

## Implementação em Simulação de um Controlador PD para Rastreamento de Trajetória de Robôs Móveis Aplicados ao Futebol de Robôs

Henrique A. Ramos\* Dair J. de Oliveira\* Tiago G. de Oliveira\*  
Luiz F. Pugliese\*

\* Universidade Federal de Itajubá - Campus de Itabira  
Instituto de Ciências Tecnológicas  
Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II - 35903-087  
Itabira, Minas Gerais, Brasil  
(e-mail: henriqueanchietaramos@gmail.com, dairoliveira@unifei.edu.br,  
tgaiba@unifei.edu.br, pugliese@unifei.edu.br).

---

**Abstract:** This work addresses problems related to the control of non-holonomic two-wheel mobile robots with differential drive, whose objective is to play the role of football players within a match, that is, to defend and attack. To do this, it is first necessary to find mathematical representations that be able to describe the kinematic and dynamic characteristics of robots, and thus represent their linear and angular dynamics. As these models are SISO (Single Input Single Output), a PD controller will be tuned, so that the robot can quickly track any trajectory imposed on it, ensuring a desired dynamics during a robot football match. A computational simulation will be performed to validate the tuned controller for different types of trajectories.

**Resumo:** Este trabalho aborda problemas relacionados ao controle de robôs móveis de duas rodas não holonômicos com acionamento diferencial, cujo objetivo é desempenhar o papel de jogadores de futebol dentro de uma partida, ou seja, defender e atacar. Para fazer isso, primeiro é necessário encontrar representações matemáticas que sejam capazes de descrever as características cinemáticas e dinâmicas dos robôs, e assim representar sua dinâmica linear e angular. Como esses modelos são SISO (*Single Input Single Output*), um controle do tipo PD será ajustado, de forma que o robô possa rastrear rapidamente qualquer trajetória que lhe seja imposta, garantindo a dinâmica desejada durante uma partida de futebol do robô. Uma simulação computacional será realizada para validar o controlador sintonizado para diferentes tipos de trajetórias.

**Keywords:** Robot football; VSS - Very Small Size; Non-holonomic robots; PID Control

**Palavras-chaves:** Futebol de Robôs; VSS - *Very Small Size*; Robôs não holonômicos; Controle PID

---

### 1. INTRODUÇÃO

O futebol de robôs móveis é uma atividade que vem crescendo nos últimos anos e, com o alto avanço da tecnologia, é possível criar estratégias que podem ser aplicadas a este tipo de competição. O estudo de robôs móveis para a prática de futebol possibilita o surgimento de inovações em outros setores aplicados na robótica móvel. Como por exemplo, em 1997, quando foi fundada a RoboCup que é uma competição internacional, de ocorrência anual, cujo principal propósito é avançar os estudos sobre robótica e inteligência artificial. Desde então, novas tecnologias são compartilhadas a fim de solucionar problemas na área da robótica. O controle de robôs neste tipo de aplicação deve possuir um alto nível de autonomia atuando em malha fechada, pois uma partida de futebol é uma atividade dinâmica e imprevisível (Costa e Pegoraro, 2000).

Dentro do estudo do controle de robôs móveis, os principais problemas que podem ser encontrados são: a estabilização

do robô em um determinado ponto no espaço, o seguimento de um caminho no qual o robô necessita realizar com uma velocidade de referência e o rastreamento do robô para uma trajetória parametrizada no tempo (Youssef, 2013). Os robôs utilizados neste tipo de competição são robôs com rodas com acionamento diferencial que apresentam características de não-holonomia, ou seja, não é possível que o robô execute movimentos normais à superfície do corpo de suas rodas, também pode ser considerado como um sistema não-linear e multivariável, sendo assim, mais complexo projetar um sistema de controle para este tipo de robô (Guerra, 2005).

O controle do robô é apenas um dos desafios presentes no futebol de robôs, de forma que para existir um bom controle, outros requisitos devem ser levados em consideração, como por exemplo, os aspectos construtivos do robô, os modelos projetados, os algoritmos que tratarão da visão computacional e controle, entre outros (Ribeiro e Paravidino, 2017). Dessa forma, o controle depende de

pré-requisitos que estejam bem determinados ou bem construídos para que então possa funcionar de maneira correta e satisfatória.

A escolha do tipo de controle a ser implementado pode ser realizada através de especificações e aspectos construtivos do robô. Existem várias maneiras de se realizar o controle de robôs móveis como por exemplo estratégias baseadas em um controle adaptativo (Lee et al., 1999; Fukao et al., 2000; Shi et al., 2018). Uma solução ótima para um sistema de controle de robôs móveis também pode ser atingida utilizando-se de técnicas de controle preditivo (Klančar e Škrjanc, 2007). Estratégias de controle robusto permitem o rastreamento de movimento e força garantindo que requisitos de projetos sejam satisfeitos (Su et al., 2001). Em um controle por modo deslizante, o comportamento desejado de um robô móvel é atingido através de restrições impostas ao sistema que o forcem a seguir determinadas trajetórias sintetizadas na forma de uma superfície (Youssef, 2013). O controle de robôs móveis via linearização por realimentação dinâmica permite que seja possível utilizar técnicas de controle linear, que são mais conhecidas e de simples implementação para realizar o controle do sistema (Oriolo et al., 2002).

