



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

VINÍCIUS ALVES PEREIRA

**CONTROLE DIGITAL DE ROBÔ DE LOCOMOÇÃO DIFERENCIAL DA CATEGORIA  
VSSS**

Recife  
2025

VINÍCIUS ALVES PEREIRA

**CONTROLE DIGITAL DE ROBÔ DE LOCOMOÇÃO DIFERENCIAL DA  
CATEGORIA VSSS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro em Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Cavalcanti Neto

Recife  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Pereira, Vinícius Alves.

Controle Digital de Robôs de Locomoção Diferencial da Categoria VSSS /  
Vinícius Alves Pereira. - Recife, 2025.

66 p. : il., tab.

Orientador(a): Rafael Cavalcanti Neto

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e  
Automação - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Tração diferencial. 2. Robôs móveis. 3. Controle digital. 4. Categoria VSSS.  
5. Cinemática inversa. 6. Encoders. I. Neto, Rafael Cavalcanti. (Orientação). II.  
Título.

620 CDD (22.ed.)

VINÍCIUS ALVES PEREIRA

**CONTROLE DIGITAL DE ROBÔS DE LOCOMOÇÃO DIFERENCIAL DA  
CATEGORIA VSSS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovado em: 09/04/2025

**BANCAEXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rafael Cavalcanti Neto  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. MSc. Calebe Hermann de Oliveira  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. MSc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe por sempre meu porto seguro diante de adversidades, à minha irmã por representar um exemplo referência como pessoa, ao meu pai por me mostrar o que é importante na vida e à equipe Maracatronics por me proporcionar conhecimentos e habilidades novos que serão importantes na minha vida.

## RESUMO

A tração diferencial é um dos modelos de locomoção com rodas mais difundidos no mundo e, naturalmente, é um dos modelos de locomoção mais utilizados em robôs móveis. Este tipo de robô é bastante usado por poder realizar ações diversas em diferentes tipos de terreno dependendo da sua estrutura locomotora. Essa estrutura locomotora costuma utilizar rodas que atuam, comumente independentes entre si, o que se denomina como locomoção diferencial. Uma vez que a automação do movimento desses robôs é um tópico bastante abordado na literatura, é extremamente importante um estudo da locomoção diferencial das rodas desse tipo de robô. Nesse contexto, o presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo implementar um controlador digital para controlar a movimentação de um robô jogador de futebol da categoria VSSS (*Very Small Size Soccer*). Para esse propósito, elaboram-se as formulações de cinemática inversa e direta para estabelecimento das velocidades nas rodas e implementando o sensoriamento através de *encoders* para realimentar o sistema de controle. Os resultados do presente trabalho demonstram que, ao comandar um robô da categoria VSSS em malha aberta a se locomover em linha reta, ele comumente traça trajetórias curvilíneas. Isso ocorre por conta de seus motores normalmente apresentarem características dinâmicas diferentes. Por outro lado, os resultados experimentais e de simulação demonstraram que, ao projetar um controlador digital, em malha fechada, torna-se possível realizar efetivamente trajetórias retilíneas.

**Palavras-chave:** tração diferencial; robôs móveis; controle digital; categoria VSSS; cinemática inversa; encoders.

## ABSTRACT

Differential traction is one of the most widespread wheeled locomotion models around the world and, naturally, it is one of the locomotion models commonly used in mobile robots. This kind of robot is very used due to its various actions on different terrains depending of its locomotion structure. The locomotion structure is often composed of wheels, commonly independent form each other, which is known as differential locomotion. Since automation of mobile robots is always desired, it is extremely important to study the differential locomotion of this type of robot. In this context, the present final paper has the goal of develop a digital control to control the movement of a soccer player robot from the VSSS (*Very Small Size Soccer*) category. For this purpose, direct and inverse kinematic formulations are developed to establish wheels speed which are sensed through encoders to feedback the control system. The results from the present paper show that a robot from the VSSS category often does a curved trajectory when commanded, in open loop control, to do a straight trajectory. This may happen because the wheels engines normally have different dynamic particularities. On the other side, the experimental and simulated results show that, with a digital control implemented in closed loop control, it is possible to effectively do a straight trajectory.

**Keywords:** differential traction; mobile robots; digital control; VSSS category; inverse kinematic; encoders.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Países com maior número de robôs em operação na indústria. ....  | 14 |
| Figura 2 – Exemplos dos tipos de rodas usadas em robôs móveis: (a) Motora; (b) Orientável; (c) Omnidirecional. ....   | 16 |
| Figura 3 – Representação simplificada de um processo para estudos de engenharia de controle. ....   | 19 |
| Figura 4 – Representação de um sistema de controle em malha aberta. ....  | 20 |
| Figura 5 – Representação de um sistema de controle em malha fechada com realimentação negativa. ....  | 20 |
| Figura 6 – Exemplos de robôs de categoria VSSS. ....  | 23 |
| Figura 7 – Limite de encobrimento da bola pelos robôs. ....   | 23 |
| Figura 8 – Dimensões do campo da categoria VSSS com marcações. ....   | 24 |
| Figura 9 – Esquemático de uma partida de futebol de robôs da categoria VSSS. ....   | 25 |
| Figura 10 – Sistema de coordenadas global e do robô. ....   | 27 |
| Figura 11 – Esquema de análise de locomoção puramente linear. ....  | 28 |
| Figura 12 – Esquema de análise de locomoção puramente angular. ....   | 29 |
| Figura 13 – Robô VSSS do projeto de extensão Maracatronics. ....  | 31 |
| Figura 14 – Motores CC N20. ....  | 33 |
| Figura 15 – Montagem utilizada com tacômetro digital na leitura das rodas. ....   | 34 |
| Figura 16 – Comparação entre as medições de <i>encoder</i> e tacômetro digital na roda esquerda. ....   | 38 |
| Figura 17 – Comparação entre as medições do <i>encoder</i> nas situações com e sem carga. ....  | 39 |
| Figura 18 – Posicionamento do robô (contornado por um círculo amarelo) nos testes experimentais. ....   | 41 |
| Figura 19 – Curvas de velocidade do robô em PWM de valor 65 operando em malha aberta. ....  | 41 |
| Figura 20 – Curvas de velocidade do robô em PWM de valor 255 operando em malha aberta. ....   | 42 |
| Figura 21 – Comparação das amostras em malha aberta em PWM de valor 65 com a saída estimada da roda esquerda (à esquerda) e da roda direita (à direita). .... | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 22 – Comparação das amostras em malha aberta em PWM de valor 255 com a saída estimada da roda esquerda (à esquerda) e da roda direita (à direita).....   | 43 |
| Figura 23 – Compilado das plantas das rodas esquerda e direita nos valores de referência de PWM.....  | 43 |
| Figura 24 – Modelo de sistema em malha fechada simplificado. ....   | 45 |
| Figura 25 – Modelo de sistema de duas rodas em malha fechada. ....  | 45 |
| Figura 26 – Subsistema de realimentação da roda esquerda. ....  | 46 |
| Figura 27 – Sistema de controle em malha fechada montado no <i>Matlab</i> .....   | 46 |
| Figura 28 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 65.....   | 50 |
| Figura 29 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 65.....  | 50 |
| Figura 30 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 190.....  | 51 |
| Figura 31 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 190.....   | 51 |
| Figura 32 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 65.       | 53 |
| Figura 33 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 190. .... | 53 |
| Figura 34 – Comparação entre a movimentação do robô operando em malha aberta (trajetória de cor branca) e em malha fechada (trajetória de cor verde).....       | 56 |
| Figura 35 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 75.....   | 60 |
| Figura 36 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 75.....  | 60 |
| Figura 37 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 85.....   | 61 |
| Figura 38 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 85.....  | 61 |
| Figura 39 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 100.....  | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 40 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 100.....   | 62 |
| Figura 41 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 130.....  | 63 |
| Figura 42 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 130.....   | 63 |
| Figura 43 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 75.           | 64 |
| Figura 44 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 85.           | 64 |
| Figura 45 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 100.<br>..... | 65 |
| Figura 46 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 130.<br>..... | 65 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Velocidades angulares na roda esquerda medidas e velocidade linear do robô estimada para os diferentes valores de referência de PWM. .... | 40 |
| Tabela 2 – Requisitos de controle estabelecidos pela equipe Maracatronics. ....  | 44 |
| Tabela 3 – Parâmetros de controle medidos nos resultados experimentais para cada valor de referência de PWM. ....                                    | 54 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |  |
|------|--|
| CTG  | Centro de Tecnologias e Geociências        |
| GR   | <i>Gear Ratio</i> (Relação de engrenagens) |
| PPR  | Pulsos Por Revolução                       |
| TCC  | Trabalho de Conclusão de Curso             |
| VSSS | <i>Very Small Size Soccer</i>              |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |   |
|-----------------|---|
| $O$             | Origem do centro cartesiano global                  |
| $X$             | Eixo das abscissas no eixo cartesiano global        |
| $Y$             | Eixo das ordenadas no eixo cartesiano global        |
| $R$             | Origem do centro cartesiano do robô                 |
| $X_R$           | Eixo das abscissas no eixo cartesiano robô          |
| $Y_R$           | Eixo das ordenadas no eixo cartesiano do robô       |
| $\theta$        | Ângulo entre a abscissa do robô e a abscissa global |
| $V_X$           | Velocidade linear do robô                           |
| $\omega_\theta$ | Velocidade angular do robô                          |
| $M_V$           | Média entre as velocidades lineares das rodas       |
| $\Delta V$      | Diferença entre as velocidades lineares das rodas   |
| $V_{RW}$        | Velocidade linear da roda direita                   |
| $V_{LW}$        | Velocidade linear da roda esquerda                  |
| $\omega_{RW}$   | Velocidade angular da roda direita                  |
| $\omega_{LW}$   | Velocidade angular da roda esquerda                 |
| $L$             | Distância entre as rodas                            |
| $d$             | Diâmetro das rodas                                  |
| $p$             | Leitura de pulsos do encoder                        |
| $f_H$           | Frequência de resposta do hall                      |
| $T_M$           | Período de amostragem do microcontrolador           |
| $K$             | Ganho estático da planta do motor                   |
| $\tau$          | Constante de tempo da planta do motor               |
| $\omega_{per}$  | Velocidade angular em regime permanente             |
| $\omega_{in}$   | Velocidade de entrada para roda                     |
| $VP$            | Valor de pico                                       |

## SUMÁRIO

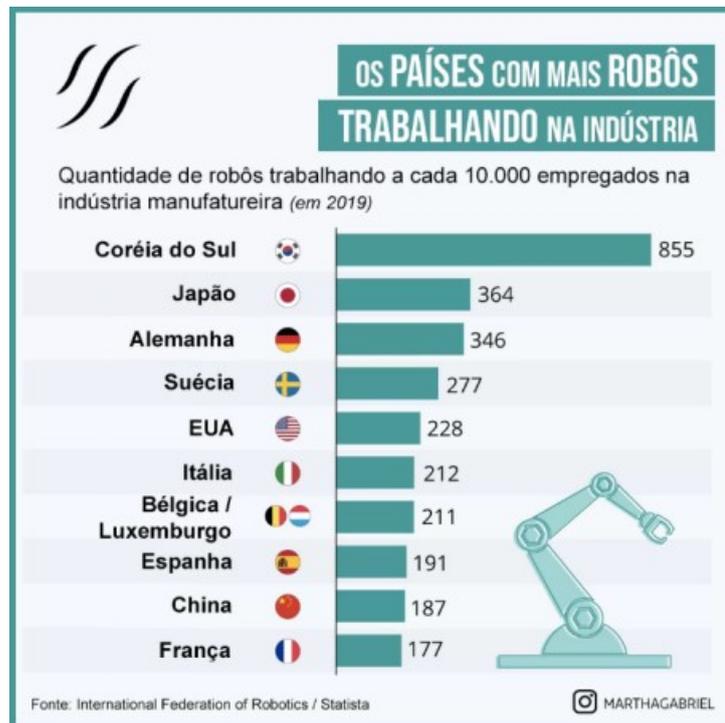
|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>14</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS .....  | 17        |
| 1.2      | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....   | 17        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>   | <b>19</b> |
| 2.1      | DEFINIÇÕES DE ENGENHARIA DE CONTROLE .....   | 19        |
| 2.2      | ROBÔ DA CATEGORIA VSSS.....  | 22        |
| 2.2.1    | Competição da Categoria VSSS .....   | 24        |
| 2.3      | CONTROLE DE LOCOMOÇÃO DIFERENCIAL.....   | 25        |
| 2.3.1    | Controle de Locomoção Diferencial Aplicado ao VSSS.....  | 27        |
| <b>3</b> | <b>CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DE CONTROLE.....</b>  | <b>31</b> |
| 3.1      | APRESENTAÇÃO DO ROBÔ VSSS.....   | 31        |
| 3.2      | ATUADORES E SENSORIAMENTO.....   | 32        |
| 3.3      | METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DAS PLANTAS .....   | 34        |
| 3.4      | METODOLOGIA PARA PROJETO DOS CONTROLADORES .....   | 36        |
| <b>4</b> | <b>PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL DE LOCOMOÇÃO<br/>DIFERENCIAL DE ROBÔ DA CATEGORIA VSSS .....</b> | <b>37</b> |
| 4.1      | VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO.....   | 37        |
| 4.2      | MODELAGEM EM CAIXA-CINZA DA PLANTA DO SISTEMA .....  | 38        |
| 4.2.1    | Análise Preliminar.....  | 38        |
| 4.2.2    | Testes em Malha Aberta.....  | 40        |
| 4.2.3    | Identificação da Planta .....  | 43        |
| 4.3      | ENGENHARIA DE REQUISITOS .....   | 44        |
| 4.4      | PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE .....   | 44        |
| 4.4.1    | Definição da Estrutura de Controle.....  | 44        |
| 4.4.2    | Projeto dos Controladores .....  | 47        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS .....</b>  | <b>49</b> |
| 5.1      | RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....  | 49        |
| 5.2      | RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....   | 52        |
| 5.3      | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....  | 54        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....</b>  | <b>57</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>58</b> |
|          | <b>APÊNDICES.....</b>  | <b>60</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

É inegável que um dos temas mais atuais no campo da tecnologia é a robótica, cujo objeto de estudo são robôs. Derivado da palavra tcheca que significa “escravos”, os robôs são definidos como construtos capazes de receber informações do ambiente ao seu redor e, baseado nessas informações, realiza ações de forma autônoma para cumprir um determinado objetivo (Matatić, 2014). Por outro lado, de acordo com a ISSO 8373 (ISO 8373, 2021), um robô é um mecanismo atuador programável com capacidade de realizar tarefas específicas baseadas em seu estado atual ou em sensoriamento, sendo bastante utilizado em diversos setores da sociedade moderna.

No contexto da robótica, o setor industrial destaca-se como um dos mais promissores no uso de robôs para a realização de diversas atividades, como se observa na Figura 1. Isso se deve à capacidade dos robôs de melhorar a produtividade, aumentar a qualidade dos produtos e reduzir a exposição humana a atividades de risco (Frasca & Bruno, 2021).

Figura 1 – Países com maior número de robôs em operação na indústria.



Fonte: (Neto, Alves, Santos, & Bruno, 2023).

No setor industrial, os robôs utilizados são, majoritariamente, estáticos, com suas bases fixadas ao chão, enquanto os objetos com os quais interagirão são levados até ele para a realização de diversas atividades, tais como: montagem, soldagem e pintura (Frasca & Bruno, 2021). Por outro lado, fora do ambiente industrial, muitas atividades demandam que os robôs interajam com objetos que não se deslocam até eles de forma espontânea, exigindo que os robôs se locomovam até os objetos. Esses robôs são, portanto, denominados robôs móveis.

Robôs móveis possuem um potencial de aplicações mais amplo do que os robôs estáticos (de base fixa), pois podem operar em diferentes ambientes, como no ar, na terra e na água, realizando atividades de transporte, monitoramento, serviços de entrega, entre outros (Abreu, 2023). No ambiente urbano, a locomoção terrestre é a mais comum, devido a perceptível ausência de corpos d'água e aos vários obstáculos que limitam o movimento aéreo.

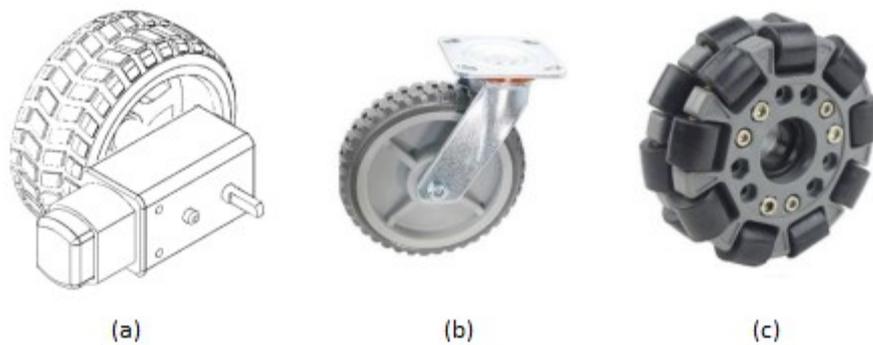
A locomoção de robôs terrestres é comumente feita por meio de rodas, esteiras ou pernas. As pernas, que são estruturas de locomoção geralmente inspiradas em formas biológicas, sejam humanas (como nos robôs humanoides) ou não, destacam-se por sua capacidade de lidar com terrenos irregulares. Contudo, essas estruturas de locomoção apresentam maior complexidade em termos de implementação e fabricação, o que resulta em custos mais elevados (Abreu, 2023).

Como alternativa às pernas, rodas e esteiras são as formas mais comuns de locomoção terrestre. Enquanto as rodas se apresentam como soluções financeiramente mais atrativas e de menor complexidade de implementação, as esteiras oferecem maior estabilidade e reduzem a chance de atolamento do robô em terrenos desafiadores (Abreu, 2023). Por esse motivo, o uso de rodas convencionais é o mais frequente, exceto em terreno de difícil acesso.

As rodas de um robô ainda podem ser classificadas em motoras (convencionais), orientáveis ou omnidirecionais. Rodas motoras permitem um movimento de giro nos sentidos horário e anti-horário, sendo responsáveis pela propulsão do robô. Rodas orientáveis auxiliam na estabilidade e no suporte estrutural do robô. Por fim, rodas omnidirecionais possibilitam movimento em qualquer direção, conferindo maior flexibilidade de locomoção. Nesse contexto, o desempenho de um sistema de locomoção feito por rodas depende dos tipos de

rodas utilizadas e de sua configuração. A Figura 2 apresenta exemplos dos três tipos de rodas de rodas descritas acima.

Figura 2 – Exemplos dos tipos de rodas usadas em robôs móveis: (a) Motora; (b) Orientável; (c) Omnidirecional.



Fonte: (Goulão, 2022).

A depender dos tipos de rodas utilizadas, um robô pode apresentar um sistema de locomoção omnidirecional ou diferencial. Sistemas de locomoção omnidirecionais utilizam, no mínimo, três rodas omnidirecionais dispostas radialmente no robô, permitindo que ele se mova em qualquer direção, embora a complexidade e sejam elevados. Por outro lado, sistemas de locomoção diferenciais requerem, no mínimo, duas rodas motoras e podem incluir algumas rodas orientáveis adicionais, e permitem movimentos de translação linear em uma única direção (frente e trás) e rotação em torno do próprio eixo (Goulão, 2022).

