dos indicadores de performance: Correção de erros, a qual diz respeito à capacidade e desempenho de tal modelo de coibir e corrigir erros oriundos de testes a eles submetidos. Assim como, a partir do circuito ao qual o teste foi realizado, como mostra a figura 3, é possível obter conclusões a respeito de outro importante indicador: Desempenho em curvas. Sendo o modelo que obteve menos tempo no percurso e realizou as curvas propostas com maior precisão.



“Figura 3: Circuito de Interlagos”. Fonte: BRITO, Robison C.; MADALOSSO, Emanoeli; GUIBES, Geovane A. O.. Seguidor de linha para LEGO® Mindstorms utilizando controle PID. Anais do Computer on the Beach, v. 0, n. 0, p. 310-319, 2014. p. 307, fig. 6.

	Robô 1	Robô 2	Robô 3	Robô 4	Robô 5
Tempo médio (5 voltas)	37.5496 segundos	88.6200 segundos	92.1000 segundos	60.4890 segundos	62.3250 segundos

“Tabela 1: Comparação de tempos entre os robôs”. Fonte: BRITO, Robison C.; MADALOSSO, Emanoeli; GUIBES, Geovane A. O.. Seguidor de linha para LEGO® Mindstorms utilizando controle PID. Anais do Computer on the Beach, v. 0, n. 0, p. 310-319, 2014. p. 309, tab. 2.

No artigo [8] ocorre a implementação de dois controladores: o controlador PID e o controlador linear (controle tradicional), ambos aplicados no mesmo modelo teste e também submetidos sob o mesmo viés de tempo e cenários à prova. Os dados

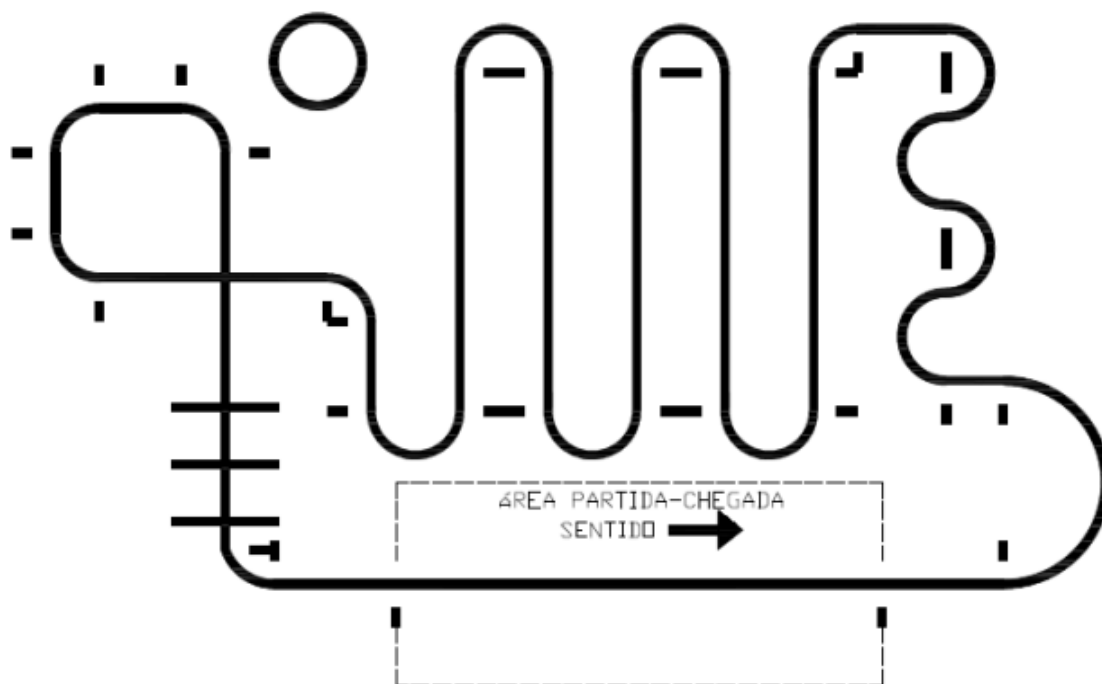
resultantes foram agrupados na tabela 2. A partir dos dados obtidos pelos autores é possível observar o apto desempenho do método de controle PID nos mais diversos cenários ao qual foi submetido em relação ao método de controle tradicional. Em geral, os resultados obtidos pelo método de controle PID alcançaram média de 95% de eficácia em todos os cenários, diferença significativa com relação ao método de controle tradicional, que obteve 89% de eficácia. Portanto, a partir de tal análise é passível de se pontuar que os dados obtidos tem intrínseca relação com os indicadores de performance propostos no atual trabalho, sendo desempenho em curvas e adaptabilidade como principais expoentes.