Neste sentido, tem-se a proposta deste trabalho que é realizar o controle em um robô diferencial de duas rodas através da implementação de técnicas de controle linear. Primeiramente, será realizada a modelagem e conseqüente obtenção de um modelo matemático fiel aos movimentos linear e angular do robô para que junto ao sistema de controle desenvolvido, seja possível controlar o robô de forma que os movimentos de ataque e defesa durante uma partida de futebol sejam realizados. Com os modelos lineares, projetou-se controladores do tipo PD que possuem técnicas de projeto mais simples e convencionais. Toda implementação será realizada em ambiente Matlab/Simulink e o foco de desenvolvimento deste trabalho é auxiliar a equipe de robótica da Universidade Federal de Itajubá Campus de Itabira, que participa de competições de futebol de robôs na categoria *Very Small Size* (VSS).

O trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 irá tratar sobre a estrutura utilizada em competições de futebol de robôs além de explicar de maneira geral como é realizado o sensoriamento através da visão computacional bem como a comunicação e o acionamento dos robôs. A Seção 3 apresenta toda modelagem utilizada para o robô. As seções 4 e 5 mostram toda a estratégia de controle utilizada e o projeto do controlador. A Seção 6 apresenta os resultados obtidos. Por fim, apresenta-se as conclusões do trabalho.

## 2. ESTRUTURA DAS COMPETIÇÕES

A Figura 1 apresenta a estrutura oficial utilizada em partidas de futebol de robôs. Esta estrutura possui uma câmera que será responsável por captar dados sobre os robôs, sistema de comunicação remota para envio de informações aos robôs, computadores para o processamento de imagens, execução do algoritmo de controle e uma área base para locomoção dos robôs.

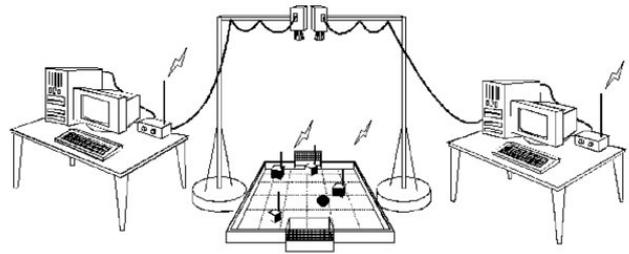


Figura 1. Estrutura utilizada em partidas oficiais de futebol de robôs.

### 2.1 Visão Computacional

Através de uma câmera presente sobre o plano onde ocorrerá a partida, é possível identificar a posição e orientação de um determinado robô no campo por meio de um tratamento de imagem realizado por um algoritmo computacional. Cada robô em campo possui tarjetas coloridas (Figura 2) cuja função é auxiliar o algoritmo de imagem a determinar em qual time cada robô pertence, qual é o seu papel dentro de campo e principalmente as suas orientações, que serão de grande importância para realizar o controle dos robôs.

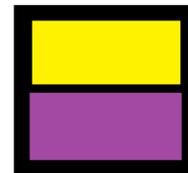


Figura 2. Tarjetas para identificação e posicionamento dos robôs.

O primeiro passo do algoritmo é fazer a busca por pixels que possuem a mesma cor de cada time, em que esses pixels são transformados em grandes regiões de cor branca denominados “Blobs”. Em seguida é realizado novamente o primeiro passo, mas agora para as cores individuais de cada robô. Dessa forma, o algoritmo faz a busca pelos “Blobs” de cores individuais que estão mais próximo dos “Blobs” que possuem a cor do time para assim identificar quais são os robôs aliados. Além disso, é utilizada uma função que calcula o ponto médio entre estes “Blobs”, sendo possível traçar uma reta entre estes dois pontos, em que o centro da reta é considerado como a posição central do robô. A posição do robô é dada pela localização do ponto central da reta em um plano cartesiano que é traçado sobre toda extensão do campo onde ocorre a partida.

### 2.2 Comunicação e Acionamento

Cada robô possui um microcontrolador do modelo ESP32 (Figura 3) que possui um transceptor *bluetooth*, que será responsável por receber os sinais de controle de forma remota pelo computador que estiver executando o algoritmo de controle. No microcontrolador os sinais de controle serão convertidos em sinais PWM de forma a acionar um

conversor do tipo ponte H que é um circuito utilizado em eletrônica de potência para permitir a inversão de polaridade e magnitude de corrente sobre uma carga. Este circuito irá permitir que o robô se locomova para frente ou para trás com velocidade variável.