O sistema de locomoção diferencial é amplamente empregado no setor de transportes terrestres e, conseqüentemente, também se destaca como a opção mais viável para robôs. Diversas aplicações e estudos têm sido realizados com robôs de locomoção diferencial, incluindo trabalhos recentes, tais como (Santos, Silva, Soares, & Fung, 2022), (Barros & Lima, 2021) e (Nunes, 2023), evidenciando a relevância desse tipo de locomoção.

Diante da relevância da locomoção diferencial no contexto da robótica terrestre e da constante evolução tecnológica associada a essa área, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de controle digital aplicado a robôs com locomoção diferencial, especificamente na categoria VSSS (*Very Small Size Soccer*). A

pesquisa aborda os desafios relacionados ao controle e à estabilidade dos robôs, apresentando soluções que visam otimizar sua operação em ambientes dinâmicos e competitivos. Assim, espera-se contribuir para o avanço das tecnologias de robótica móvel, destacando a importância de sistemas de controle eficazes e acessíveis para essa aplicação.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é desenvolver um sistema de controle digital para robôs com tração diferencial, aplicando-o a um robô jogador de futebol da categoria VSSS, visando otimizar sua movimentação e desempenho nas tarefas inerentes a esse tipo de aplicação.

Para atender o objetivo geral, são planejados os seguintes objetivos específicos:

1. Projetar e implementar um sistema de controle digital que possibilite ao robô realizar movimentos precisos e adequados ao ambiente de jogo;
2. Validar o desempenho do sistema de controle digital;
3. Utilizar a descrição e as regras das competições de futebol da categoria VSSS, conforme definidas por instituições organizadoras como a INATEL, para guiar o desenvolvimento e a avaliação do sistema.

## 1.2 Organização do Trabalho

Para organizar a leitura deste TCC, o presente trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2:** São abordados os principais conceitos e a fundamentação teórica necessária para a implementação do sistema de controle estudado neste trabalho;
- **Capítulo 3:** A metodologia utilizada para a estruturação do projeto é apresentada, definindo-se os procedimentos que caracterizam os elementos

que compõem o sistema de controle. Para tanto, um robô da categoria VSSS é adequadamente modelado matematicamente, e o controlador a ser utilizada é devidamente projetado;

- **Capítulo 4:** Através da metodologia, os elementos de controle são validados e utilizados para projetar o sistema de controle em malha fechada experimentalmente e de forma simulada.
- **Capítulo 5:** Com base no sistema descrito nos capítulos anteriores, é feita uma comparação entre os resultados experimentais e simulados obtidos para um sistema com controle em malha fechada e um sistema sem controlador;
- **Capítulo 6:** Por fim, é feita uma avaliação da implementação, além de uma descrição de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir deste estudo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo, são abordados os principais conceitos e a fundamentação teórica necessária para a implementação de um sistema de controle em um robô de locomoção diferencial. Além disso, também são apresentadas definições básicas sobre a categoria alvo de robô móvel deste trabalho.

### 2.1 Definições de Engenharia de Controle

De acordo com Nise (2012), um sistema de controle é definido como uma associação de subsistemas e processos (ou plantas) conectados de modo a produzir uma resposta desejada para algum tipo de sinal de entrada previamente especificado. Nesse contexto, ao utilizar diagramas de blocos, um processo é geralmente representado conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Representação simplificada de um processo para estudos de engenharia de controle.



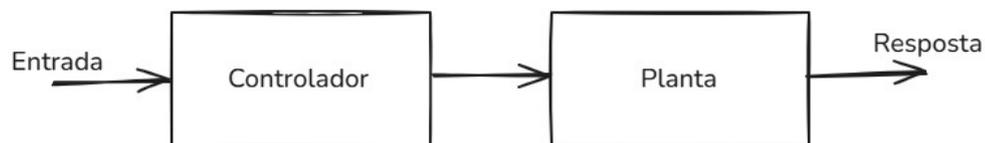
Fonte: Adaptado de (Nise, 2012).

Comumente, uma única planta não consegue rastrear sua entrada ou possui características dinâmicas que precisam ser alteradas. Para lidar com isso, o sistema necessita de um controlador que modifique o sinal de entrada, de forma a garantir que a planta produza a resposta desejada. Essa configuração é denominada malha aberta e está representada na Figura 4.

A configuração de controle em malha aberta possui limitações, uma vez que não é capaz de lidar com possíveis perturbações na entrada, o que compromete a resposta do sistema. A configuração de controle mais utilizada é a malha fechada, representada na Figura 5. Nessa configuração, a saída do sistema é analisada por um subsistema de realimentação, realizado por sensores, e essa saída é comparada com o sinal de entrada.

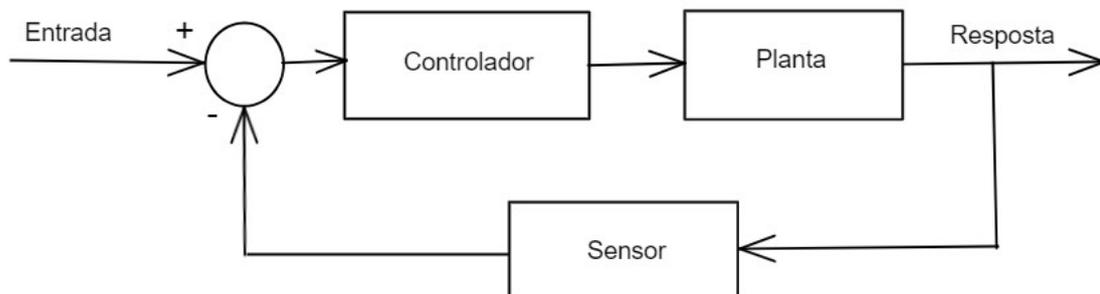
O controle em malha fechada pode operar com realimentação negativa (Figura 5), quando a entrada do controlador recebe a diferença entre os sinais de entrada e saída (denominado erro), ou de realimentação positiva, quando a entrada do controlador recebe a soma desses dois sinais. Entretanto, sistemas em malha fechada com realimentação positiva têm limitações relacionadas à instabilidade e, portanto, tem uso limitado. Por outro lado, os sistemas com realimentação negativa são amplamente empregados, pois permitem rastrear o sinal de entrada, compensar perturbações e possibilitar o controle remoto de operações (Nise, 2012).

Figura 4 – Representação de um sistema de controle em malha aberta.



Fonte: Adaptado de (Nise, 2012).

Figura 5 – Representação de um sistema de controle em malha fechada com realimentação negativa.



Fonte: Adaptado de (Nise, 2012).

Para a análise de um sistema por um projetista, o comportamento do sistema é traduzido em modelos matemáticos descritos por equações diferenciais no domínio do tempo ou funções de transferência no domínio da frequência. Sempre que possível, é preferível montar o diagrama de blocos utilizando funções de transferência, pois estas fornecem informações mais completas ao projetista, permitindo que ele ajuste os parâmetros do sistema e perceba as influências dessas mudanças de forma rápida (Nise, 2012).

Para modelar a planta de um sistema de controle, podem ser empregadas as seguintes abordagens (Neto, 2021):

- **Modelagem em caixa branca:** Nessa abordagem, há um grande conhecimento sobre os componentes e a construção do sistema, o que permite identificar tanto a estrutura da função de transferência da planta quanto seus parâmetros.
- **Modelagem em caixa cinza:** Nesta abordagem, há algum conhecimento sobre a construção do sistema, o que possibilita identificar a estrutura da função de transferência da planta, porém não seus parâmetros.
- **Modelagem em caixa preta:** Nesta abordagem, não há conhecimento sobre a construção do sistema, logo não se pode identificar a estrutura da função de transferência da planta através desta informação.

A planta de um sistema de controle é definida como a razão entre os sinais de saída e de entrada do processo que se quer controlar, conforme ilustrado na Figura 3. Esse conceito é utilizado para auxiliar na obtenção dos parâmetros da planta em sistemas de caixa cinza ou na obtenção da estrutura da planta, e conseqüentemente de seus parâmetros, em sistemas de caixa preta.

Uma vez que a função de transferência da planta está definida, o controlador é modelado para atender os requisitos de projeto, podendo ser implementado de diferentes formas. Uma forma bastante usada é a aplicação de um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que ajusta o comportamento do sistema por meio de ações proporcional, integral e derivativa, incorporando um polo e um zero no sistema. Este tipo de controlador é eficaz na melhoria da estabilidade e do desempenho do sistema.

Os parâmetros de um controlador PID podem ser facilmente simulados no *Matlab/Simulink*, além de serem simples de implementar de forma analógica ou digital.

## 2.2 Robô da Categoria VSSS

Os robôs da categoria VSSS são desenvolvidos para competições de futebol robótico, nas quais equipes de pequenos robôs autônomos competem em um ambiente controlado, seguindo regras específicas. Esses robôs são projetados para operar em dimensões reduzidas, exigindo precisão mecânica, eficiência eletrônica e algoritmos para controle e tomada de decisão. O objetivo principal dessa categoria é explorar soluções inovadoras em áreas como visão computacional e engenharia de sistemas embarcados, promovendo avanços tecnológicos e desafiando os limites do design e da programação robótica. A seguir, são apresentados os principais aspectos relacionados ao desenvolvimento e às características desses robôs.

De acordo com (INATEL, 2018), cada robô deve caber dentro de um cubo de 75mm de lado, podendo ter um “uniforme” desde que caiba dentro de um cubo de 80mm de lado. Os robôs podem conter estruturas periféricas como braços e pernas, desde que elas respeitem os limites de tamanho durante toda a partida.

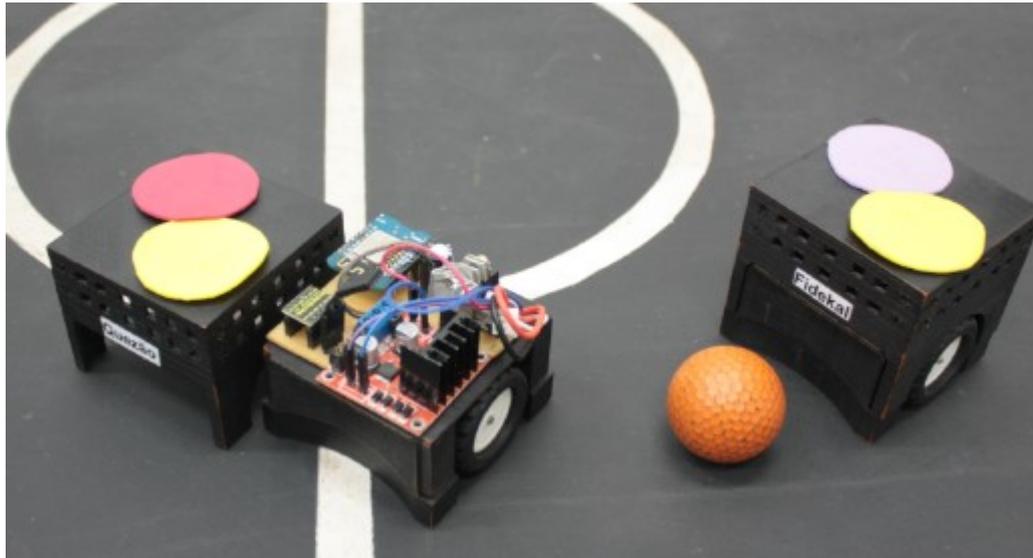
A parte superior dos robôs deve conter um código de cores formado por etiquetas coloridas, com restrição para as cores laranja (cor da bola), branco e cinza. O código de cores é composto por uma etiqueta da cor amarela ou azul, que identifica o time, e uma ou duas cores adicionais para identificar o número do jogador. As etiquetas podem ter qualquer formato e tamanho, porém a etiqueta do time deve ser capaz de conter um quadrado com 35mm de lado ou um círculo com 40mm de diâmetro.

Um robô da categoria VSSS é composto por, no mínimo, duas rodas convencionais iguais e opostas, localizadas em seu eixo de simetria, podendo ou não conter rodas orientáveis. Cada roda é acionada por um motor individual, geralmente de corrente contínua (CC), cujo torque é controlado por um circuito de potência (que funciona como interface) e determinado por um microcontrolador. Este último, por sua vez, regula o sinal PWM enviado a cada motor para ajustar a velocidade e o sentido de rotação da roda. Exemplos de robôs do VSSS são ilustrados na Figura 6.

Para melhorar o domínio da bola, os robôs podem ter as partes inferior de suas seções frontal e traseira chanfrados, resultando num encobrimento da bola pelo

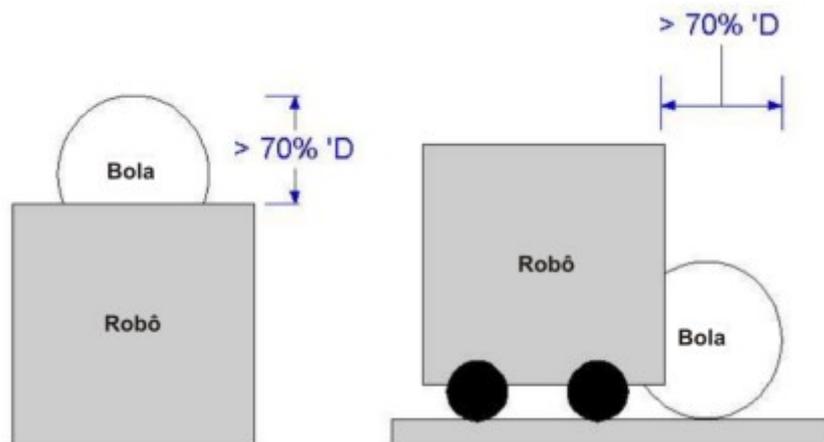
robô. A profundidade do chanframento é limitada para que o encobrimento permita que mais de 70% do diâmetro da bola permaneça visível para a câmera, evitando um súbito desaparecimento durante a partida (Figura 7).

Figura 6 – Exemplos de robôs de categoria VSSS.



Fonte: (UAI Soccer, 2021).

Figura 7 – Limite de encobrimento da bola pelos robôs.



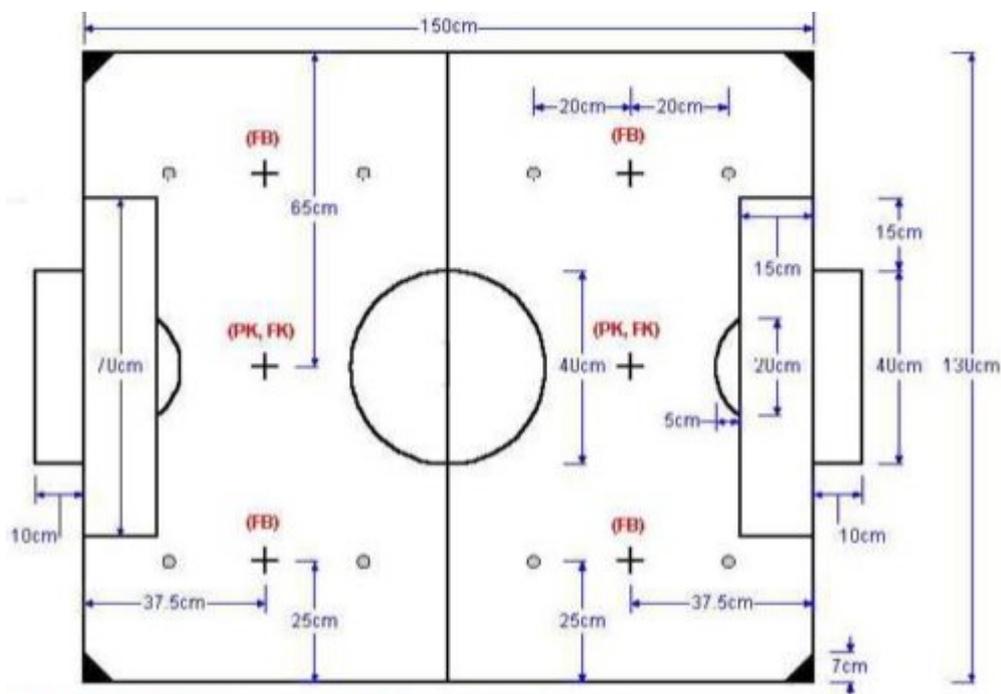
Fonte: (Pinto, 2017).

### 2.2.1 Competição da Categoria VSSS

No Brasil, a competição da categoria VSSS ocorre na IronCup patrocinada e sediada na Inatel. Nessa competição, dois times com até três robôs cada jogam futebol entre si, tendo o objetivo de marcar mais gols que seu adversário. Os robôs competem de forma autônoma, mantendo uma comunicação *wireless* com um computador responsável pelo processamento do time.

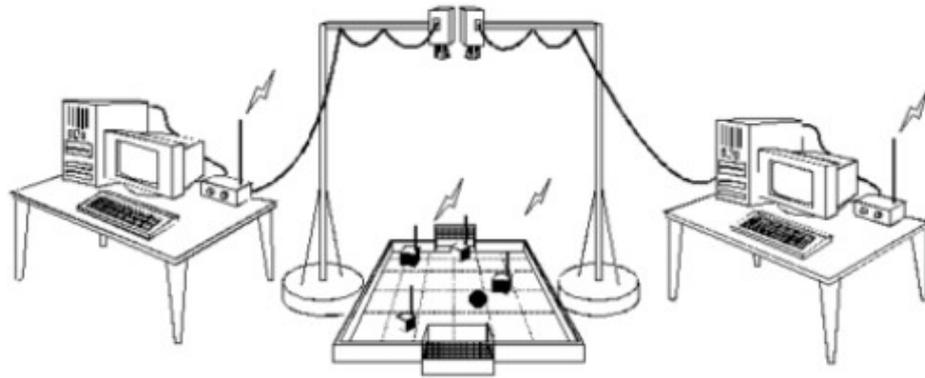
O campo das partidas possui dimensões de 1,5m x 1,2m com marcações específicas para faltas e penalidades durante o jogo (Figura 8). O computador obtém informações desse campo, incluindo a posição dos jogadores, por meio de uma câmera posicionada 2m acima do campo (Figura 9). A partir dessa câmera, o computador mapeia as extremidades do campo e monta um sistema de coordenadas no centro do campo, com isso, podendo localizar os robôs mapeados por seus códigos de cores. Dessa forma, o sistema é capaz de tomar decisões e de planejar as trajetórias dos robôs.

Figura 8 – Dimensões do campo da categoria VSSS com marcações.



Fonte: (Pinto, 2017).

Figura 9 – Esquemático de uma partida de futebol de robôs da categoria VSSS.



Fonte: (Pinto, 2017).

Cada partida é composta de dois tempos de 5 minutos com intervalo de 10 minutos entre os tempos. Adicionalmente, o capitão de cada equipe pode solicitar até dois tempos técnicos, durante os quais o jogo é interrompido por, no máximo, 2 minutos por interrupção. Nessas interrupções, os robôs podem receber manutenções ou até serem substituídos.

Outras interrupções de jogo podem ocorrer devido a ocorrência de gols ou de faltas sinalizadas pelo juiz. Sempre que houver uma interrupção, o tempo de partida deve ser pausado e os robôs devem permanecer imóveis. Ao fim das interrupções, os robôs devem ser posicionados pelo capitão da equipe ou se posicionarem autonomamente e, em seguida, esperar o reinício do jogo.

A competição é dividida em duas fases: a primeira fase da competição é uma fase de grupos, na qual os times são ranqueados de acordo com os resultados das partidas do seu grupo; e a segunda fase é denominada *double elimination*, que se assemelha ao modelo mata-mata, porém quando uma equipe perde pela primeira vez, ela é realocada para uma chave denominada *losers*. Os times da chave *losers* jogam com outros times da mesma chave e aqueles que perderem de novo são eliminados da competição (CBR, 2020).