Nome do Teste	Aproveitamento do Seguidor Linear	Aproveitamento do Seguidor Proporcional-Integrativo-Derivativo
Linhas retas	100%	100%
Passagem de GAP	98%	100%
Curvas suaves	97%	100%
Curvas de 90°/acentuadas isoladas	80%	90%
Curvas de 90°/acentuadas sequenciais	70%	85%

“Tabela 2: Exposição dos casos de teste”. Fonte: SANTOS, Gabriel Domingues; FONSECA, Gabriel Sabino. Análise comparativa de desempenho de controlador linear e controlador PID no desenvolvimento de robô diferencial de três apoios. In: Mostra Nacional de Robótica (MNR), 2014. p. 3, tab. 2.

No trabalho [9] ocorre uma comparação entre o método PID e o método ON/OFF (controle tradicional), ambos os métodos foram submetidos à mesma pista de testes, representada na figura 4. A partir desses testes, foi observado que o método de controle ON/OFF, com a velocidade baixa, apresentou alta oscilação e movimentos bruscos. Com a velocidade alta, o modelo em si não conseguia realizar as curvas, se desestabilizando e saindo da linha, por outro lado, foi observado que o método de controle PID, depois dos devidos ajustes em seus parâmetros (K_p , K_i e K_d), mostrou ser mais eficiente e eficaz que o outro controle, conseguindo concluir o precursor em um

tempo menor e com pequenas oscilações. Portanto, a partir das observações realizadas durante os testes é notória a relação dos dados obtidos e os indicadores de qualidade que compõem o escopo do presente trabalho, sendo a aplicabilidade claramente associada a citação, uma vez que ela foi submetida com base na plataforma Arduino. Assim como a correção de erros é devidamente elucidada ao observarmos a diferença de desempenho dos dois métodos de controle.



“Figura 4: Pista de testes”. Fonte: PEREIRA, Luan Marinho Morais; OLIVEIRA, Gabriel Sabino; BEZERRA, Pablo Henrique Ribeiro; SANTOS, Flávio Alves dos; ARAÚJO, Francisco Marcelino Almeida de. Robô de competição categoria seguidor de linha utilizando algoritmo PID e plataforma Arduino. In: Mostra Nacional de Robótica (MNR), 2014. p. 4 fig. 5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados da análise comparativa entre os algoritmos de controle tradicional e o controlador PID em veículos autônomos segue-faixas. A escolha do controlador PID foi baseada no objetivo de criar um robô capaz de percorrer um percurso no menor tempo possível, de forma estável e suscetível a circuitos variados, conforme exposto por Brito [7], Santos e Fonseca [8] e Pereira. et al [9] fica evidenciado que o controle PID oferece vantagens em relação ao controle tradicional

4.1 Desempenho do Controle Tradicional

O controle tradicional, que utiliza decisões binárias para corrigir o trajeto do veículo autônomo, é uma abordagem eficaz em cenários simples de seguimento de faixas, como abordado na tabela 2, esse método de controle obteve diferentes resultados quando submetido a diferentes cenários, sejam eles adversos ou amigáveis. Como por exemplo em curvas acentuadas de 90° o modelo tradicional obteve uma taxa de 80% de aproveitamento, sendo que quando essas mesmas curvas eram consecutivas, a taxa se reduzia para 70%. Ao contrário, em situações mais amigáveis, como em curvas mais suaves, ele obteve 97% de taxa de aproveitamento. Totalizando uma taxa média de 89% de aproveitamento em todos os cenários [8].