Figura 3. Microcontrolador ESP32.

### 3. MODELAGEM DO ROBÔ VSS

O robô utilizado para competições de futebol pela equipe de robótica da Universidade Federal de Itajubá Campus Itabira é um robô de duas rodas com acionamento diferencial como apresentado pelo esquemático da Figura 4, em que  $x$  e  $y$  definem sua posição no plano e  $\theta$  define sua orientação em relação ao eixo  $x$ .

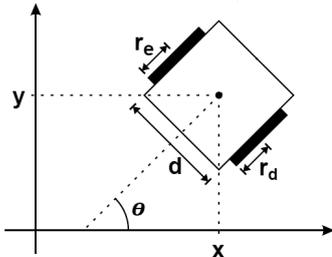


Figura 4. Representação esquemática do robô.

Este robô possui uma velocidade linear ( $v$ ) e uma velocidade angular ( $\omega$ ) sobre o seu centro e também possui um deslocamento linear ( $s$ ). Considera-se que este robô é um sistema desacoplado, ou seja, possui simetria em relação ao eixo longitudinal. Dessa forma, é possível definir dois modelos matemáticos que descrevem o movimento linear e angular para uma determinada entrada de controle. Estes modelos serão extraídos de representações matemáticas que descrevem a cinemática e dinâmica do robô. Assim, será necessário identificar alguns parâmetros elétricos e mecânicos do robô que estão descritas na Tabela 1.

Através dos parâmetros apresentadas na Tabela 1, é possível definir as matrizes

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_d & 0 \\ 0 & \rho_e \end{bmatrix} \quad K_m = \begin{bmatrix} K_d & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix}$$

$$J_m = \begin{bmatrix} J_d & 0 \\ 0 & J_e \end{bmatrix} \quad B_m = \begin{bmatrix} B_d & 0 \\ 0 & B_e \end{bmatrix}$$

$$J_r = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \quad B_r = \begin{bmatrix} B_l & 0 \\ 0 & B_\theta \end{bmatrix}$$

em que  $\rho$  é a matriz de resistividade de armadura dos motores,  $K_m$  é a matriz de constantes de torque dos motores,  $J_m$  é a matriz dos momentos de inércia dos acoplamentos rodas/motores,  $B_m$  é a matriz de coeficientes de atrito dos motores,  $J_r$  a matriz que define a massa e inércia do robô e  $B_r$  a matriz que define os coeficientes de atrito do robô com

Tabela 1. Parâmetros elétricos e mecânicos do robô.

Parâmetro	Definição
$m$	Massa do robô
$r_{d,e}$	Raios das rodas direita e esquerda
$d$	Dimensão do robô
$K_{d,e}$	Constantes de torque
$J_{d,e}$	Momento de inércia do acoplamento roda/motor
$B_{d,e}$	Coefficiente de atrito dos motores
$\rho_{d,e}$	Resistividade elétrica da armadura dos motores
$J$	Momento de inércia do robô
$B_{\theta,l}$	Coefficiente de atrito do robô em movimento rotacional e linear

o solo em movimento linear e rotacional. Em posse dessas matrizes é possível montar a representação em espaço de estados para este sistema que é obtido de Guerra (2005), e pode ser descrito por

$$\begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{\omega}(t) \\ \dot{s}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_u^{-1} B_u & 0_{2 \times 2} \\ I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \\ s(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_u^{-1} K_u \\ 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} T^{-1} \begin{bmatrix} e_v(t) \\ e_\omega(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

em que

$$K_u = (T_u^\omega)^T \cdot \rho \cdot K_m, \quad (2)$$

$$M_u = J_r + (T_u^\omega)^T \cdot J_m \cdot T_u^\omega, \quad (3)$$

$$B_u = B_r + (T_u^\omega)^T \cdot (\rho \cdot K_m^2 + B_m) \cdot T_u^\omega, \quad (4)$$

com

$$T_u^\omega = \begin{bmatrix} 1 & d \\ r_d & 2r_d \\ 1 & -d \\ r_e & 2r_e \end{bmatrix}.$$

A matriz  $T$  é responsável por realizar a transformação do sinal de controle do formato linear/angular para o formato de tensão que serão aplicados nas rodas direita e esquerda, essa transformação é dada por

$$\begin{bmatrix} e_e(t) \\ e_d(t) \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} e_v(t) \\ e_\omega(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

com

$$T = -(-M_u^{-1} B_u)^{-1} M_u^{-1} K_u. \quad (6)$$

Através do modelo descrito na equação (1), é possível extrair as funções de transferência que descrevem o movimento linear e angular do robô, representados por  $G_s$  e  $G_\theta$ , respectivamente, e relacionadas pela equação matricial

$$\begin{bmatrix} S(s) \\ \Theta(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_s(s) & 0 \\ 0 & G_\theta(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_v(s) \\ E_\omega(s) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