### 2.3 Controle de Locomoção Diferencial

De acordo com Setti (2002), locomoção por tração diferencial envolve um sistema com rodas no qual, pelo menos duas delas, operam de forma independente.

Isso significa que cada roda pode girar com um torque diferente, possibilitando que o objeto realize movimentos lineares, rotacionais ou uma combinação de ambos.

Um exemplo prático é uma cadeira de rodas: uma estrutura composta de duas rodas orientáveis e duas rodas motoras independentes em que a força motriz de cada roda provém do esforço aplicado pelo respectivo braço do usuário (no caso de cadeiras manuais). O usuário pode aplicar esforços diferentes em cada roda e se locomover de forma linear, rotacional ou uma combinação das duas. Adicionalmente, existem estudos sobre a automatização de cadeiras de rodas movidas por motores, tais como (Lovatte & Lima, 2011) e (Milfont, 2022), que tornam este exemplo mais semelhante a um sistema de locomoção diferencial em robôs (Neto, 2020).

No contexto de um sistema de locomoção diferencial simples com duas rodas motoras e uma orientável, o comportamento real deste sistema quando comandado para se deslocar com velocidade linear constante e velocidade angular nula, em malha aberta, é seguir uma trajetória curvilínea. Isso ocorre porque as rodas motoras operam de forma independente, logo as funções de transferência que descrevem os motores de cada roda podem ser diferentes por conta de perdas, seja por sistema de engrenagens frouxas, peças pouco lubrificadas, perturbações, entre outros fatores. Com isso, o sistema acaba por não ter a resposta desejada, isto é, o sistema não atende aos requisitos estabelecidos pelo operador.

Para desenvolver um sistema de controle para uma estrutura de locomoção diferencial, deve-se:

1. **Mapear o sistema de locomoção:** Identificar como as rodas se posicionam em relação ao centro geométrico da estrutura locomotora e entre si;
2. **Relação entre as rodas:** Analisar como as rodas se comportam para realizar diferentes movimentos e estabelecer a relação entre suas velocidades para alcançar esses movimentos, ou, inversamente, determinar os movimentos a partir das velocidades;
3. **Determinar o sistema de sensoriamento:** Selecionar os sensores necessários para monitorar o estado do sistema e fornecer os dados essenciais para o controle;

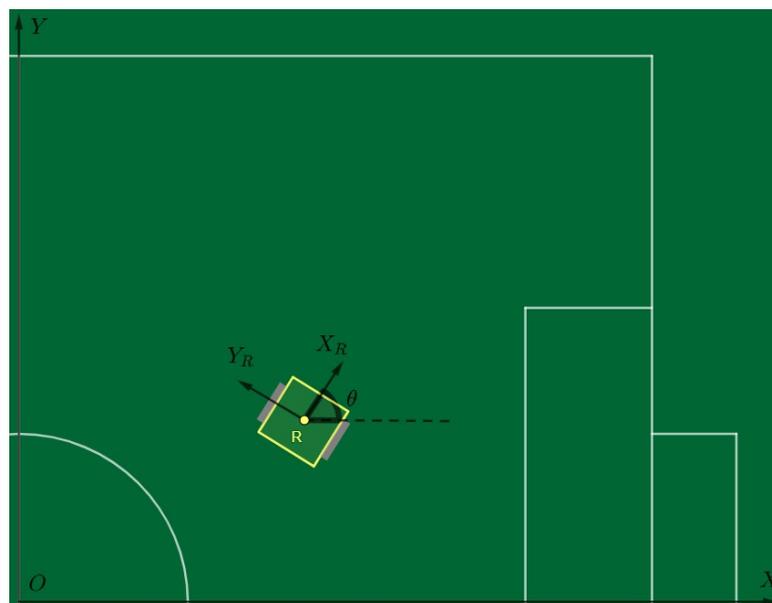
4. **Modelar plantas dos motores:** Criar representações matemáticas que descrevam o comportamento dinâmico dos motores;
5. **Modelar o controlador:** Desenvolver o sistema de controle que ajustará as entradas para os motores, garantindo que o comportamento desejado seja realizado.

### 2.3.1 Controle de Locomoção Diferencial Aplicado ao VSSS

A locomoção de um robô de tração diferencial deve ser iniciada com o mapeamento de seu sistema de locomoção. Para isso, é evidente que o robô necessita de um referencial para se localizar e, para tal, cria-se um sistema de coordenadas no seu ambiente de operação (o campo de futebol) e um sistema de coordenadas exclusivo do robô, assim como feito em (Siegwart, Nourbakhsh, & Scaramuzza, 2011).

A Figura 10 ilustra essa modelagem com um robô de VSSS, no qual o centro do sistema de coordenadas global está localizado no centro do campo (representado pela letra O) e o centro do sistema de coordenadas do robô está localizado no centro do robô (representado pela letra R).

Figura 10 – Sistema de coordenadas global e do robô.



Fonte: Adaptado de (Siegwart, Nourbakhsh, & Scaramuzza, 2011).

Quando um robô se locomove linearmente, seu vetor velocidade ganha as componentes  $(V_X, V_Y)$  orientadas no plano  $(X_R, Y_R)$ , mantendo sua orientação. Caso se locomova angularmente com velocidade  $\omega_\theta$ , sua orientação varia, ou seja, o ângulo  $\theta$  entre o eixo  $X$  e o eixo  $X_R$  muda. Como os robôs de VSSS utilizam rodas convencionais, não há locomoção no sentido perpendicular às rodas, logo, numa locomoção linear, apenas a componente  $V_X$  varia, enquanto  $V_Y$  é sempre nula.

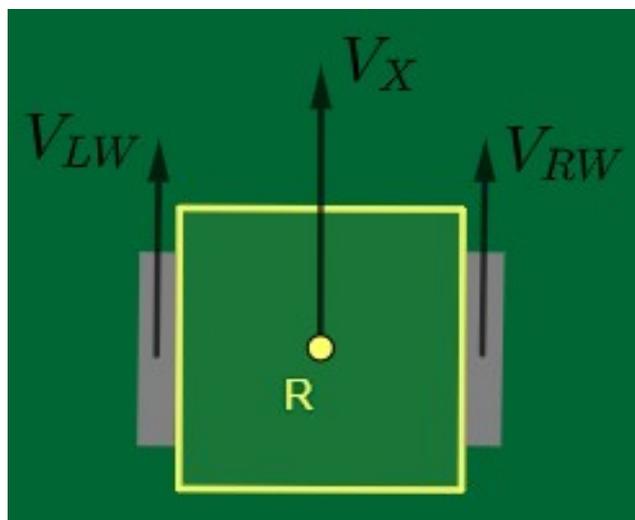
Em uma competição de futebol da categoria VSSS, os robôs são reconhecidos através de um *software* de visão computacional que estabelece o sistema de coordenadas global, conforme descrito na Seção 2.2.1. A partir desse sistema de visão e considerando que se estabelecem posições alvo para que os robôs se desloquem, são estabelecidas uma velocidade linear  $V_X$  e uma angular  $\omega_\theta$  para definir o movimento.

Para relacionar as velocidades linear  $V_X$  e angular  $\omega_\theta$  com as velocidades nas rodas direita  $V_{RW}$  e esquerda  $V_{LW}$ , basta analisar os casos padrões de locomoção puramente linear e locomoção puramente angular:

- No caso de locomoção puramente linear, representado na Figura 11, é fácil perceber que, para o robô se locomover linearmente com velocidade  $V_X$ , ambas as rodas devem se locomover em velocidade  $V_X$ , logo:

$$V_X = \frac{V_{RW} + V_{LW}}{2} = M_V. \quad (2.1)$$

Figura 11 – Esquema de análise de locomoção puramente linear.



Fonte: (Autor, 2025).

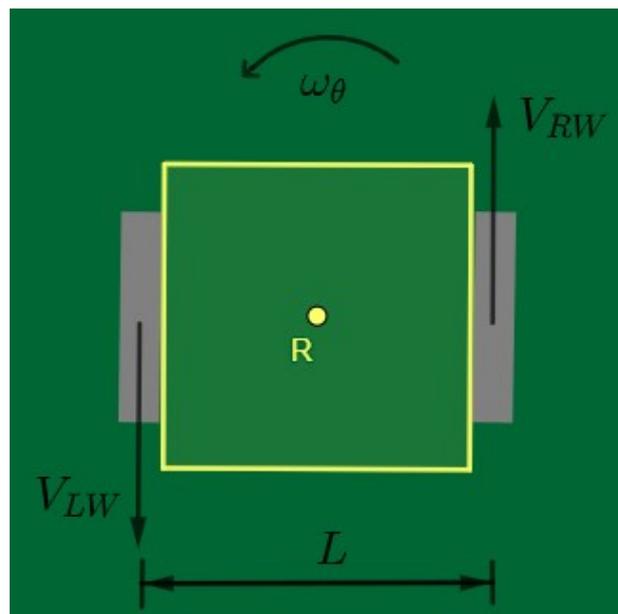
- No caso puramente angular, ilustrado na Figura 12, é fácil perceber que para o robô se deslocar angularmente em velocidade  $\omega_\theta$ , as rodas devem girar em sentidos opostos e com mesmo módulo. Sendo assim, os vetores velocidades das rodas são tangentes ao movimento circular associado, logo basta lembrar que a velocidade linear é dada pela multiplicação da velocidade angular pelo raio de rotação  $L/2$  e obter:

$$\omega_\theta \cdot \frac{L}{2} = V_{RW} \quad \text{e} \quad \omega_\theta \cdot \frac{L}{2} = -V_{LW}, \quad (2.2)$$

logo,

$$\omega_\theta \cdot L = V_{RW} - V_{LW} = \Delta V. \quad (2.3)$$

Figura 12 – Esquema de análise de locomoção puramente angular.



Fonte: (Autor, 2025).

Pelas Equações (2.1) e (2.3), pode-se dizer que a velocidade linear do robô é dada pela média das velocidades lineares das rodas e a velocidade angular é dada pela diferença das velocidades lineares das rodas, respectivamente. De acordo com Lopes (2002), esse resultado em que se determinam as velocidades linear e angular a partir das velocidades das rodas é denominado **cinemática direta**. Entretanto, usualmente, o objetivo é obter as velocidades das rodas a partir das velocidades

lineares e angulares, ou seja, a **cinemática inversa**. Reorganizando o sistema linear formado pelas Equações (2.1) e (2.2), obtém-se:

$$V_{RW} = \frac{2 \cdot V_X + L \cdot \omega_\theta}{2} \quad (2.4)$$

e

$$V_{LW} = \frac{2 \cdot V_X - L \cdot \omega_\theta}{2}. \quad (2.5)$$

Considerando que rodas são estruturas que giram, é comum que a leitura dos sensores seja relacionada a sua rotação. Logo é mais interessante trabalhar com a velocidade angular das rodas. Nesse caso, admitindo que o diâmetro das rodas é denominado  $d$ , as Equações (2.4) e (2.5) transformam-se em:

$$\omega_{RW} = \frac{2 \cdot V_X + L \cdot \omega_\theta}{d} \quad (2.6)$$

e

$$\omega_{LW} = \frac{2 \cdot V_X - L \cdot \omega_\theta}{d}. \quad (2.7)$$

A cinemática inversa, definida pelas Equações (2.6) e (2.7), é o equivalente algébrico do modelo matricial inverso ao proposto em (Siegwart, Nourbakhsh, & Scaramuzza, 2011). Assim, o mapeamento do sistema de locomoção é válido, pois permite determinar as velocidades das rodas a partir das velocidades linear e angular desejadas para o robô, garantindo a precisão e consistência dos movimentos desejados no sistema de locomoção diferencial.

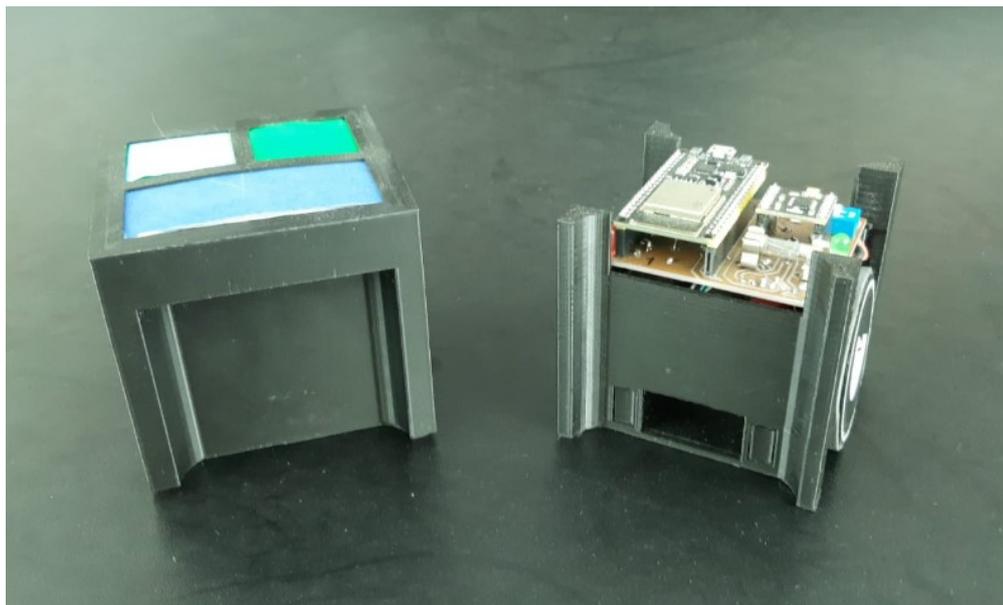
### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DE CONTROLE

Neste Capítulo, são apresentadas as características mecânicas do robô VSSS, seus motores e a metodologia para identificação das funções de transferência de um controle em malha fechada, ilustrados na Figura 5.

#### 3.1 Apresentação do Robô VSSS

Para a produção deste TCC, o projeto de extensão Maracatronics, sediado no Departamento de Engenharia Mecânica do CTG disponibilizou um robô da categoria VSSS desenvolvido para competições no ano de 2023 (Figura 13).

Figura 13 – Robô VSSS do projeto de extensão Maracatronics.



Fonte: (Autor, 2025).

Esse robô conta com duas rodas motoras centralizadas no eixo de simetria do robô, semelhante ao esquema apresentado na Figura 11. O robô não possui rodas orientáveis, o que faz com que as extremidades da base entrem em contato com o chão durante sua locomoção. No entanto, a base do robô está elevada a 0,5cm do solo, o que minimiza a perda de estabilidade durante a locomoção. A redução de

velocidade provocada pelo contato da base e a superfície lisa do campo é considerado irrelevante.

Como medida para auxiliar na estabilidade do robô, a bateria é posicionada abaixo do eixo das rodas, com o objetivo de abaixar o centro de massa do robô. Para permitir essa configuração, o diâmetro da roda deve ser suficientemente grande, sendo 52 mm o diâmetro definido pela equipe. Considerando que a distância entre as rodas é de 75 mm, as constantes das Equações (2.6) e (2.7) são determinadas.

### 3.2 Atuadores e Sensoriamento

No projeto de robôs da categoria VSSS, a equipe Maracatronics utiliza motores CC N20 (Figura 14) com *encoders* acoplados, que serão os sensores utilizados para as leituras de velocidade. Neste motor, é utilizado um *encoder* magnético que é composto por um disco magnetizado, que possuem um número determinado de polos em torno de sua circunferência, e sensores que captam as variações do campo magnético quando o disco gira. Esse tipo de *encoder* atua captando pulsos,  $p$ , toda vez que o campo magnético se maximiza nos sensores. Cada disco tem a capacidade de gerar uma quantidade de pulsos por revolução (PPR) que definem a resolução do sistema e é determinada pela quantidade de polos magnéticos no disco. No entanto, a relação de engrenagens do motor (GR, *gear ratio*) faz com que cada revolução do eixo do motor corresponda a apenas uma fração de uma revolução do eixo maior, ao qual a roda do robô está acoplada.

Com relação a operação do *encoder* utilizado, a atualização dos valores depende da frequência de resposta do sensor hall (interno ao *encoder*),  $f_H$ , e da taxa de amostragem do microcontrolador,  $T_M$ . Considerando uma leitura em RPM, a fórmula que permite a leitura pelos encoders é:

$$\omega_{RPM} = \frac{60 \cdot f_H \cdot p}{PPR \cdot GR \cdot T_M}. \quad (3.1)$$

Figura 14 – Motores CC N20.



Fonte: (Autor, 2025).

Embora a Equação (3.1) seja válida, não se pode confiar plenamente que os *encoders* a seguirão fielmente, pois pode haver falhas internas nesses dispositivos, resultando em leituras errôneas que comprometam o desempenho do controle em malha fechada. Para mitigar esse problema, a equipe Maracatronics também conta com um tacômetro digital modelo DT-2234C capaz de medir a rotação, em RPM, de superfícies girantes através de um sensor óptico.

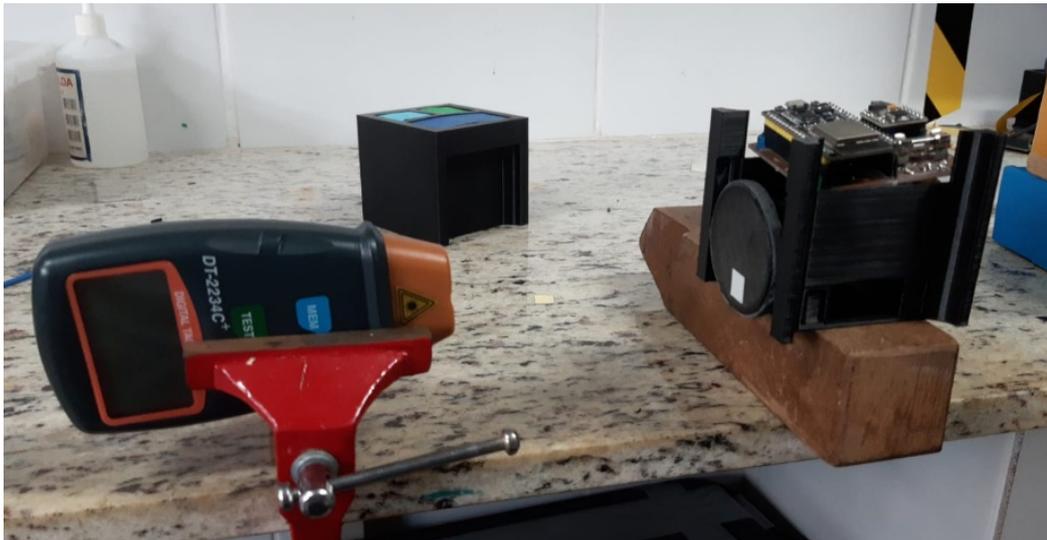
Sendo assim, o procedimento de validação de leitura dos *encoders* consiste em girar o motor em vazio, isto é, com o robô suspenso e sem carga, utilizando uma fita reflexiva colada na roda para leitura do tacômetro. Para reduzir erros humanos durante a medição, o tacômetro foi fixado em uma morsa, garantindo sua estabilidade durante o processo de medição, como se observa na Figura 15.

Por fim, realiza-se a rotação da roda para diferentes valores de PWM e registram-se os valores medidos tanto pelo tacômetro quanto pelos *encoders*. Os dados obtidos pelo *encoder* e podem levar a uma das seguintes conclusões:

- **Diferença suficientemente pequena entre as medições:** Caso a diferença entre os valores medidos seja suficientemente pequena, pode-se considerar que os *encoders* fornecem uma leitura muito próxima do valor real da velocidade da roda. Nesse caso, o bloco sensor da Figura 5 pode ser representado por um ganho unitário.