Portanto, é possível observar que o método tradicional tem por característica um controle posicional direto, que em determinados trechos acaba interferindo negativamente, pois determinados percursos requerem um controle mais suave. Essas limitações irão afetar a precisão, a capacidade de resposta e o tempo que o veículo leva para percorrer o percurso, o que, no contexto de uma competição, são características negativas.

4.2 Desempenho do Controlador PID

O PID, por ser um sistema de controle dinâmico, possui uma facilidade em se adaptar aos percursos, uma vez que não se baseia em regras pré estabelecidas, mas reage de forma precisa a mudanças no trajeto. Portanto, esse método de controle demonstrou uma capacidade notável de correção em curvas e desvios da trajetória, como abordado na Tabela 2, quando submetido a situações difíceis, como por exemplo uma curva acentuada de 90°, onde obteve 90% de taxa de aproveitamento. Como também obteve 85% de taxa de aproveitamento quando as mesmas curvas eram sequenciais. Além, é claro, quando as situações a qual foi submetido eram amigáveis, como por exemplo uma curva suave, obteve então notáveis 100% de aproveitamento. [8]

Isso significa que, o controlador PID calcula uma correção apropriada ao erro, que é gerado por conta das situações adversas citadas anteriormente, e isso resulta em uma resposta mais suave e precisa do veículo autônomo, tornando-o capaz de seguir curvas mais acentuadas com relativa facilidade e se locomover a velocidades mais elevadas.

4.3 Discussão comparativa de Aplicabilidade e Desempenho

A fim de poder analisar de forma mais assertiva, com base nos dados coletados e previamente apresentados, optou-se por utilizar alguns indicadores de performance, que por sua vez, foram escolhidos com base no contexto no qual se colocam os modelos seguidores de faixas: competições. Com isso, são considerados 1) Aplicabilidade, onde considera-se nível de complexidade e aplicação, dada a plataforma utilizada. 2) Correção de erros, onde se visualiza, nos diferentes trabalhos, o comportamento do modelo dados eventuais erros. 3) Desempenho em curvas, considerando performance e capacidade de execução 4) Adaptabilidade, onde é verificado o nível de adequação do modelo ao percurso e a estabilidade de resultados em diferentes tipos de percursos.

A correção de erros se mostra mais eficaz nos modelos que utilizam PID, mesmo considerando os piores cenários, é possível observar um consenso quanto a eficácia do modelo de correção com uso do PID. Dada suas características e capacidade de “antecipar ” um ajuste de correção (Derivada), e controle de uma correção proporcional, que gera uma resposta mais suave e, conseqüentemente, mais estável (Integral). Em contrapartida, o modelo tradicional acaba por utilizar correções bruscas e imprecisas em cenários mais rigorosos. Quando em curvas suaves, a diferença observada entre os algoritmos de controle são mais discretas se comparadas a curvas mais acentuadas, podendo indicar uma maior sensibilidade a angulação das curvas postas no percurso. Por consequência, o modelo demonstra maior adaptabilidade a diferentes tipos de percursos, uma vez que, dadas as características do algoritmo com PID, o modelo acaba por ter um comportamento mais adequado em diferentes tipos de percursos. O modelo tradicional linear mostrou-se de grande valia por seu baixo nível de complexidade e eficácia quando em ambientes mais específicos, todavia, dado, o contexto no qual foi sugerida a presente análise, de modo geral, o modelo que utiliza PID mostrasse mais eficaz quanto aos objetivos proposto por um protótipo autônomo seguidor de faixas dados os indicadores citados.

Além disso, o controlador PID oferece a flexibilidade de ajustar os parâmetros de controle, o que é crucial ao lidar com diferentes tipos de percursos e condições de pista. Isso torna o PID uma escolha sólida para atender aos objetivos de desenvolver um robô autônomo altamente eficaz no seguimento de faixas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa bibliográfica e a análise comparativa entre o controle tradicional e o controlador PID apontaram para a escolha do PID como a abordagem ideal para o

projeto de veículo autônomo segue-faixas. O controle tradicional, embora eficaz em cenários simples, demonstrou limitações em situações desafiadoras.