É possível determinar a velocidade linear  $\dot{s}$  derivando-se a saída do modelo de movimento linear. Portanto, para cada valor de  $\dot{s}$  e  $\theta$ , para o mesmo instante de tempo, é possível obter  $\dot{x}(t)$  e  $\dot{y}(t)$  conforme

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \dot{s}(t) \cdot \cos(\theta(t)) \\ \dot{y}(t) = \dot{s}(t) \cdot \sin(\theta(t)) \end{cases}. \quad (8)$$

Integrando-se  $\dot{x}(t)$  e  $\dot{y}(t)$  da equação (8) tem-se os valores de posição  $x(t)$  e  $y(t)$  do robô que pode ser utilizado para fins de simulação. Através de ensaios no robô e análise da folha de dados dos motores, foi possível extrair os parâmetros necessários para a realização da etapa de modelagem, os valores estimados são descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros elétricos e mecânicos estimados do robô.

Parâmetro	Valor Estimado
$m$	0,373 Kg
$r_{d,e}$	0,015 m
$d$	0,08 m
$K_{d,e}$	$3,30 \cdot 10^{-2} V \cdot s \cdot rad^{-1}$
$J_{d,e}$	$5,10 \cdot 10^{-6} Kg \cdot m^2$
$B_{d,e}$	$4,78 \cdot 10^{-6} N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$
$\rho_{d,e}$	$0,006 \Omega^{-1}$
$J$	$25,50 \cdot 10^{-6} Kg \cdot m^2$
$B_l$	$0,43 N \cdot s \cdot m^{-1}$
$B_\theta$	$0,58 \cdot 10^{-6} N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$

De posse desses parâmetros são realizadas as substituições necessárias nas equações (2), (3), (4) e (6) sendo possível encontrar o modelo cinemático descrito na equação (1) representado por

$$\begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{\omega}(t) \\ \dot{s}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,2672 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1,6473 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \\ s(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,2672 & 0 \\ 0 & -1,6473 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_v(t) \\ e_\omega(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Através do modelo cinemático é possível extrair os modelos linear e angular do robô como descrito na equação (7) em que serão dados respectivamente por

$$G_s(s) = \frac{1,2672}{s^2 + 1,2672s} \quad e \quad G_\theta(s) = \frac{1,6473}{s^2 + 1,6473s}. \quad (10)$$

Nota-se que ambos os modelos são de segunda ordem, este fato ocorre pois a modelagem é realizada considerando que o robô é um sistema desacoplado. É realizado também uma conversão no ângulo  $\theta$  gerado pelo modelo angular, para que assim a excursão deste ângulo esteja no mesmo intervalo que a excursão do ângulo de referência ( $\phi$ ) que é gerado no intervalo de  $-\pi$  a  $\pi$ .

#### 4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O primeiro passo da estratégia de controle é transformar todo o modelo cinemático para coordenadas polares como representado na Figura 5, em que  $\Delta l$  é a distância entre a posição do robô e a posição desejada  $(x_{ref}, y_{ref})$ ,  $\Delta \lambda$  é a distância entre o robô e o ponto **R** (ponto mais próximo da referência seguindo a orientação do robô),  $\phi$  é a orientação que o robô deve alcançar para se orientar em direção ao ponto desejado e  $\Delta \phi$  é a diferença entre  $\phi$  e a orientação do robô  $\theta$  (Vieira, 2006).

Assim, é possível definir os erros linear e angular, que serão tratados pelos controladores, gerando assim os sinais

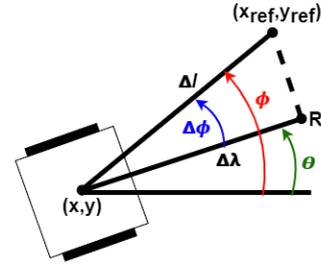


Figura 5. Variáveis utilizadas na estratégia de controle.

de controle que serão transmitidos para os respectivos modelos. Da Figura 5, tem-se que

$$\Delta l = \frac{\Delta \lambda}{\cos(\Delta \phi)}. \quad (11)$$

Como se trata de um problema de controle de posição, o erro angular ( $e_\theta$ ) é definido por

$$e_\theta = \phi - \theta = \Delta \phi, \quad (12)$$

em que

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{y_{ref} - y}{x_{ref} - x} \right). \quad (13)$$