- **Diferença significativa entre as medições:** Caso a diferença entre os valores não for suficientemente pequena, define-se a função de transferência do sensor por meio de dados gráficos e/ou com auxílio de regressões polinomiais. Esse ajuste permite aproximar as leituras dos *encoders* ao valor real registrado pelo tacômetro.

Figura 15 – Montagem utilizada com tacômetro digital na leitura das rodas.



Fonte: (Autor, 2025).

### 3.3 Metodologia para Identificação das Plantas

Com as leituras de *encoders* validadas, a obtenção da planta dos motores ocorre de maneira similar, porém sem o uso do tacômetro. Nessa etapa, os motores são avaliados com carga, ou seja, com o robô efetivamente se locomovendo no chão.

Nessa aplicação, não é possível garantir que os motores apresentam um comportamento padronizado quando operando em carga. De fato, os motores podem ter comportamentos diferentes para os diferentes valores de PWM aplicados em suas entradas. Por essa razão, faz-se necessário registrar os valores de velocidade angular lidos pelos *encoders* nos diferentes valores de PWM aplicados aos motores do robô e avaliá-los para validar a planta.

A análise da planta é feita considerando uma abordagem de modelagem em caixa cinza, uma vez que se sabe que o comportamento de um motor CC pode ser aproximado de um sistema de primeira ordem (Machado & Maia, 2014). Com isso, a função de transferência que descreve o comportamento do motor é representada na forma:

$$F(s) = \frac{K}{\tau s + 1}, \quad (3.2)$$

em que  $K$  representa o ganho estático do motor e  $\tau$  representa a constante de tempo definida como o intervalo de tempo necessário para alcançar 63,21% do valor final, como descrito em Nise (2012). Considerando que a entrada é um sinal de PWM, o qual está associado a um valor desejado de velocidade angular para a roda, pode-se considerar que a entrada é um degrau. Portanto, a resposta desse sistema no domínio do tempo, para uma entrada em degrau, é dada por:

$$f(t) = \omega_{\text{per}} \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \quad (3.3)$$

em que  $\omega_{\text{per}}$  representa a velocidade da roda em regime permanente. Finalmente, considerando uma velocidade de referência  $\omega_{\text{in}}$  mapeada para um valor de PWM correspondente, o valor de  $K$  na Equação (3.2) é definido como:

$$K = \frac{\omega_{\text{per}}}{\omega_{\text{in}}}. \quad (3.4)$$

As medições coletadas pelos *encoders* foram reunidas e analisadas utilizando a função *curve\_fit* da biblioteca *matplotlib* em Python, com o objetivo de realizar um ajuste de curva. De posse dos dados, a Equação (3.3) pode ser utilizada como modelo de referência, permitindo a estimativa dos valores de  $\omega_{\text{per}}$  e  $\tau$ . Uma vez que a velocidade de entrada é ditada para se obter a saída, seu valor já é conhecido, logo a variável  $K$  também pode ser obtida e, com isso, a função de transferência da planta pode ser determinada.

### 3.4 Metodologia para Projeto dos Controladores

Com as funções de transferência da planta e do sensor definidas, o controlador deve ser desenvolvido para completar o sistema de controle em malha fechada. Para isso, deve-se determinar os requisitos de desempenho desejados para o sistema, tais como o erro em regime permanente, o tempo de acomodação e a máxima ultrapassagem percentual permitidos. Com esses dados, o controlador pode ser projetado no *Matlab/Simulink* utilizando o *PID Tuner* para atender aos requisitos de projeto.

Baseado nos dados obtidos para os ensaios com diferentes valores de PWM, duas situações podem ocorrer:

- **Plantas com características semelhantes:** As plantas podem apresentar comportamentos próximos ou seguem um padrão de variação, permitindo a definição de uma planta representativa.
- **Plantas com grande variação:** As plantas podem apresentar variações significativas a depender do valor do PWM ou não seguem um padrão de mudança, inviabilizando a definição de uma planta única ao sistema.

A depender da situação obtida, o projetista do sistema deve uma das duas abordagens descritas a seguir:

- Na primeira situação, o trabalho se resume a projetar um controlador que atenda aos requisitos com a planta representativa.
- Na segunda situação, entretanto, deve-se elaborar um controlador que satisfaça os requisitos para todas as plantas obtidas ou que satisfaça os requisitos para a maioria das plantas. Nesta situação, o projeto do controle pode focar nas plantas associadas a valores de PWM mais altos, que correspondem as velocidades mais frequentes durante uma partida de futebol de robôs da categoria VSSS. Caso não seja possível validar uma solução que atenda a todos os critérios, poderá ser necessário reavaliar e ajustar os requisitos estabelecidos.

## 4 PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL DE LOCOMOÇÃO DIFERENCIAL DE ROBÔ DA CATEGORIA VSSS

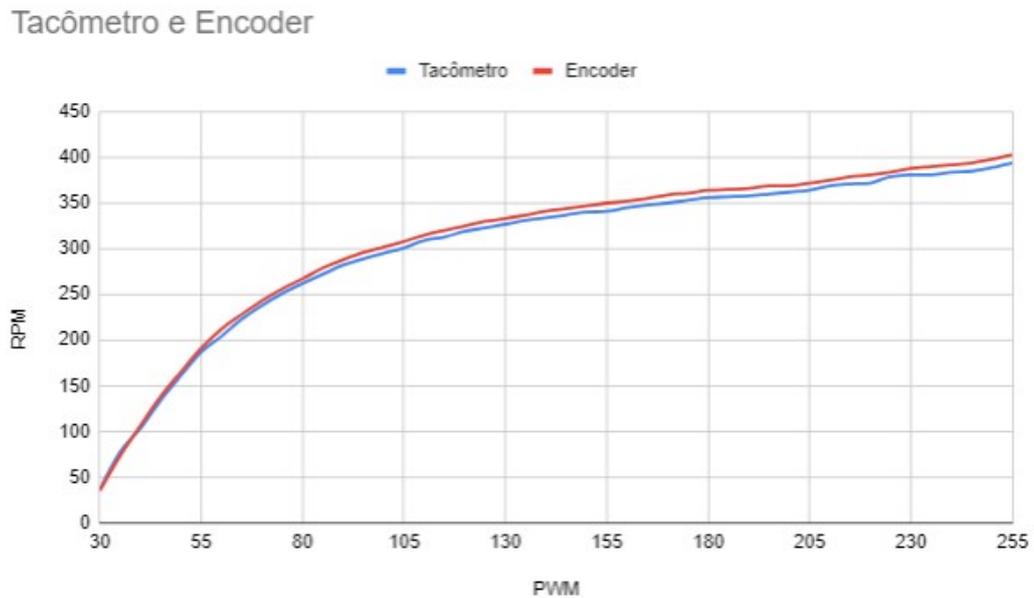
Este capítulo tem o objetivo de ilustrar as validações e decisões, tomadas com a metodologia elaborada anteriormente, para definir o procedimento da modelação e dos testes com o modelo previsto para o cumprimento do objetivo deste TCC: Elaborar um sistema de controle digital para controle das rodas do robô.

O modelo de controle utilizado será o descrito na Figura 5, em que as plantas do sistema e do sensor serão definidas neste capítulo, assim como discussão sobre os possíveis controladores.

### 4.1 Validação do sistema de sensoriamento

O sistema de sensoriamento envolve *encoders* de motores CC N20 que foram testados sem carga como descrito em (3.1). A velocidade da roda esquerda foi medida pelo tacômetro digital e pelo *encoder* de seu motor em PWMs com valores de 30 a 255, variando em passos de 5. A comparação entre as medições de ambos os sensores é ilustrada na Figura 16, sendo a medição do tacômetro considerada o valor real de velocidade da roda. Observa-se que a medição do *encoder* é levemente maior que a do tacômetro, entretanto o erro associado é suficientemente pequeno (cerca de 5%), de modo que se pode considerar que a medição do *encoder* corresponde à velocidade real da roda do robô. Sendo assim, a planta do sensor pode ser representada como um ganho unitário. Os motores utilizados nesse robô não possuem uma qualidade boa o suficiente para manter sua integridade mecânica por tanto tempo e, por isso, podem queimar após uma quantidade indeterminada de usos. Considerando as possíveis trocas de motores ao longo desta pesquisa, o resultado deste teste é inferido para todos os outros motores.

Figura 16 – Comparação entre as medições de *encoder* e tacômetro digital na roda esquerda.



Fonte: (Autor, 2025).

## 4.2 Modelagem em Caixa-Cinza da Planta do Sistema

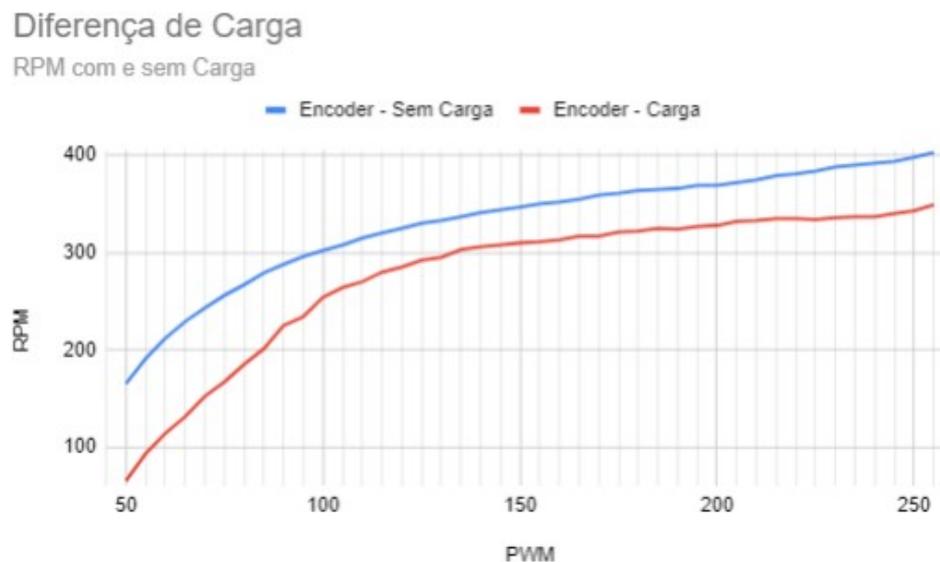
Sabe-se que a planta dos motores dos robôs é descrita por um sistema de primeira ordem, definido pela Equação (3.2). Utilizando a metodologia descrita na Seção 3.3, a modelagem em caixa-cinza é feita através de um teste em malha aberta em que o robô realiza uma locomoção puramente linear. O mapeamento das velocidades lidas pelos *encoders* no decorrer do tempo será usado para montar a curva de resposta do sistema, definido pela Equação (3.3), e os parâmetros desse sistema podem ser definidos através de uma interpolação em *Python*. Com isso, pode-se identificar a planta do sistema.

### 4.2.1 Análise Preliminar

As curvas obtidas na Figura 16 mostram uma característica interessante: A taxa de aumento dos valores de PWM não provoca a mesma taxa de aumento na velocidade em todas as medições, e isso implica que o motor envolvido tem comportamento não linear. Isso significa que um controlador fixo pode oferecer características adversas dependendo da faixa de velocidade em que o motor opera.

Sendo assim, avalia-se um novo teste de medição de *encoders*, desta vez colocando os robôs no chão (com carga), operando numa faixa de valores de PWM próxima da anterior. Os valores de *encoders* com carga e sem carga são comparados na Figura 17 em que também se observa o comportamento não linear do motor. Para a situação com carga, nenhum motor respondeu a um valor de PWM inferior a 50, logo a faixa inferior desse valor PWM será considerada a zona morta de comando. Esse comportamento era esperado, uma vez que as rodas passaram a carregar o peso do robô, então o torque gerado pelos motores deve compensar as perdas por atrito e peso.

Figura 17 – Comparação entre as medições do *encoder* nas situações com e sem carga.



Fonte: (Autor, 2025).

Uma vez que o motor não é linear, são criadas plantas de sistema para diferentes valores de PWM que representem valores aproximadamente equidistantes de velocidade nas medições. Os valores de referência de PWM de 255, 190, 130, 100, 85, 75 e 65 foram os escolhidos.

Deve-se lembrar que nesta aplicação utiliza-se a cinemática inversa para definição da velocidade das rodas. Utilizando as Equações (2.6) e (2.7), a velocidade linear necessária para se alcançar as velocidades nas rodas pode ser deduzida, uma vez que se sabe o diâmetro das rodas e que o movimento angular

não é desejado. As medições de velocidade nas rodas e a velocidade linear do robô estimada para essas medições nos diferentes valores de PWM estão resumidos na Tabela 1. O sistema de controle deverá atender aos requisitos de projeto na maioria dessas plantas, senão todas.

Tabela 1 – Velocidades angulares na roda esquerda medidas e velocidade linear do robô estimada para os diferentes valores de referência de PWM.

| Valor de PWM | Velocidades nas rodas (rad/s) | Velocidade linear (m/s) |
|--------------|-------------------------------|-------------------------|
| 65           | 13.718                        | 0.357                   |
| 75           | 17.488                        | 0.455                   |
| 85           | 21.049                        | 0.547                   |
| 100          | 26.599                        | 0.692                   |
| 130          | 30.892                        | 0.803                   |
| 190          | 33.929                        | 0.882                   |
| 255          | 36.547                        | 0.950                   |

Fonte: (Autor, 2025).

#### 4.2.2 Testes em Malha Aberta

Nos testes em malha aberta, um robô é posicionado no centro do gol (conforme ilustrado na Figura 18) e comandado para se locomover com o mesmo valor de PWM em ambas as rodas. As velocidade das mesmas serão medidas por seus respectivos *encoders* e enviadas como informação de *feedback* pela rede. Nesse teste, a zona morta associada aos motores usados vai até o PWM com valor de 65.

As Figuras 19 e 20 ilustram as curvas de velocidade de ambas as rodas do robô em PWMs com valor de 65 (velocidade mais baixa) e de 255 (velocidade mais alta), respectivamente. Por essas imagens, observa-se que as rodas apresentam velocidades distintas, resultando em alguma rotação. Essa diferença costuma ser mais bem observada em velocidades mais baixas, ou seja, em velocidades mais baixas, observa-se uma curva mais acentuada quando o robô é comandado a seguir uma trajetória puramente linear em malha aberta.

Figura 18 – Posicionamento do robô (contornado por um círculo amarelo) nos testes experimentais.



Fonte: (Autor, 2025).

Figura 19 – Curvas de velocidade do robô em PWM de valor 65 operando em malha aberta.

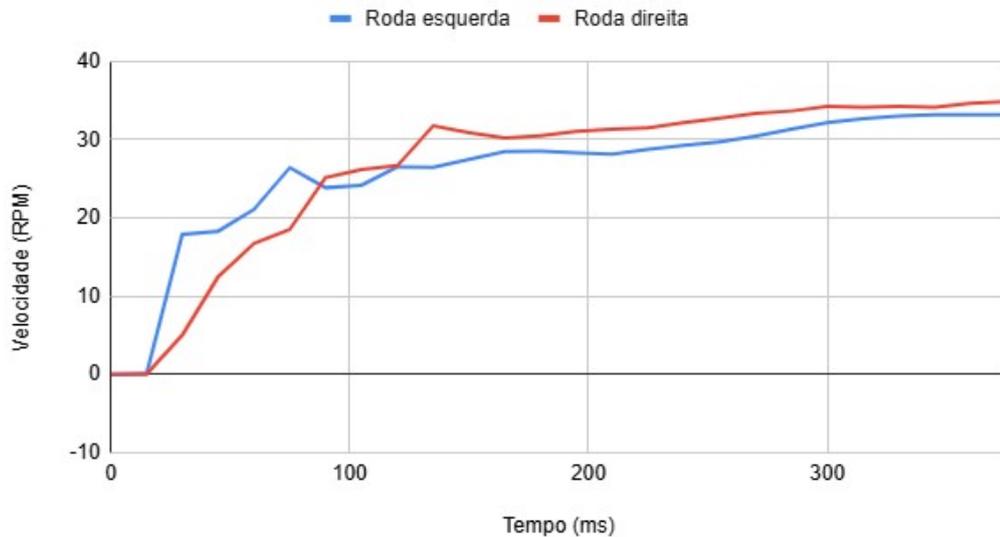
### Velocidades das rodas no tempo



Fonte: (Autor, 2025).

Figura 20 – Curvas de velocidade do robô em PWM de valor 255 operando em malha aberta.

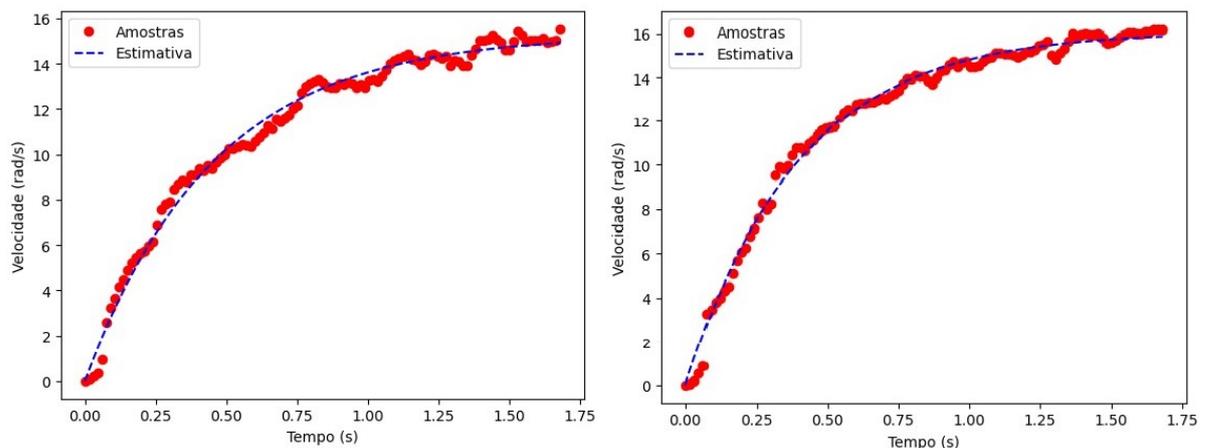
### Velocidades das rodas no tempo



Fonte: (Autor, 2025).

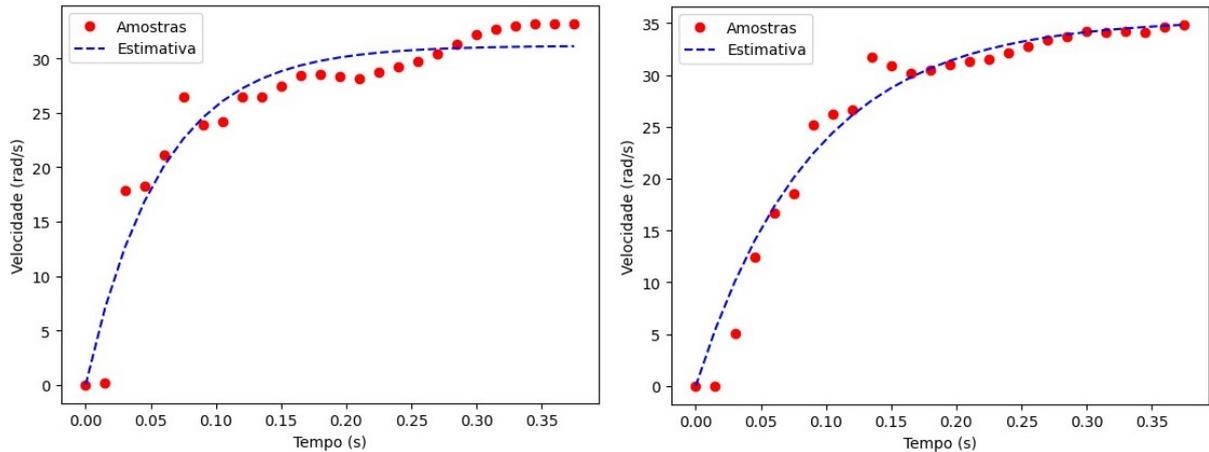
Uma interpolação é feita com as amostras dessas curvas de velocidade para estimar a equação característica desta, considerando um sistema de primeira ordem. A comparação entre as amostras e a curva característica são observadas nas Figuras 21 e 22 para os PWMs de valores 65 e 255, respectivamente. Esse teste foi realizado novamente com os outros valores de referência de PWM, com as características do movimento do robô exibidos para cada valor de PWM na *playlist*: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLqvvCgsJkCcG3Ygw4Cz3Ek16DfRvMcXwb>.