O PID, por sua capacidade de ajuste contínuo com base na diferença entre o valor desejado e o valor real, se destacou em termos de precisão, estabilidade e capacidade de correção. Sua flexibilidade na adaptação a diferentes tipos de percursos e condições de pista reforçou nossa confiança na escolha desse método de controle.

Com o PID como base, é possível assegurar um robô autônomo que será capaz de seguir percursos determinados de forma autônoma, precisa e constante, atendendo aos objetivos do projeto. A decisão de utilizar o PID é respaldada pelas suas vantagens evidentes em termos de desempenho e adaptabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RAFFO, Guilherme Vianna. **Algoritmos de controle preditivo para seguimento de trajetórias de veículos autônomos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [2] InstrumentacionyControl.NET. **Control ON/OFF o Todo/Nada**. In: InstrumentacionyControl.NET [S.l.], Disponível em: <https://instrumentacionycontrol.net/control-on-off-o-todo-nada/>. Acesso em: 14 out. 2023.
- [3] FRANKLIN, G. F.; J. DAVID POWELL; ABBAS EMAMI-NAEINI. **Sistemas de Controle para Engenharia** - 6ed. [s.l.] Bookman Editora, 2013.
- [4] ALVES, T. G.; PAIM, G. P.; LESTON, L. A.; ESPOSITO, M. "**ROBÔ SEGUIDOR DE LINHA COM CONTROLADOR PID**". XXII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS, [Pelotas - RS], 2023.
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS CORP.. **The PID Controller & Theory Explained**. Publicado em 30 de março de 2023. Disponível em: <https://www.ni.com/en/shop/labview/pid-theory-explained.html>. Acesso em: 14 out. 2023.
- [6] CRYSTAL INSTRUMENTS. **PID Control Theory**. In: Crystal Instruments [S.l.], 24 ago. 2020. Disponível em: <https://www.crystalinstruments.com/blog/2020/8/23/pid-control-theory>. Acesso em: 14 out. 2023.
- [7] BRITO, Robison C.; MADALOSSO, Emanoeli; GUIBES, Geovane A. O.. **Seguidor de linha para LEGO® Mindstorms utilizando controle PID**. Anais do Computer on the Beach, v. 0, n. 0, p. 310-319, 2014.
- [8] SANTOS, Gabriel Domingues; FONSECA, Gabriel Sabino. **Análise comparativa de desempenho de controlador linear e controlador PID no desenvolvimento de robô diferencial de três apoios**. In: Mostra Nacional de Robótica (MNR), 2014. Disponível em:

<http://sistemaolimpo.org/midias/uploads/a32c8a29d95399aa548908a2d99b4304.pdf>. Acesso em: 28 out. 2023.

[9] PEREIRA, Luan Marinho Moraes; OLIVEIRA, Gabriel Sabino; BEZERRA, Pablo Henrique Ribeiro; SANTOS, Flávio Alves dos; ARAÚJO, Francisco Marcelino Almeida de. **Robô de competição categoria seguidor de linha utilizando algoritmo PID e plataforma Arduino**. In: Mostra Nacional de Robótica (MNR), 2014. Disponível em: <http://sistemaolimpo.org/midias/uploads/230c61ca8833329f9ffc867a89566dcd.pdf>. Acesso em: 16 out. 2023.

[10] RICARDO, Rodolfo. **Visão computacional do carro autônomo aplicado ao carro segue faixa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Física) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Física, Maringá, 2022.

[11] ROCHA, Reinaldo Gomes da; MORAIS, Eder Firmino de; BENTO, João Alves. **ROBÔ MÓVEL AUTÔNOMO “SEGUE FAIXA”**. Disponível em: <http://45.4.96.19/bitstream/ae/1483/1/ROB%20M%20VEL%20AUT%20NO%20MO%20e2%80%9cSEGUE%20FAIXA%e2%80%9d.pdf>. Acesso em: 13 out. 2023.