Da equação (11) nota-se que ao garantir a convergência de  $\Delta \lambda$  para zero, tem-se também a convergência de  $\Delta l$  para zero, logo a estratégia de controle deve satisfazer esta condição. Define-se então o ponto **R** como referência para o controlador linear, sendo possível realizar o cálculo do erro linear ( $e_s$ ) dado por

$$e_s = \Delta \lambda = \Delta l \cdot \cos(\Delta \phi), \quad (14)$$

em que

$$\Delta l = \sqrt{(x_{ref} - x)^2 + (y_{ref} - y)^2}. \quad (15)$$

Para um robô que pode fazer o movimento frontal ou traseiro, deve-se realizar uma modificação no erro angular de forma que o robô realize ambos movimentos. Dessa forma, o novo erro angular é dado por

$$\begin{cases} e_\theta = \Delta \phi, & |\Delta \phi| < \pi/2 \\ e_\theta = \Delta \phi - \pi \cdot \text{sgn}(\Delta \phi), & |\Delta \phi| \geq \pi/2 \end{cases}. \quad (16)$$

#### 5. PROJETO DE CONTROLADORES PD

Os controladores selecionados para atuar nas malhas de movimento linear e angular serão do tipo PD. Optou-se por não adicionar a parcela integrativa deste controlador visto que os modelos linear e angular já possuem um polo na origem do sistema. Os ganhos dos controladores são definidos de acordo com a técnica conhecida como lugar das raízes. Nesta técnica, através de um tempo de acomodação ( $T_a$ ) e máximo pico ( $M_p$ ) desejados, são projetados polos para o sistema, de forma que sua resposta em malha fechada para uma excitação do tipo degrau unitário consiga atingir as especificações desejadas no projeto. Definidos o máximo pico e o tempo de acomodação, é possível encontrar duas variáveis, denominadas como fator de amortecimento ( $\zeta$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_n$ ), dadas por

$$\zeta = \sqrt{\frac{\ln^2 \left( \frac{M_p}{100\%} \right)}{\pi^2 + \ln^2 \left( \frac{M_p}{100\%} \right)}} \quad (17)$$

e

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta \cdot T_a} \quad (18)$$

Essas variáveis compõem a equação que define um sistema de segunda ordem e possui em seu denominador o polinômio  $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$  que é chamado de equação característica e define os polos do sistema em malha fechada. É através deste polinômio que se define os ganhos dos controladores. Dessa forma, deve-se encontrar primeiramente a função que descreve o sistema deste trabalho em malha fechada. Sabe-se que os modelos linear e angular possuem o formato dado por

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + Ks} \quad (19)$$

e que o modelo de um controlador PD é dado por

$$C(s) = K_P + K_D s \quad (20)$$

Assim, a função de transferência do sistema em malha fechada com realimentação unitária da planta descrita na equação (19) com o controle descrito pela equação (20) é dada por

$$T(s) = \frac{K_P K + K K_D s}{s^2 + (K + K K_D)s + K_P K} \quad (21)$$

Igualando o denominador da equação característica de um sistema de segunda com o denominador da equação característica do sistema descrito pela equação (21), tem-se que os ganhos de controle são calculados por

$$K_P = \frac{\omega_n^2}{K} \quad (22)$$

e

$$K_D = \frac{2\zeta\omega_n - K}{K} \quad (23)$$

Dessa forma para os controladores deste trabalho foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 3 em que os controladores foram projetados de forma que a malha fechada de movimento angular respondesse mais rapidamente enquanto a malha de movimento linear respondesse de maneira mais amortecida. Esta consideração faz com que o sistema corrija o erro de movimento angular de forma mais rápida que a correção do erro de movimento linear, fazendo com que o ponto **R** descrito na Seção 4 fique mais próximo possível da posição desejada a ser alcançada pelo robô.

Tabela 3. Parâmetros para controlador linear e angular.

Parâmetro	Controle Linear	Controle Angular
$T_a$	3,6 s	1,5 s
$M_p$	0 %	0,01 %
$\zeta$	1,1	0,95
$\omega_n$	1,01 rad/s	2,82 rad/s
$K$	1,27	1,65
$K_P$	0,81	4,82
$K_D$	0,75	2,24

Dessa forma o sistema em malha fechada dos movimentos linear e angular são dados respectivamente por

$$T_S(s) = \frac{0,9551s + 1,02}{s^2 + 2,222s + 1,02} \quad (24)$$

e

$$T_\Theta(s) = \frac{3,686s + 7,938}{s^2 + 5,333s + 7,938} \quad (25)$$

A Figura 6 mostra o efeito da inserção dos controladores linear e angular nas malhas fechadas dos sistemas de movimento linear e angular para uma resposta ao degrau unitário.