Figura 21 – Comparação das amostras em malha aberta em PWM de valor 65 com a saída estimada da roda esquerda (à esquerda) e da roda direita (à direita).



Fonte: (Autor, 2025).

Figura 22 – Comparação das amostras em malha aberta em PWM de valor 255 com a saída estimada da roda esquerda (à esquerda) e da roda direita (à direita).

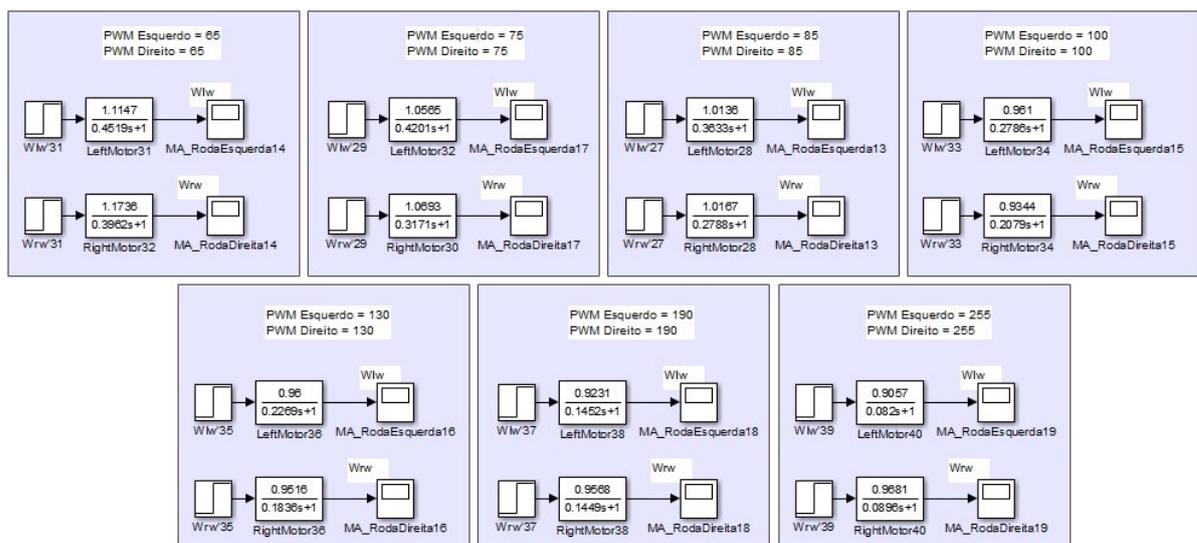


Fonte: (Autor, 2025).

### 4.2.3 Identificação da Planta

Através das curvas características de cada roda, obtidas para os valores de referência de PWM, é possível obter o ganho estático e a constante de tempo necessários para a identificação das plantas dos motores em cada situação. Essas plantas foram simuladas no *Simulink/Matlab* (Figura 23) para replicar o comportamento das curvas características estimadas.

Figura 23 – Compilado das plantas das rodas esquerda e direita nos valores de referência de PWM.



Fonte: (Autor, 2025).

### 4.3 Engenharia de Requisitos

A competição do VSSS não estabelece limites de velocidade máxima, entretanto a equipe Maracatronics tem parâmetros do que ela considera que um robô competitivo deveria ter e, sendo assim, esses parâmetros podem ser utilizados para definir os requisitos do sistema. A Tabela 2 engloba a tolerância dos parâmetros de controle definidos pela equipe.

Tabela 2 – Requisitos de controle estabelecidos pela equipe Maracatronics.

| Parâmetro               | Tolerância   |
|-------------------------|--------------|
| Erro (%)                | 10%          |
| Tempo de Acomodação (s) | ¼ de segundo |

Fonte: (Autor, 2025).

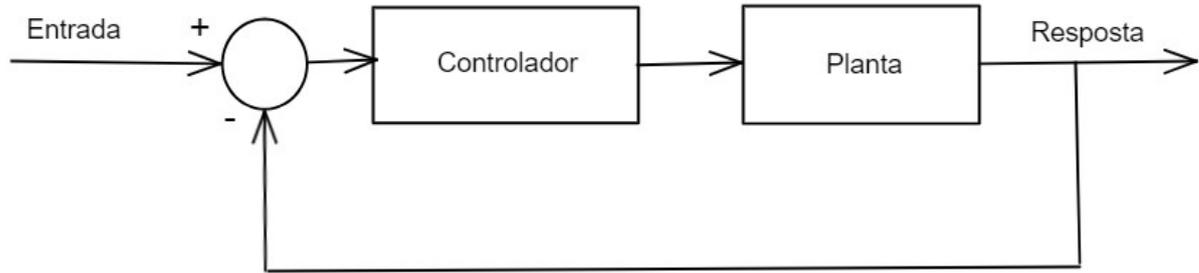
### 4.4 Projeto de Sistema de Controle

Uma vez que as plantas dos motores foram identificadas e os requisitos do sistema foram definidos, a etapa final da elaboração do sistema de controle envolve fechar a malha com uma realimentação negativa e, em seguida, definir o controlador que melhor atenderá aos requisitos de projeto.

#### 4.4.1 Definição da Estrutura de Controle

Considerando o modelo de controle em malha fechada da Figura 5 e as conclusões sobre o sistema de sensoriamento, um modelo resultante seria o da Figura 24. Entretanto, como meio de reduzir a diferença existente entre as plantas das rodas esquerda e direita, o sistema de controle de uma roda deve levar em consideração a resposta da outra roda também.

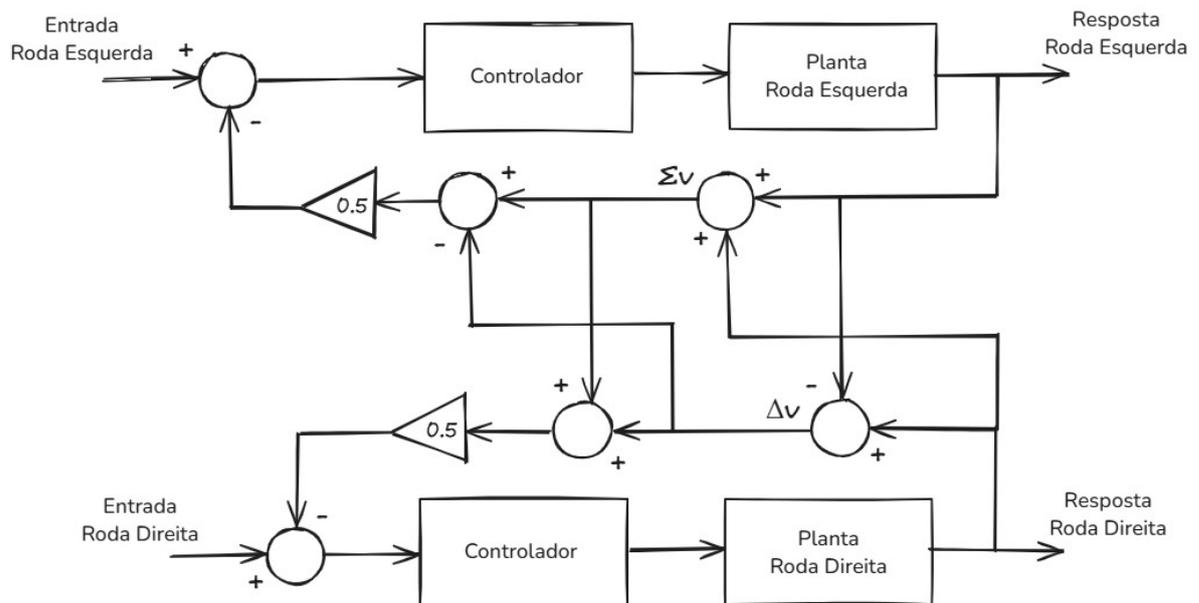
Figura 24 – Modelo de sistema em malha fechada simplificado.



Fonte: (Autor, 2025).

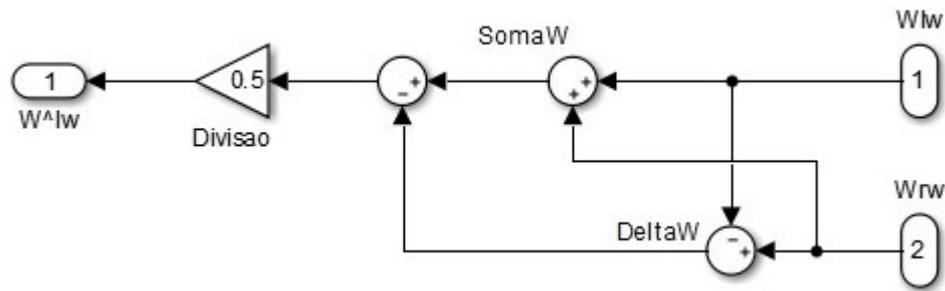
Relembrando definições abordadas na Seção (2.3.1), a velocidade linear do robô é a média das velocidades nas rodas e a velocidade angular é a diferença das velocidades das rodas. Sendo assim, considerando as Equações (2.6) e (2.7), o modelo em malha fechada usado será o ilustrado na Figura 25. O modelo de realimentação, ilustrado na Figura 25, pode ser representado em blocos de subsistemas no *Matlab* para cada roda, como ilustrado na Figura 26, e o sistema em malha fechada por completo é ilustrado na Figura 27.

Figura 25 – Modelo de sistema de duas rodas em malha fechada.



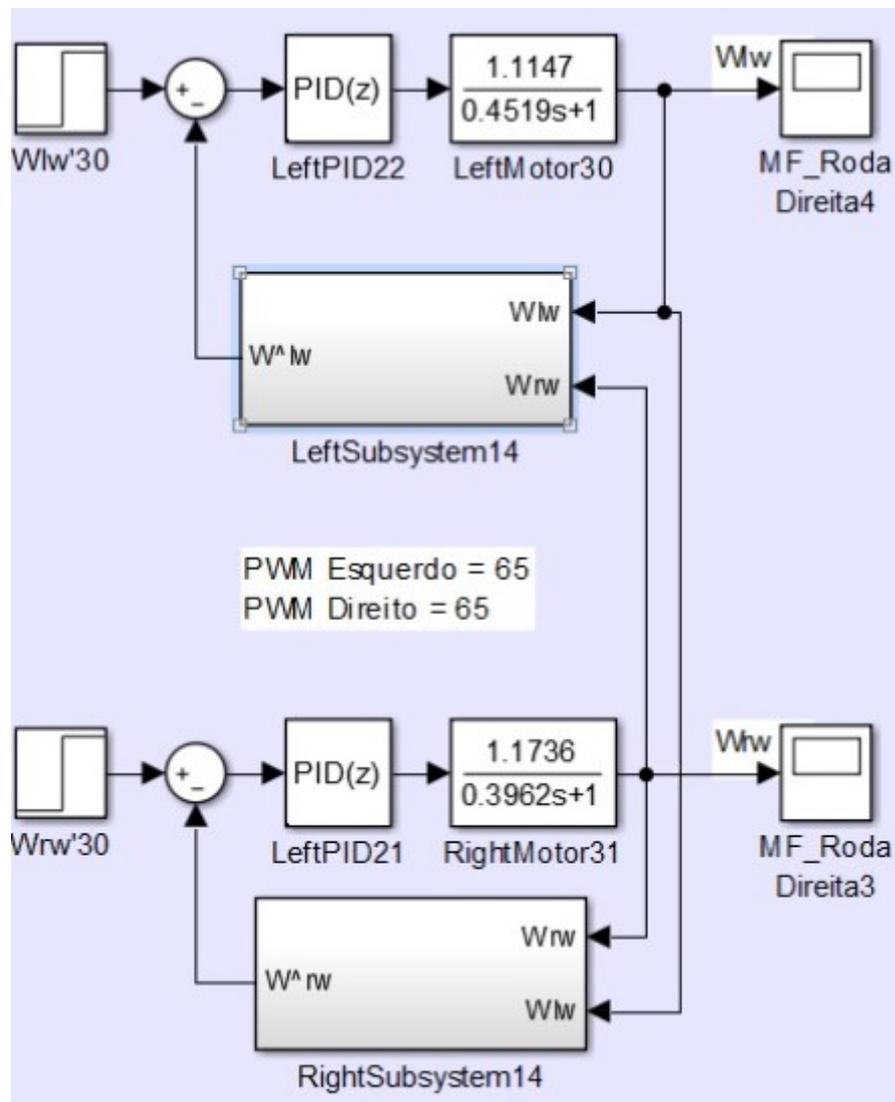
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 26 – Subsistema de realimentação da roda esquerda.



Fonte: (Autor, 2025).

Figura 27 – Sistema de controle em malha fechada montado no *Matlab*.



Fonte: (Autor, 2025).

#### **4.4.2 Projeto dos Controladores**

Como se observa na Figura 26 utilizou-se um controlador PID digital que é um controlador largamente usado em sistemas de controle pela sua fácil aplicação e por seu fácil estudo (e análise) em sistemas de primeira e segunda ordem. O controlador PID digital foi utilizado no formato paralelo, cujo tempo de amostragem do microcontrolador utilizado é de 15ms. Para a definição dos coeficientes do controlador final, têm-se algumas considerações a fazer:

- A característica mais prioritária é o tempo de acomodação, pois o dinamismo da partida e o campo pequeno da categoria faz com que a velocidade desejada varie rapidamente.
- Os robôs não necessariamente precisam ter a mesma mecânica, então cada equipe pode desenvolver mecânicas diferentes para os robôs, como especializações em algumas ações, o que implica em robôs com massas diferentes, possivelmente.

Dentro dessas circunstâncias, alguns coeficientes do PID digital podem ser nulos. Dentre as possibilidades existentes, têm-se os controladores P, PI e PD. Analisando as características desses controladores e as características do projeto, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- O controlador P oferecerá um erro em regime permanente, mas pode ser um erro suficientemente pequeno para não ser relevante. Entretanto, a possibilidade de haver robôs com massas diferentes impacta diretamente na curva de velocidade do motor, como já foi observado na Figura 17 nas situações com e sem carga. Logo, este controlador não é recomendado.
- O controlador PI oferece erro nulo em regime permanente para um sistema de primeira ordem com entrada em degrau o que é bastante interessante, porém não se tem muito controle sobre o tempo em que o regime permanente é alcançado e o tempo de acomodação é a característica mais importante nesse projeto.

- O controlador PD oferece um bom controle sobre o tempo de acomodação, porém não sobre o erro em regime permanente. Adicionalmente, este tipo de controlador tem, naturalmente, ressalvas sobre a estabilidade oferecida, de modo que não será considerado nesta aplicação.

Com isso, o PI é uma boa alternativa de controlador diferente do PID. Sendo assim, a definição dos coeficientes será feita através do *PID Tuner* do Simulink e, se o ganho derivativo for muito pequeno, este pode ser desconsiderado, resultando num PI.

Aplicando esse método em todas as plantas, observou-se a possibilidade de uso de um controlador PI na maioria das plantas, especialmente nas com valores de PWM mais altos. Sendo assim optou-se por utilizar um controlador PI, cuja combinação de ganhos que se adequou melhor à maioria das plantas foi  $K_p = 5$ ,  $K_i = 20$ . É importante dizer que na aplicação prática, o ganho integral é multiplicado pela taxa de amostragem, o que resulta em  $K_i = 0.3$ .

## 5 RESULTADOS

Este capítulo tem o objetivo de ilustrar os resultados obtidos nos testes em malha fechada para o controlador PI resultante dimensionado no capítulo anterior. Esses resultados englobam os observados através de simulação no *Simulink/Matlab* e os obtidos por experimentação através das leituras dos *encoders* após aplicação do controlador no microcontrolador para verificar a concordância do esperado com o real. Por fim, será feita uma discussão sobre os resultados observados. É importante informar que o PWM de valor 255, por ser o valor máximo, não promove um teste interessante de se analisar porque a ação de controle pode entrar numa região de saturação.

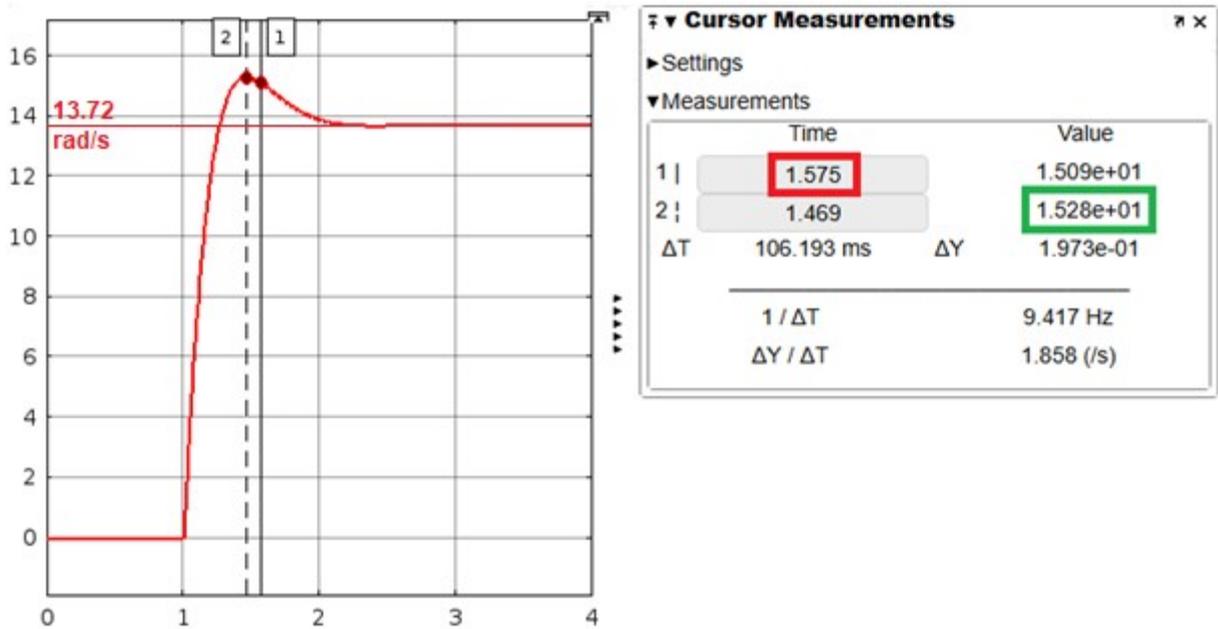
### 5.1 Resultados de Simulação

A seguir são apresentadas as imagens referentes aos resultados simulados das saídas dos sistemas de controle com o controlador PI resultante em cada roda nos valores de referência de PWM. Ainda nas imagens, o valor em regime permanente é ilustrado no eixo vertical do gráfico, enquanto o tempo de acomodação e o valor de pico são evidenciados por tarjas vermelhas e verdes, respectivamente. É importante observar que o comando do degrau é feito após um segundo nas imagens, então o tempo evidenciado na tarja vermelha deve ser reduzido em uma unidade para se obter o tempo de acomodação verdadeiro.

A organização das imagens é descrita abaixo:

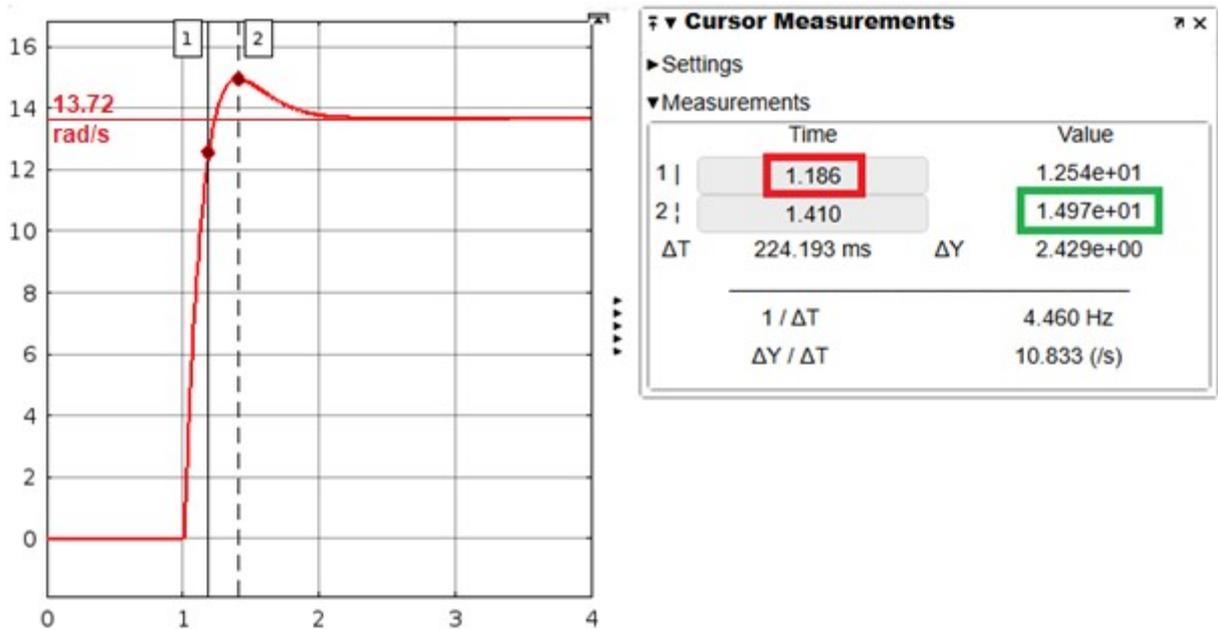
- Figuras 28 e 29 referem-se aos resultados com PWM de valor 65.
- Figuras 30 e 31 referem-se aos resultados com PWM de valor 190.
- Resultados para os demais valores de referência de PWM (75, 85, 100 e 130) estão apresentados no Apêndice A.

Figura 28 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 65.



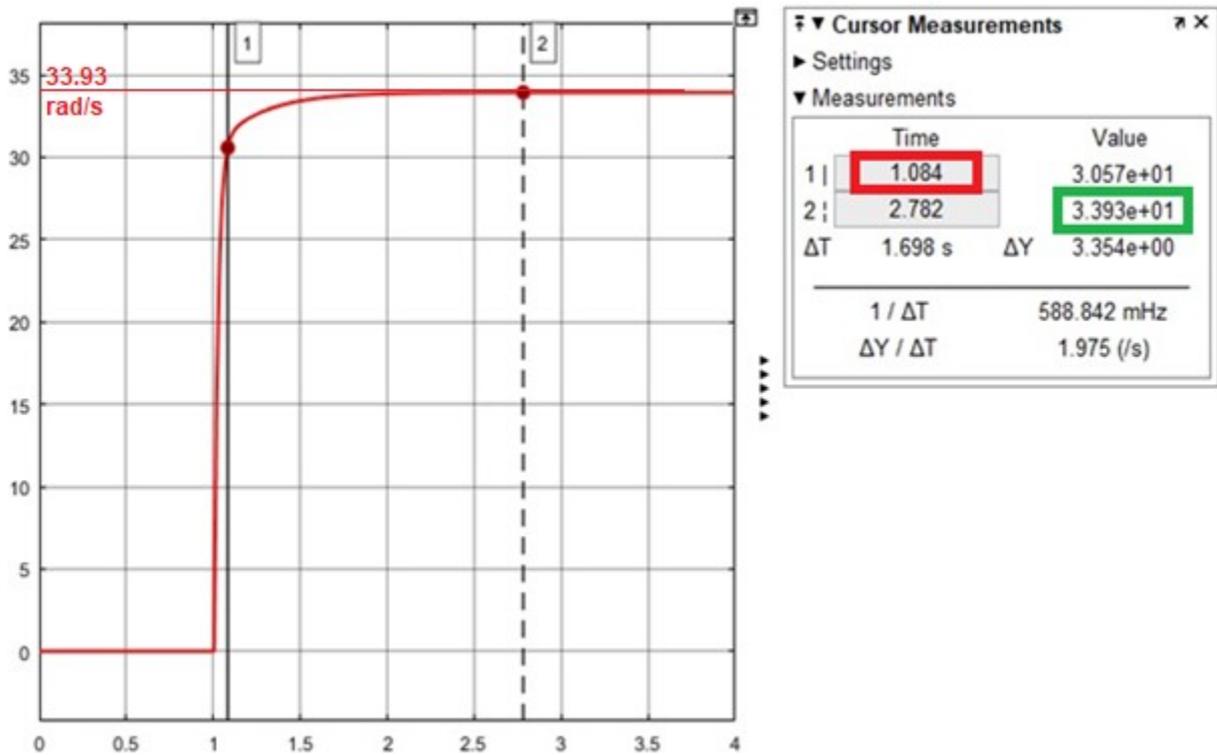
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 29 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 65.



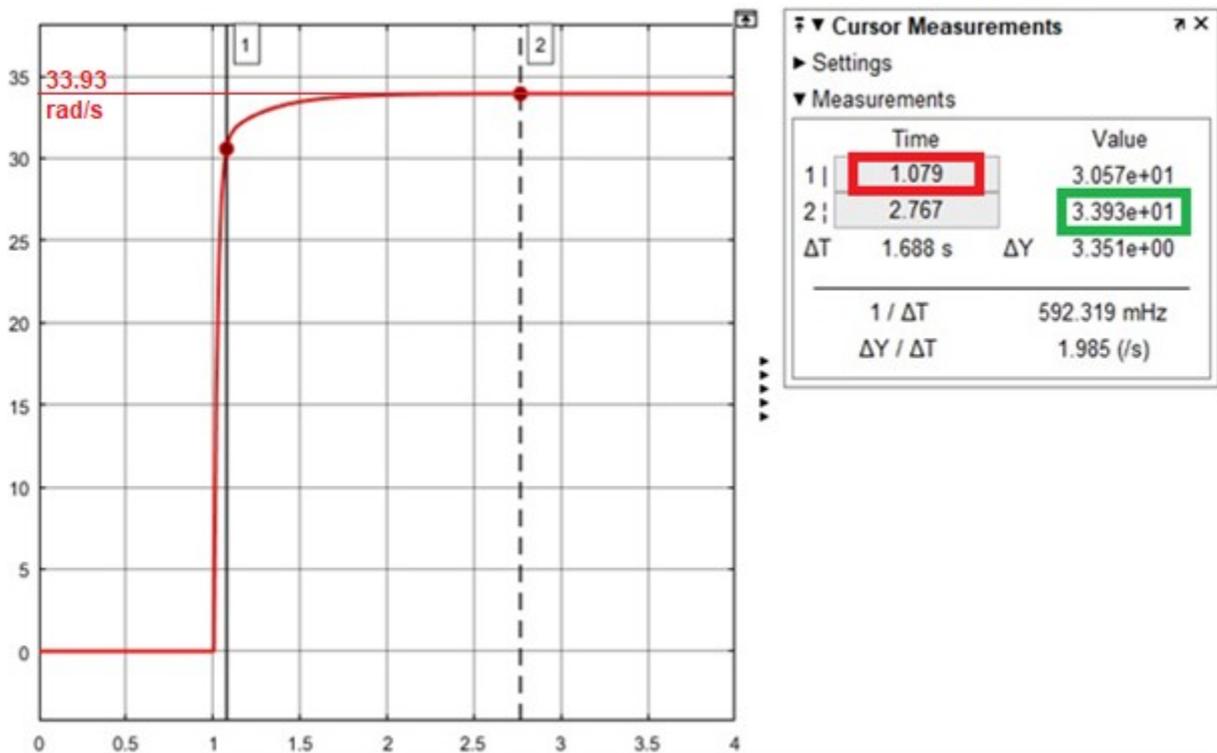
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 30 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 190.



Fonte: (Autor, 2025).

Figura 31 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 190.



Fonte: (Autor, 2025).

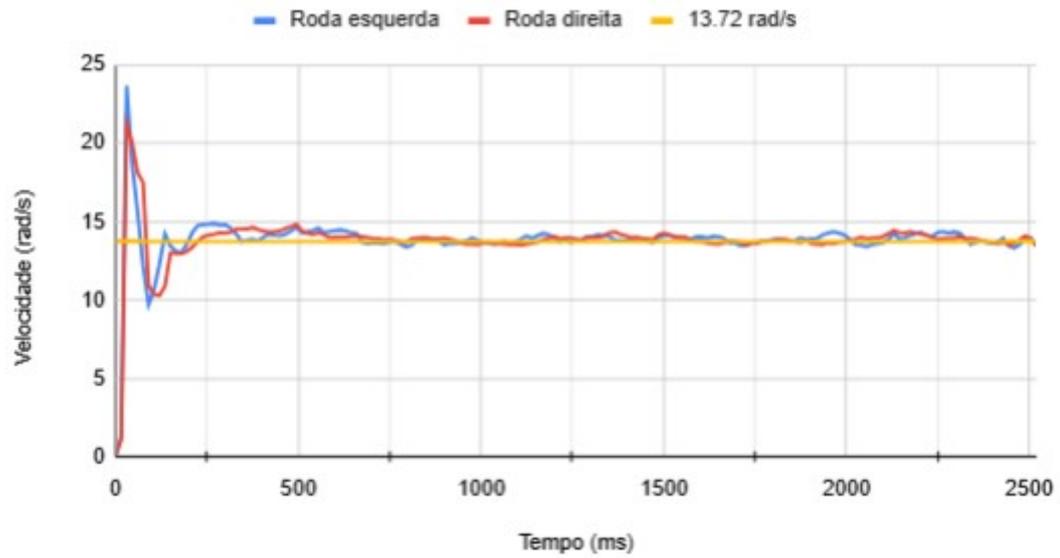
## 5.2 Resultados Experimentais

Nos resultados experimentais, o controlador PI resultante foi programado no microcontrolador do robô e foi atuado nos diferentes valores de referência de PWM. Os vídeos dos testes em malha fechada estão disponíveis na *playlist*: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLqvvCgsJkCcHQ-awJGTeKMt3imZw1dc6L>.

Nos testes experimentais, o controlador obtido pela simulação promoveu a locomoção do robô na velocidade máxima, indicando que a velocidade obtida alcançou a região de saturação de velocidade e, portanto, tornando-se impróprio para uso. Um ajuste manual realizado foi feito e um novo controlador PI foi definido, cujos coeficientes são  $K_p = 2$ ,  $K_i = 0.25$ , que são coeficientes bem próximos dos projetados inicialmente. Essa diferença nos ganhos deve ocorrer por causa das não linearidades existentes nos motores que são rastreadas como fenômenos de histerese advindos do motor ser feito com materiais ferromagnéticos e a presença de um *encoder* magnético que aplica um campo magnético sobre o motor.

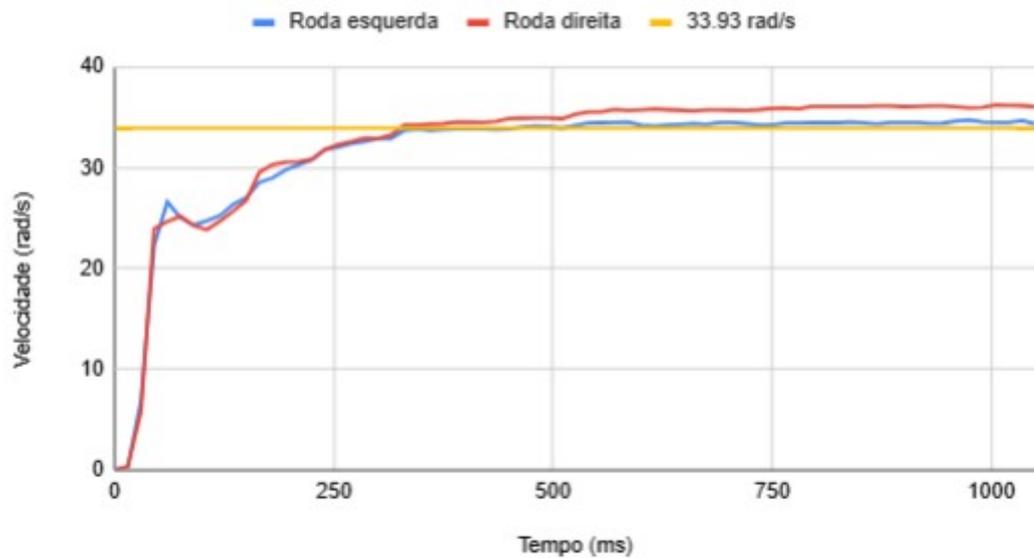
As Figuras 32 e 33 apresentam as medições referentes às saídas das rodas esquerda e direita com o novo controlador PI para PWMs de valores 65 e 190, respectivamente. Nessas Figuras, também se evidencia a resposta em regime permanente (linha em amarelo) esperada para cada valor de PWM, de acordo com a Tabela 1. Os resultados obtidos para os demais valores de referência de PWM são apresentados no Apêndice B. A Tabela 3 informa, para cada valor de PWM, o valor de pico (VP) de cada roda e o tempo de acomodação.

Figura 32 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 65.



Fonte: (Autor, 2025).

Figura 33 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 190.



Fonte: (Autor, 2025).

Tabela 3 – Parâmetros de controle medidos nos resultados experimentais para cada valor de referência de PWM.

| Valor de PWM | VP Roda Esquerda | VP Roda Direita | Tempo de acomodação |
|--------------|------------------|-----------------|---------------------|
| 65           | 23.666 rad/s     | 21.228 rad/s    | 150 ms              |
| 75           | 25.553 rad/s     | 26.152 rad/s    | 135 ms              |
| 85           | 26.434 rad/s     | 26.870 rad/s    | 150 ms              |
| 100          | 28.727 rad/s     | 30.868 rad/s    | 240 ms              |
| 130          | 33.098 rad/s     | 33.939 rad/s    | 195 ms              |
| 190          | 34.71 rad/s      | 36.232 rad/s    | 225 ms              |

Fonte: (Autor, 2025).

### 5.3 Discussão dos Resultados

É fácil observar a diferença entre os valores de pico entre os resultados experimentais e simulados, especialmente em valores de PWM baixos. Esse sobressinal alto, por vezes evitado ou contido no ramo de engenharia de controle para preservação dos equipamentos, não impacta negativamente no desempenho dos motores do robô, uma vez que os máximos sobressinais de velocidade ainda estão dentro da faixa de operação do robô (velocidade máxima estimada em 36.5 rad/s, de acordo com a Tabela 1), ou seja, existe um valor de PWM cuja velocidade no regime permanente corresponde a esse valor no sobressinal. Por outro lado, encontrar um sobressinal que provoque a saturação de comando é prejudicial ao sistema, como ocorreu com o controlador projetado.

Também observa-se uma variação no tempo de acomodação visto nos resultados simulados e experimentais:

- Nas simulações, nota-se que o tempo de acomodação é próximo de 150 ms para valores de PWM mais baixos e reduz para até menos de 100 ms conforme se aumenta o valor do PWM.
- Nas medições, nota-se que o tempo de acomodação é próximo de 150 ms para valores de PWM mais baixos e fica maior em valores de PWM mais altos.

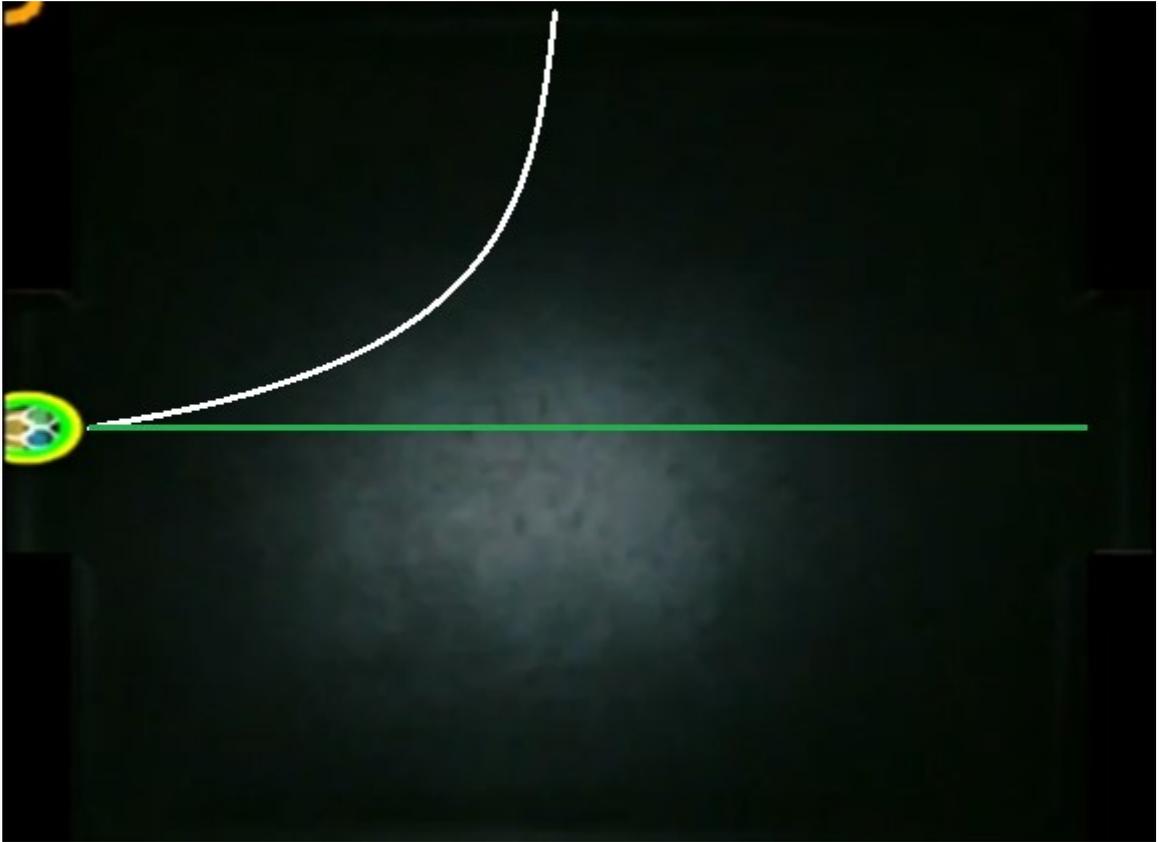
Apesar disso, em ambos os casos, o sistema estabiliza dentro 250 ms que é o requisito de projeto.