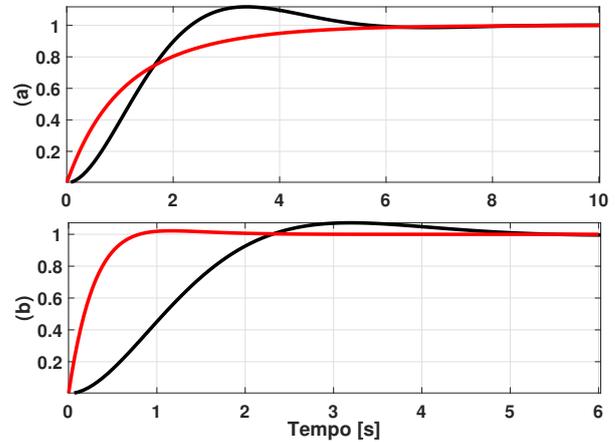


Figura 6. Resposta ao degrau unitário do sistema sem controle (preto) e com controle (vermelho) em malha fechada para os modelos (a) linear [cm] e (b) angular [rad].

## 6. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A simulação busca retratar o que pode ocorrer no sistema durante uma partida de futebol, tais como ruídos de medição e perturbações causadas por colisão. A simulação foi realizada no ambiente Simulink que é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistema dinâmicos e oferece um alta integração com o ambiente Matlab. Os arquivos que retratam toda a estrutura utilizada para realizar a simulação no ambiente Matlab/Simulink podem ser obtidos no link:

[https://github.com/luizfelipepugliese/sbai2021\\_215555#sbai2021\\_215555](https://github.com/luizfelipepugliese/sbai2021_215555#sbai2021_215555)

O arquivo “Codigo\_Controle\_PID.m” descreve o código utilizado para encontrar os modelos linear e angular bem como o projeto dos ganhos dos controladores linear e angular. O arquivo “Simulacao\_Robo.slx” de simulação do ambiente Simulink descreve o diagrama de blocos utilizado para a realizar a simulação do robô para o controle e modelo proposto neste trabalho. O arquivo “Apêndice.pdf” descreve em detalhes o programa e os diagramas de blocos elaborados na simulação.

As subseções a seguir mostram os resultados obtidos na simulação realizada para o robô modelado neste trabalho. Os resultados buscam mostrar como o robô realiza a trajetória de referência imposta a ele e quais são os sinais de controle sobre os motores das rodas durante a execução do trajeto. Busca-se também avaliar os erros relacionados ao movimento linear e angular e como se comportam os sinais de controle sobre os efeitos de ruídos de medição e perturbação nas saídas.

### 6.1 Referência - Circular

A Figura 7 mostra o trajeto desenvolvido pelo robô e a referência a ser rastreada. Nota-se que após o robô encontrar a curva ele consegue segui-la durante toda sua excursão. É visualizado também o efeito da perturbação de um segundo, e que após a retirada deste efeito o sistema consegue rastrear a trajetória de referência novamente.

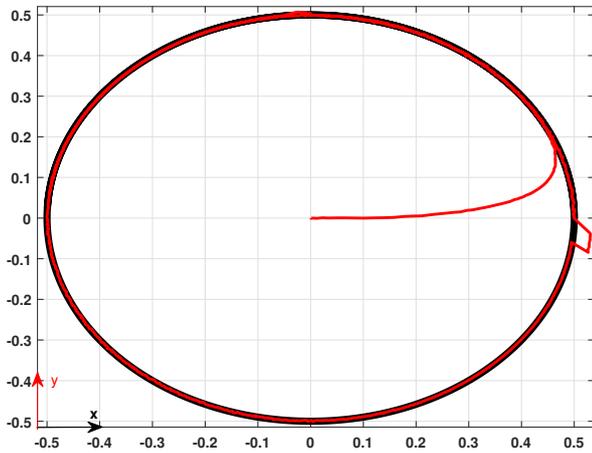


Figura 7. Trajeto desenvolvido pelo robô (vermelho) para uma referência circular (preto).

A Figura 8 mostra os sinais de controle aplicados aos motores do robô e os erros gerados que serão tratados pelo controlador. Nota-se que o aumento significativo do erro angular em torno dos 25 [s] faz com que os sinais de tensão sofram uma inversão de polaridade, este efeito ocorre devido a condições passadas do sistema que forçam o robô a sair da curva de referência e o sistema de controle entende que é melhor para o robô voltar a rastrear a curva fazendo o movimento contrário do que fazia antes. Outro efeito importante é o momento da inserção da perturbação em torno de 100 [s] que causa uma variação nos sinais de controle e praticamente não causa nenhum efeito nos erros, mostrando que as respostas dos controladores rejeitam o efeito da perturbação rapidamente.

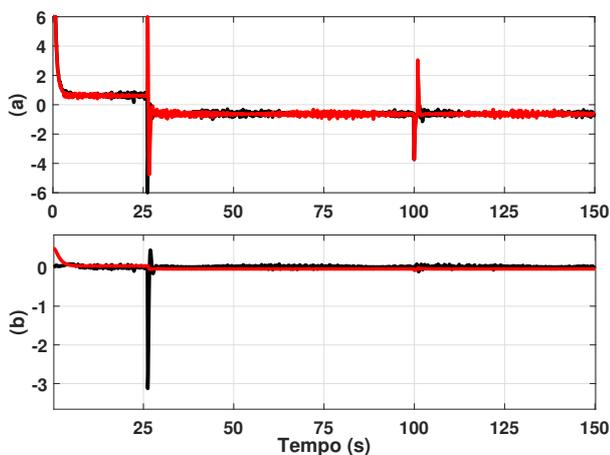


Figura 8. (a) Sinais de controle de tensão [V] para os motores direito (preto) e esquerdo (vermelho) e (b) Erros angular (preto) e linear (vermelho) produzidos.

### 6.2 Referência - Curva de Lissajous

A Figura 9 mostra o trajeto desenvolvido pelo robô e a referência a ser rastreada. Nesta simulação o robô já parte do ponto inicial do trajeto, ou seja, não precisa fazer grandes esforços de controle para fazer o rastreo inicial da referência. Nota-se que o efeito da perturbação faz com que o robô oscile em torno da referência, mas que em seguida volta a realizar o rastreo da mesma.

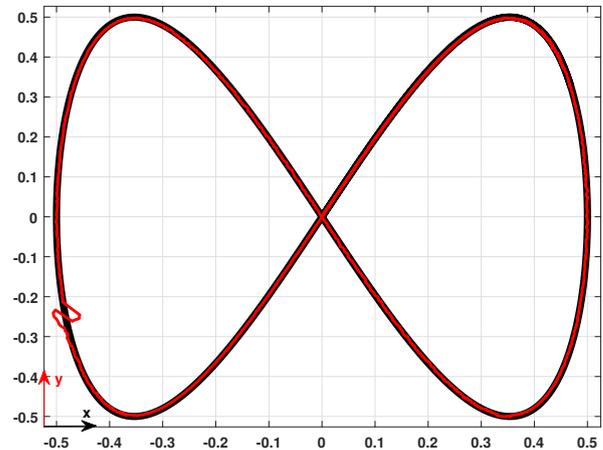


Figura 9. Trajeto desenvolvido pelo robô (vermelho) para a referência curva de lissajous (preto).

A Figura 10 mostra os sinais de controle aplicados aos motores do robô e os erros gerados que serão tratados pelo controlador. Nesta simulação ocorre os mesmos efeitos demonstrados na simulação da referência circular, o efeito de inversão de polaridade do sinal de controle em torno de 50 [s] e o efeito da perturbação em torno de 100 [s]. Nota-se que para ambas as situações o sistema de controle consegue responder de forma satisfatória, mantendo o robô rastreado a referência.

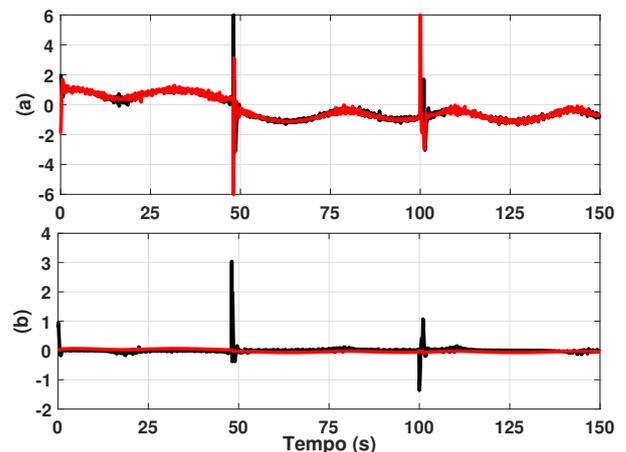


Figura 10. (a) Sinais de controle de tensão [V] para os motores direito (preto) e esquerdo (vermelho) e (b) Erros angular (preto) e linear (vermelho) produzidos.

### 6.3 Referência - MHS

A Figura 11 mostra o trajeto desenvolvido pelo robô e a referência a ser rastreada, em que possui um posição fixa em  $x$  e uma posição  $y$  que varia de forma senoidal.

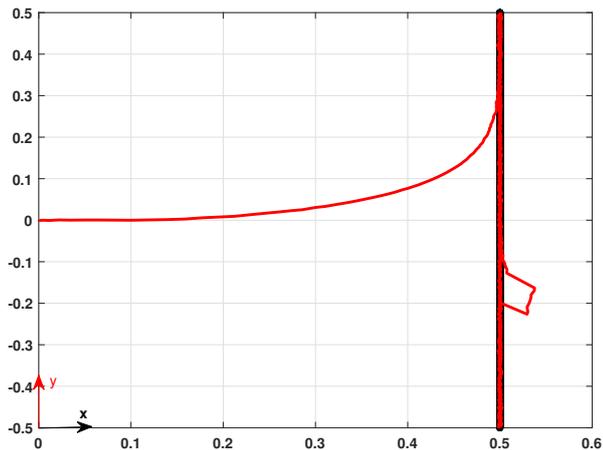


Figura 11. Trajetória desenvolvida pelo robô (vermelho) para uma referência MHS de defesa (preto).