Em ambos os resultados, as respostas das duas rodas convergem para um mesmo valor de regime permanente com erro nulo, como se espera para um controlador PI num sistema em malha fechada com entrada em degrau. Entretanto, para o PWM de valor 190, observa-se que a roda direita estabiliza seu movimento em torno de 36 rad/s o que resulta em um erro de 6.1% nesta roda. Este erro pode ser explicado devido à inferência do resultado não linear obtido na Figura 17 para todos os outros motores. Os motores utilizados não são produzidos numa qualidade que garanta as mesmas características não lineares em todas as faixas de comandos de PWM disponíveis e, portanto, podem apresentar pequenas variações das velocidades esperadas em regime permanente quando um modelo é inferido. Ainda assim, o erro apresentado está dentro da faixa de erro permanente estabelecida pela equipe.

Em ambos resultados, observa-se que o sistema tem um comportamento subamortecido em valores de PWM baixos e transide para um sistema criticamente amortecido ou super amortecido conforme se aumenta o valor do PWM. Isso indica que apesar das breves diferenças quantitativas em alguns elementos do sistema, provocado pelas não linearidades do sistema, o comportamento do sistema esperado em simulação se replicou no experimento, como a manutenção dos requisitos do sistema, anulação do erro em regime permanente e uma trajetória retilínea.

Por fim, pode-se comparar a diferença observada entre a movimentação do robô comandado para realizar uma trajetória retilínea operando em malha aberta e operando em malha fechada, ilustrada na Figura 34. Quando operando em malha aberta, o robô realiza um movimento curvilíneo, como se espera em um sistema de locomoção diferencial. Quando operando em malha fechada, o robô consegue reduzir a diferença de velocidade entre rodas e realizar uma locomoção retilínea.

Figura 34 – Comparação entre a movimentação do robô operando em malha aberta (trajetória de cor branca) e em malha fechada (trajetória de cor verde).



Fonte: (Autor, 2025).

## 6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Através dos estudos e aplicação feitos neste TCC, pode-se sistematizar o processo para projetar e implementar um controle digital de locomoção diferencial para robôs da categoria VSSS. Os resultados simulados ou experimentais, apesar de apresentarem diferenças quantitativas em alguns elementos presentes em seus gráficos, ainda apresentaram as mesmas características de controle e atenderam aos requisitos do sistema, resultando no objetivo de fazer o robô seguir uma trajetória retilínea com o mesmo comando aplicado nas duas rodas.

Em futuros trabalhos que possam melhorar o trabalho desenvolvido neste TCC, pode-se citar mudança da entrada, originalmente um degrau, para uma rampa de aceleração com o objetivo de investigar a suavização do sobressinal observado em valores de PWM baixos. Outra melhoria que pode ser implementada, é a inclusão de um giroscópio ao robô que proporcionaria um controle digital com malhas fechadas em cascata ou com malha fechada interna. O objetivo desse giroscópio seria de reduzir diferenças de controle entre as rodas.

## REFERÊNCIAS

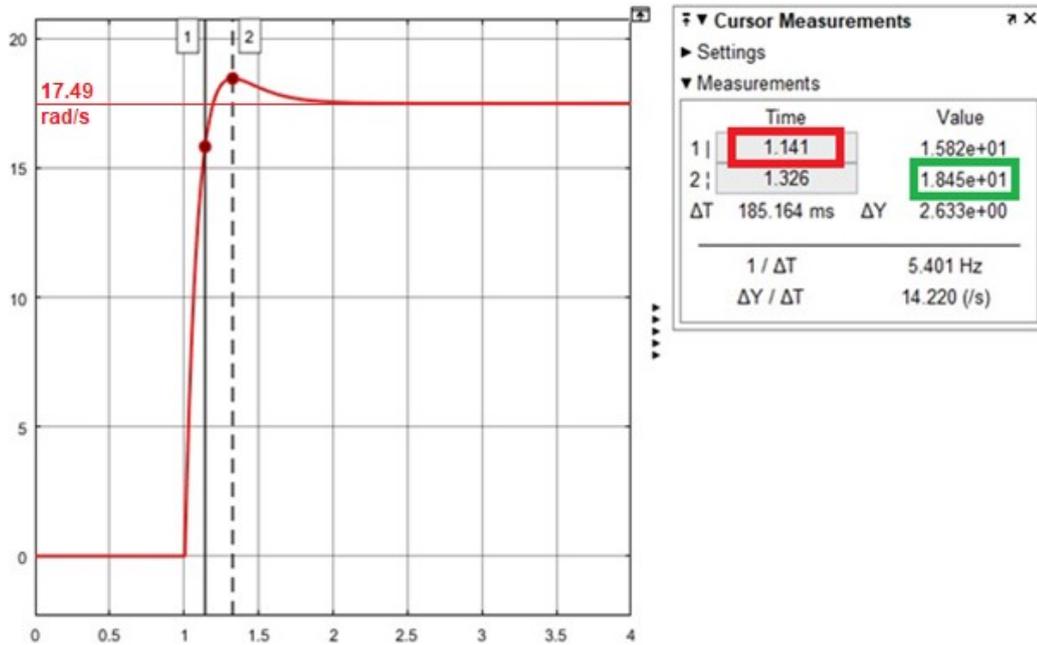
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (09 de 2009). Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. *ABNT NBR 15749* , 49.
- Abreu, J. (2023). *Navegação autônoma de robôs terrestres baseada em marcos visuais artificiais*. Cachoeiro de Itapemirim.
- Amazonas Atual. (Dezembro de 2022). Futuro da tecnologia está na interação entre humanos e robôs no trabalho. *Amazonas Atual* .
- Barros, S. N., & Lima, A. M. (2021). Controle da locomoção de um robô de tração diferencial: problema de estabilização na postura. *IEEE Electronic Library (IEL) Conference Proceedings* , 1086 - 1093.
- CBR. (31 de Agosto de 2020). *IEEE Very Small Soccer - O que é? | RoboCup Brasil*. Acesso em 18 de Dezembro de 2024, disponível em YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=2OdUx\\_5Zchw](https://www.youtube.com/watch?v=2OdUx_5Zchw)
- Dimcev, V., Handjiski, B., & Sekerinska, R. (2003). Alternative fall-of-potential method for grounding grids impedance measurements and inductive coupling between leads. *Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC '03. 2003 IEEE International Symposium on* , 1, 74-77.
- Estadão. (Setembro de 2019). Conheça os meios de transporte mais populares no mundo. *Estadão Summit Mobilidade* .
- Flash Courier. (Julho de 2021). Robótica na logística: como a tecnologia está mudando a cadeia de suprimentos. *Flash Courier* .
- Frasca, G. E., & Bruno, D. R. (2021). Automação: introdução à robótica industrial. *Interface Tecnológica* , 639-651.
- Goulão, A. D. (2022). *Navegação de um Robô Móvel por Processamento de Imagem*. Lisboa.
- IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers. (Dec. de 2012). IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)* , 1-86.
- INATEL. (28 de Agosto de 2018). *Futebol VSSS*. Acesso em 14 de Setembro de 2023, disponível em Inatel: <https://inatel.br/robotica/categorias/futebol-vss>
- ISO 8373 (3 ed.). (2021). Genebra.
- Korasli, C. (2005). Ground resistance measurement with alternative fall-of-potential method. *Power Delivery, IEEE Transactions on* , 20 (2), 1657-1661.
- Korasli, C. (15-19 de Oct. de 2006). Ground Resistance Measurement with Fall-of-Potential Method Using Capacitive Test Probes. *Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2006. ESMO 2006. IEEE 11th International Conference on* .
- Lopes, A. M. (2002). *Modelação Cinemática e Dinâmica de Manipuladores de Estruturas em Série*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Lovatte, M. A., & Lima, L. E. (2011). Controle de Locomoção de uma Cadeira de Rodas com Detecção de Colisão. *10th Brazilian Congress on Computational Intelligence*. Fortaleza.
- Ma, J., & Dawalibi, F. (2002). Extended analysis of ground impedance measurement using the fall-of-potential method. *Power Delivery, IEEE Transactions on* , 17 (4), 881-885.

- Machado, J. C., & Maia, A. A. (2014). Projeto e implementação de um controlador digital em cascata para robôs de tração diferencial. *ABCM Symposium Series* (pp. 1163-1170). Uberlândia: ABCM.
- Matatić, M. J. (2014). *Introdução à robótica*. São Paulo: Unesp.
- Milfont, L. D. (2022). *Análise de Trajetória de uma Cadeira de Rodas Semiautônoma: uma abordagem dinâmica*. Campinas.
- Neto, A. N. (2020). *Desenvolvimento de sistema de acionamento elétrico e de modelagem dinâmica para cadeira de rodas*. Campinas.
- Neto, H. G. (2021). *Identificação Caixa-Cinza de Modelo de Wiener-Hammerstein para Pedal de Distorção*. Natal.
- Neto, O. R., Alves, D. H., Santos, J. S., & Bruno, D. R. (2023). Aplicação de Inteligência Artificial para Robótica Industrial: um estudo visando a indústria 4.0. *Interface Tecnológica*, 571-585.
- Nise, N. C. (2012). *Engenharia de Sistemas de Controle* (6 ed.). (J. P. Matsuura, Ed.) LTC.
- Nunes, G. R. (2023). *Um estudo sobre a geração de trajetórias retilínea e circular para um robô móvel a rodas com tração diferencial e configuração carro com uso restrito de sensores proprioceptivos (encoders)*. Vitória.
- Paul, C. R. (2006). *Eletromagnetismo para Engenheiros: Com Aplicações*. Rio de Janeiro: LTC.
- Pinto, É. S. (2017). *Desenvolvimento de Robôs Capazes de Disputar uma Partida de Futebol na Categoria IEEE Very Small Size*. Ouro Preto.
- Portal Unit. (2021). Acesso em 14 de Setembro de 2023, disponível em Portal Unit: <https://portal.unit.br/blog/noticias/como-a-robotica-esta-cada-vez-mais-presente-no-dia-a-dia/#:~:text=Alguns%20dos%20itens%20vistos%20no,tira%20a%20poeira%20do%20ch%C3%A3o.>
- Santos, A. S., Silva, E. C., Soares, E. G., & Fung, C. W. (2022). Controle de posicionamento de robôs por visão computacional. *Caderno Progressus*, 2 (4), 10-15.
- Santos, F. (Janeiro de 2023). Futuro da tecnologia está na interação entre seres humanos e robôs no trabalho. *Jornal Tribuna*.
- Setti, J. R. (2002). *Tecnologia de transportes*. (EESC/USP, Ed.) São Carlos.
- Sieglwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots* (2 ed.). (R. C. Arkin, Ed.) Londres: MIT Press.
- Sunde, E. D. (1968). *Earth conduction effects in transmission systems*. New York: Dover Publications, INC.
- UAI Soccer. (23 de Fevereiro de 2021). *UAI Soccer Futebol de Robôs*. Acesso em 18 de Dezembro de 2024, disponível em <https://www.facebook.com/photo.php?fbid=5103001039741113&id=265827870125145&set=a.523347084373221>
- Wang, C.-g., Takasima, T., Sakuta, T., & Tsubota, Y. (1998). Grounding resistance measurement using fall-of-potential method with potential probe located in opposite direction to the current probe. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 13 (4), 1128-1135.

## APÊNDICES

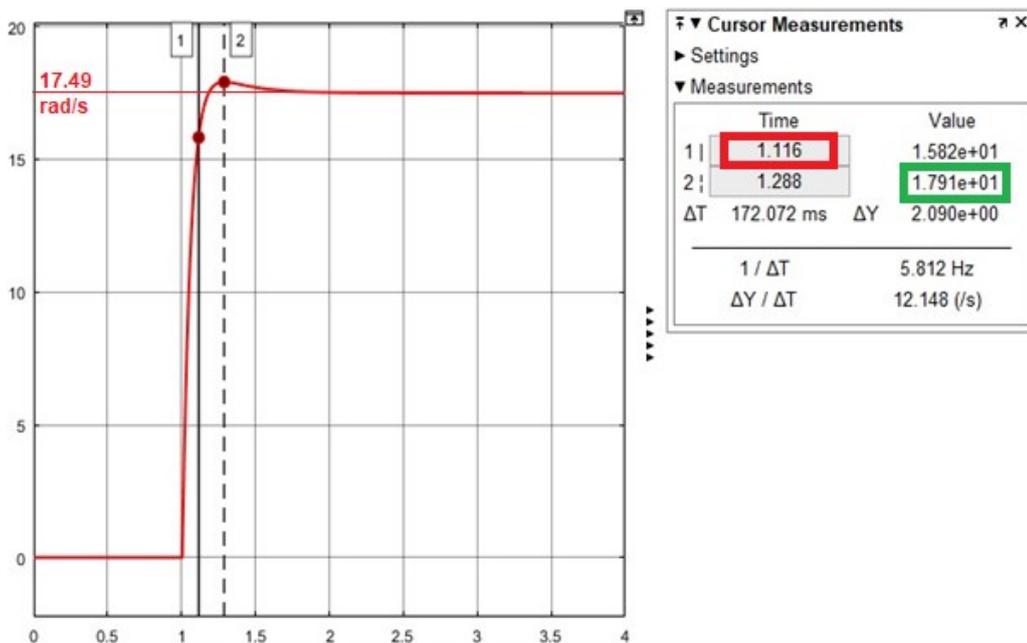
### APÊNDICE A – RESULTADOS SIMULADOS DAS VELOCIDADES NAS RODAS

Figura 35 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 75.



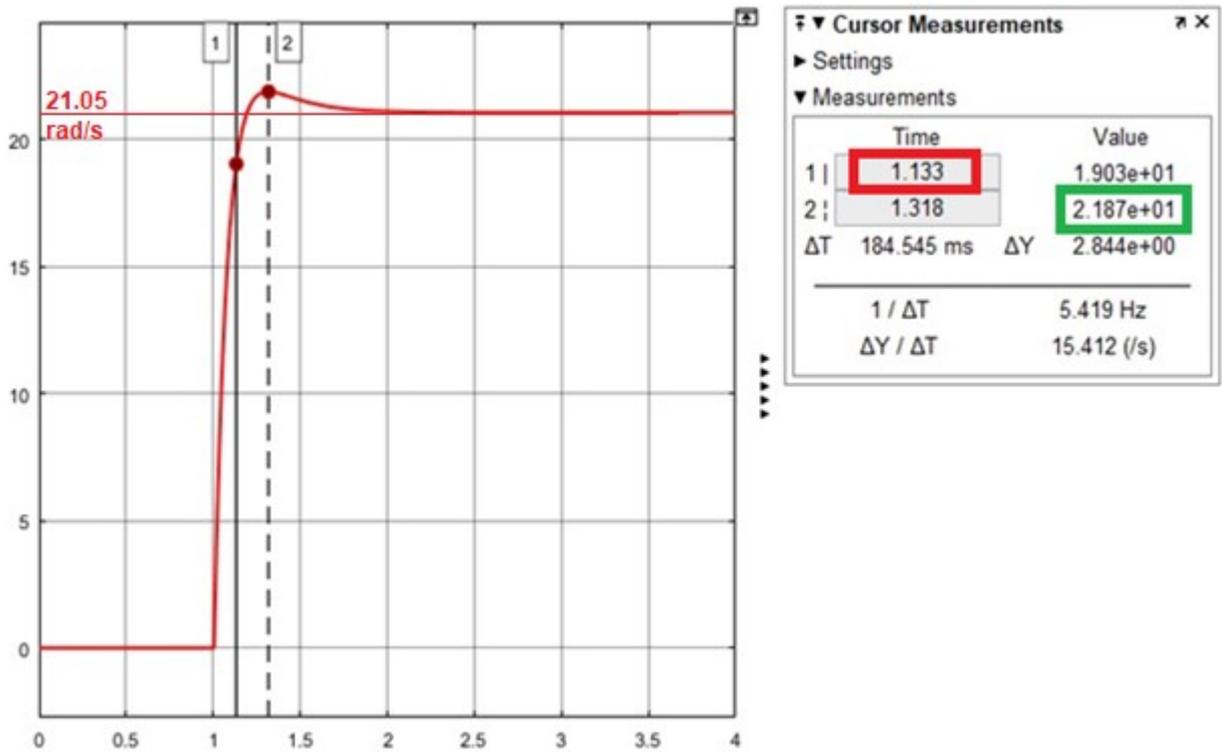
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 36 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 75.



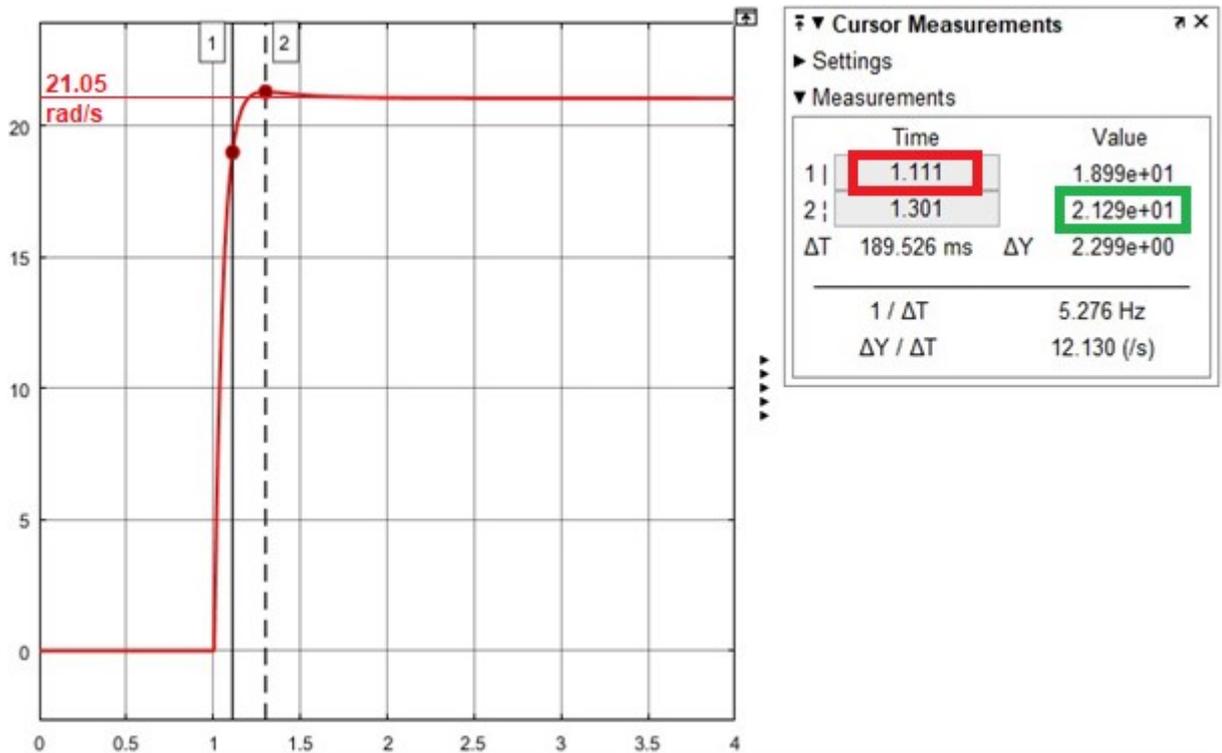
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 37 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 85.



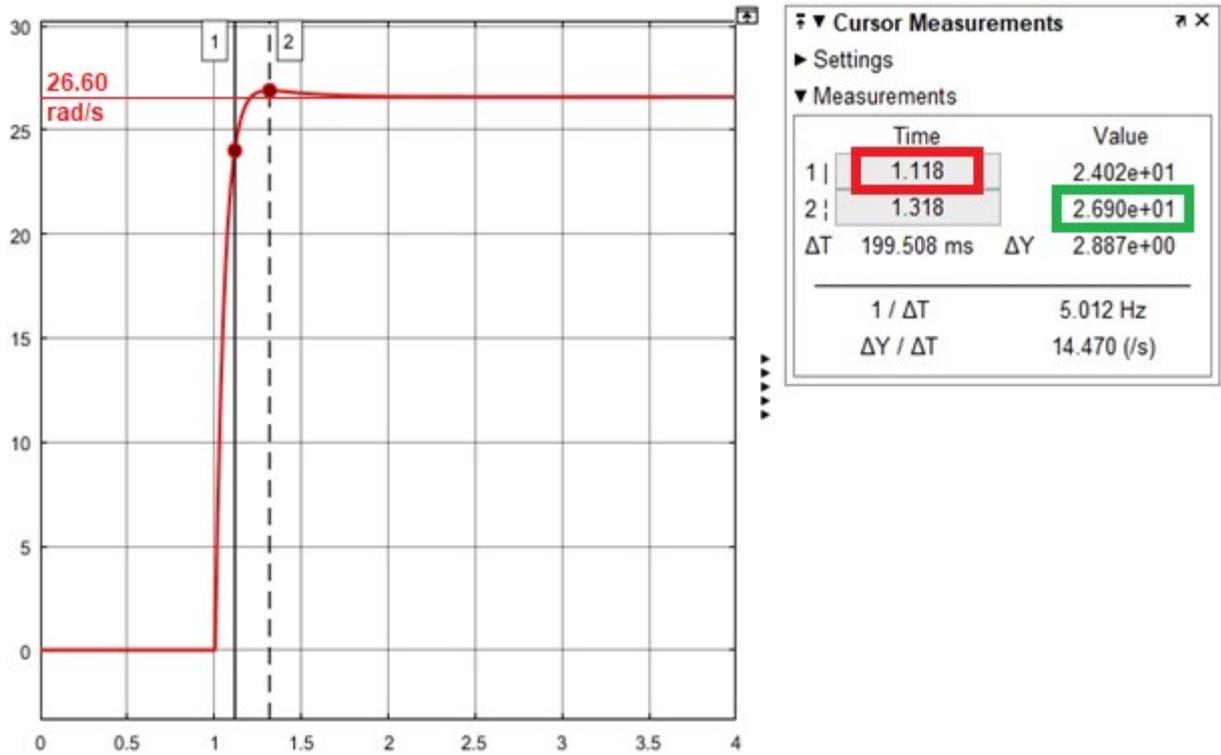
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 38 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 85.



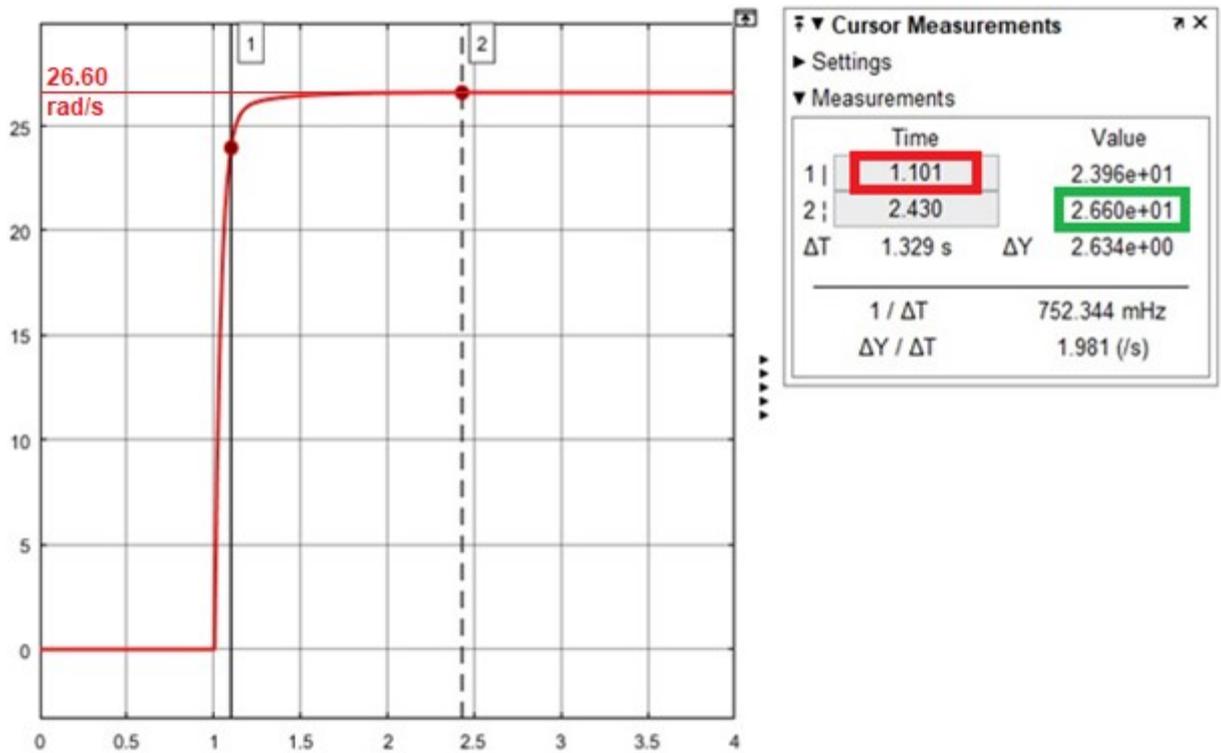
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 39 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 100.



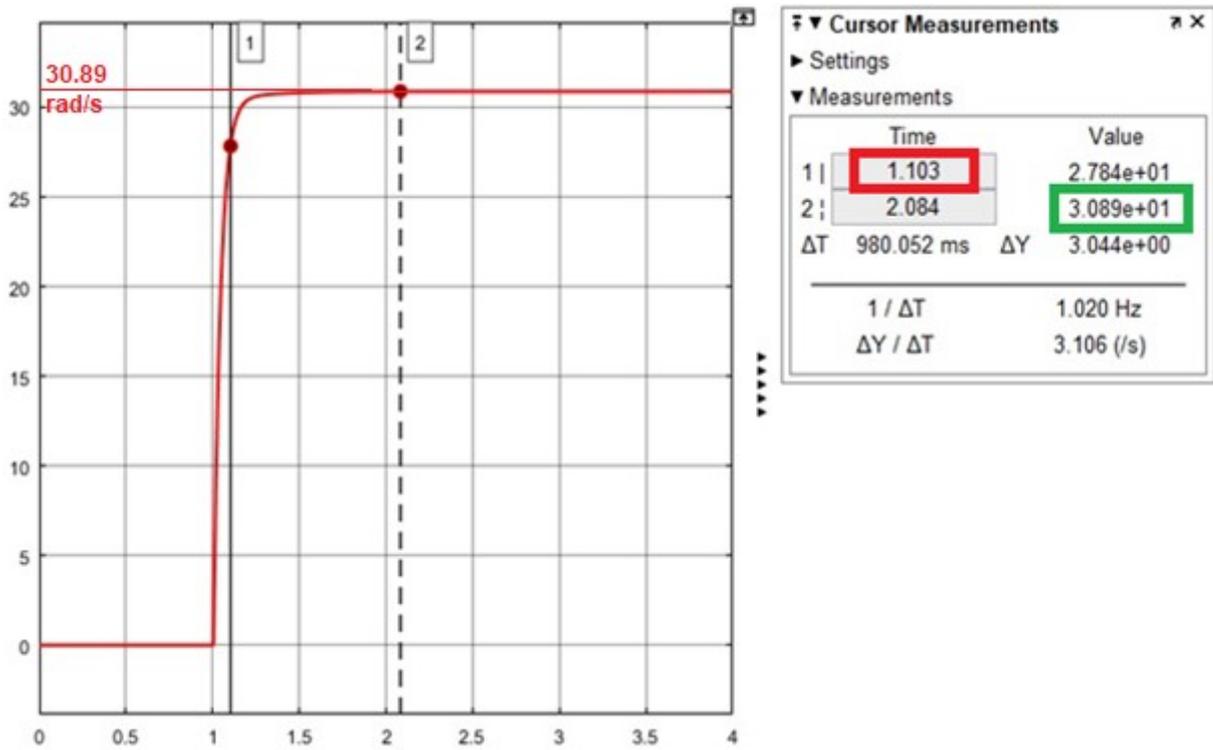
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 40 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 100.



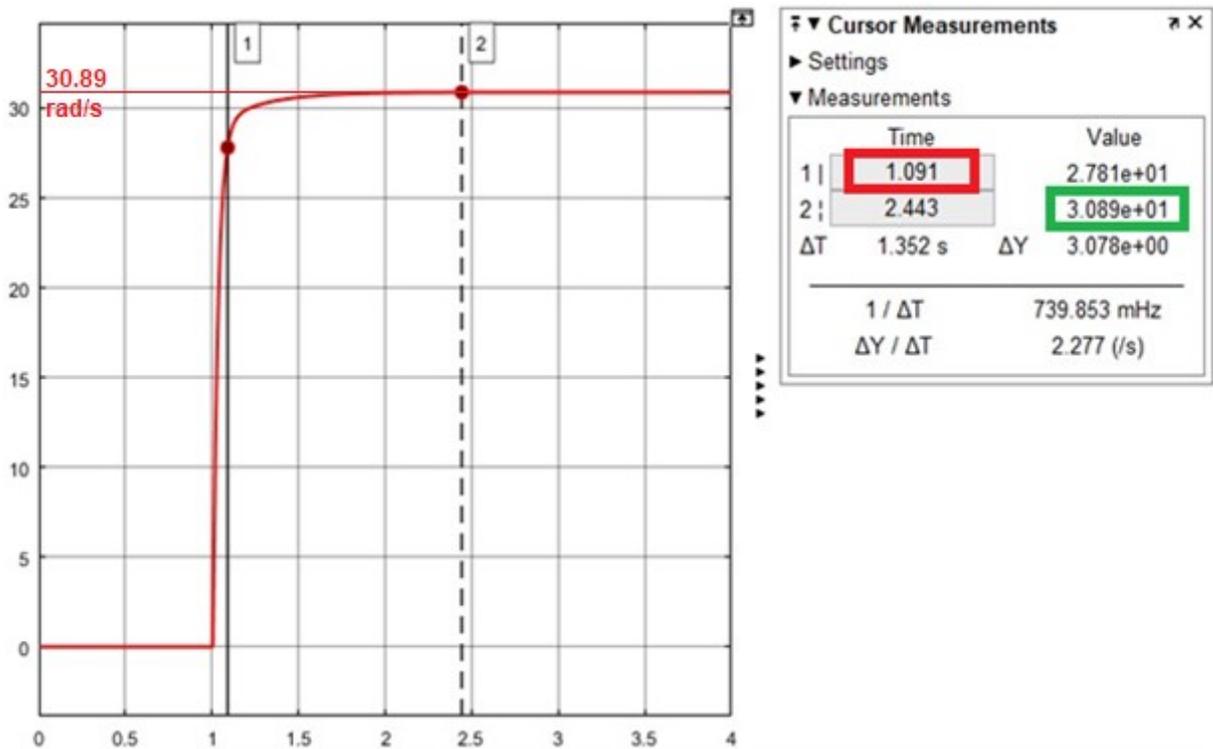
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 41 – Velocidade da roda esquerda em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 130.



Fonte: (Autor, 2025).

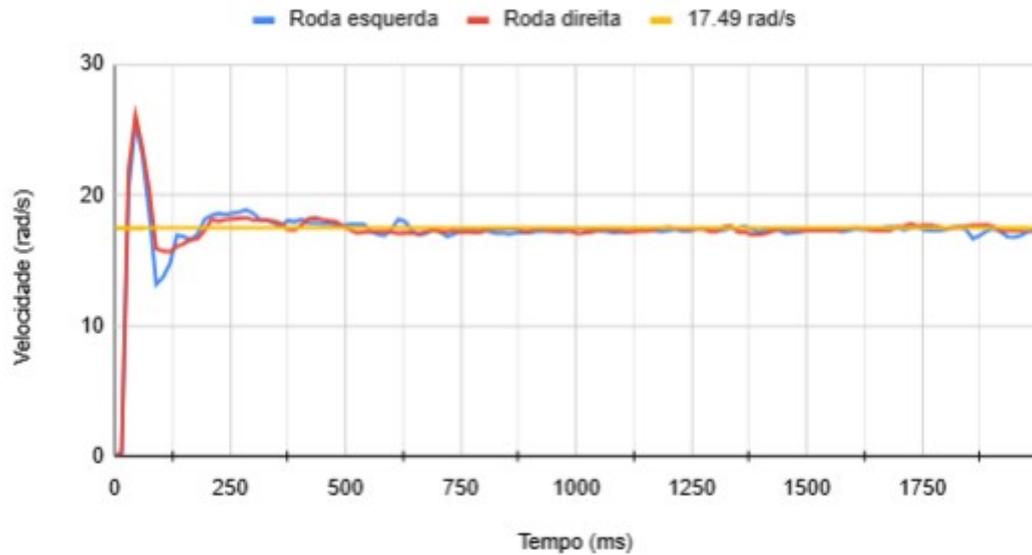
Figura 42 – Velocidade da roda direita em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 130.



Fonte: (Autor, 2025).

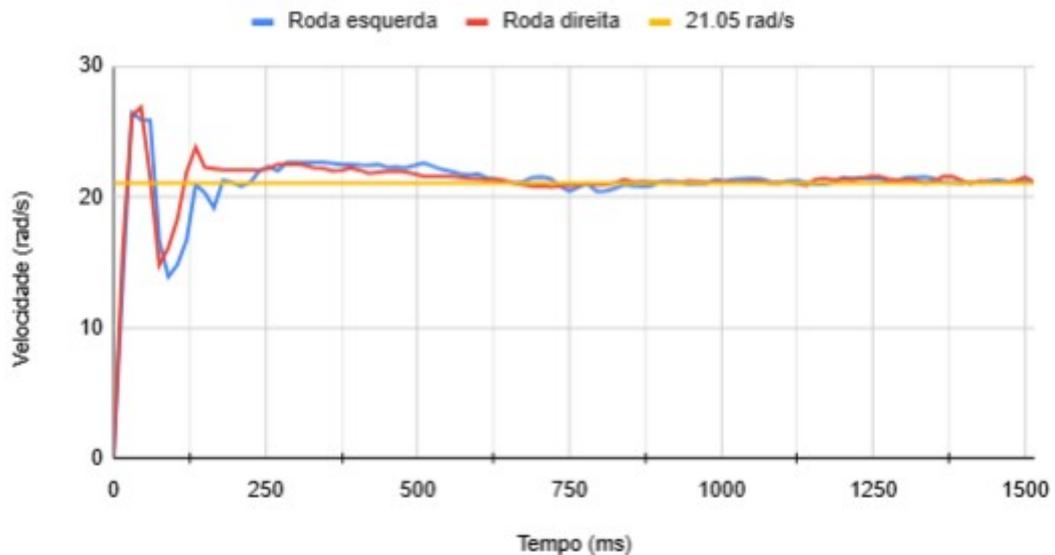
## APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS VELOCIDADES NAS RODAS

Figura 43 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 75.



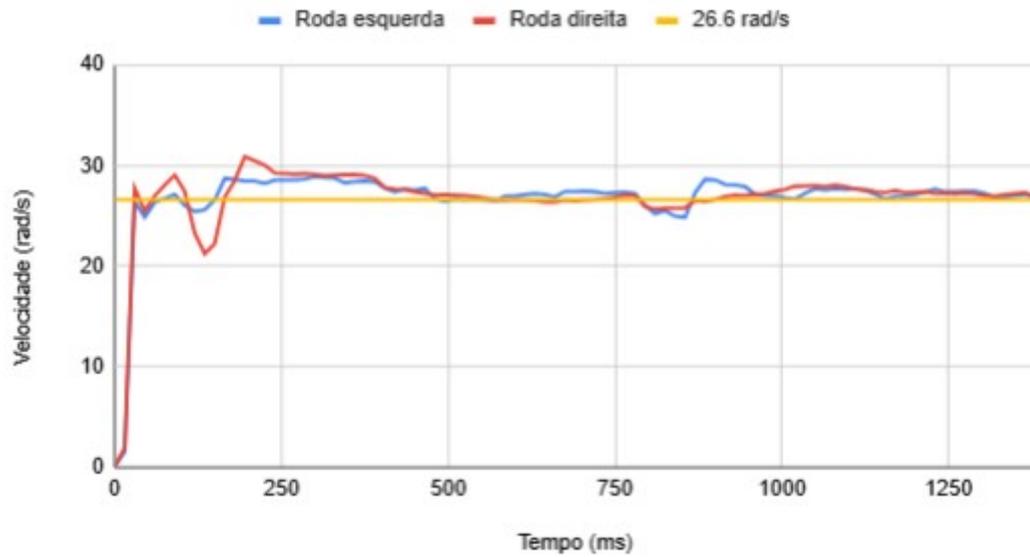
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 44 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 85.



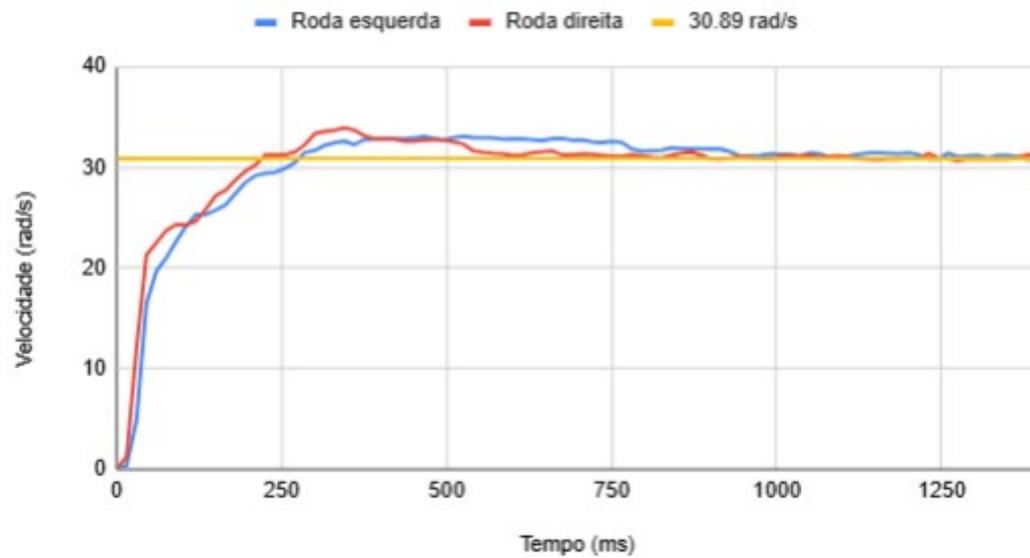
Fonte: (Autor, 2025).

Figura 45 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 100.



Fonte: (Autor, 2025).

Figura 46 – Velocidades medidas dos sistemas das rodas esquerda (em azul) e direita (em vermelho) em malha fechada com controlador PI em PWM de valor 130.



Fonte: (Autor, 2025).