A Figura 12 mostra os sinais de controle aplicados aos motores do robô e os erros gerados que serão tratados pelo controlador. A maior parte dos sinais de controle possuem o formato de uma senoide, isso ocorre pois o robô necessita apenas de alcançar uma extremidade da reta em um sentido e depois voltar para a outra extremidade no sentido oposto ao do movimento anterior. Nota-se também o esforço necessário para combater o efeito da perturbação em torno do tempo de 60 [s]. As grandes oscilações em determinados instantes de tempo no erro angular ocorrem devido aos ruídos nos sistemas de medição no momento em que o robô deve voltar no sentido contrário do movimento que estava realizando anteriormente.

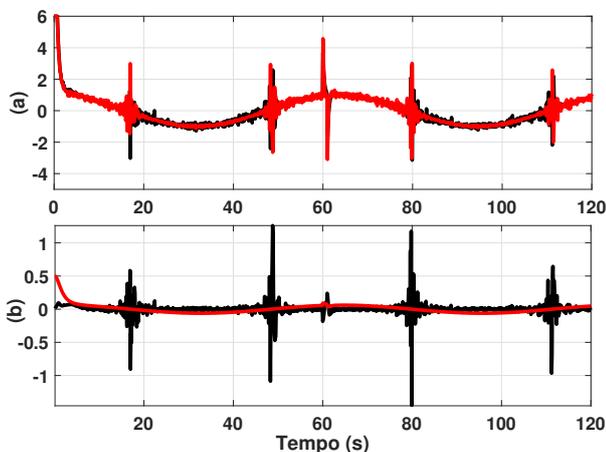


Figura 12. (a) Sinais de controle de tensão [V] para os motores direito (preto) e esquerdo (vermelho) e (b) Erros angular (preto) e linear (vermelho) produzidos.

## 7. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi projetar controladores do tipo PD que atuassem nas malhas de movimento linear e angular do robô em análise de forma que o mesmo rastresse todas as trajetórias impostas a ele. A modelagem do sistema buscou retratar as possíveis limitações mecânicas e elétricas do robô, para que assim as simulações se aproximassem do sistema real.

Os resultados simulados apresentados mostram que o sistema de controle é capaz de rastrear todas as trajetórias utilizadas como referência. A potência dos ruídos de medição inseridos influencia diretamente nos sinais de controle e erro fazendo com que os mesmos apresentem dinâmicas ruidosas. Logo, a inserção do ruído mostra que em um sistema real o algoritmo de visão deve tratar o sinal de forma a evitar ruídos de medição visto que este influencia diretamente no sinal de controle das rodas, o que pode causar efeitos indesejados na saída do sistema. Já a inserção da perturbação mostra que o sistema de controle consegue responder a possíveis colisões que os robôs sofrem durante uma partida de futebol em um sistema real.

## REFERÊNCIAS

- Costa, A.H.R. e Pegoraro, R. (2000). Construindo robôs autônomos para partidas de futebol: O time guaraná. *SBA Controle & Automação*, 11(3), 141–149.
- Fukao, T., Nakagawa, H., e Adachi, N. (2000). Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot. *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 16(5), 609–615.
- Guerra, P.N. (2005). *Modelagem linear e identificação do modelo dinâmico de um robô móvel com acionamento diferencial*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Brasil.
- Klančar, G. e Škrjanc, I. (2007). Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time. *Robotics and autonomous systems*, 55(6), 460–469.
- Lee, T.C., Lee, C.H., e Teng, C.C. (1999). Adaptive tracking control of nonholonomic mobile robots by computed torque. In *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 99CH36304)*, volume 2, 1254–1259. IEEE.
- Oriolo, G., De Luca, A., e Vendittelli, M. (2002). Wmr control via dynamic feedback linearization: design, implementation, and experimental validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10(6), 835–852.
- Ribeiro, G.A.d.A. e Paravidino, L.C. (2017). Controle de robôs móveis para futebol de robôs. Monografia (Bacharel em Engenharia de Controle e Automação), UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, Brazil.
- Shi, H., Lin, Z., Zhang, S., Li, X., e Hwang, K.S. (2018). An adaptive decision-making method with fuzzy bayesian reinforcement learning for robot soccer. *Information Sciences*, 436, 268–281.
- Su, C.Y., Oya, M., e Katoh, R. (2001). Robust adaptive motion/force control of uncertain nonholonomic mechanical systems. In *Proceedings of the 2001 American Control Conference (Cat. No. 01CH37148)*, volume 4, 3268–3273. IEEE.
- Vieira, F.C. (2006). *Controle dinâmico de robôs móveis com acionamento diferencial*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Brasil.
- Youssef, E.S.E. (2013). *Controle por modo deslizante de robôs móveis sobre rodas*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Brasil.