

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR HÍBRIDO PARA FUTEBOL DE ROBÔSGuilherme Augusto Almeida Silva¹ (IC), Juliano de Almeida Monte-Mor (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá - campus Itabira

Este trabalho apresenta o estudo e a comparação de modelos matemáticos para a simulação da trajetória de um robô de acionamento diferencial, desenvolvido para o contexto de competições de futebol de robôs. O foco da análise recai sobre dois modelos principais: um de cinemática diferencial direta e outro baseado na odometria clássica. A metodologia proposta envolve a validação dos modelos por meio da comparação entre as trajetórias simuladas e os dados experimentais coletados de um protótipo físico em um percurso de teste. Concluiu-se que o modelo de cinemática diferencial, apesar dos erros acumulativos inerentes, oferece uma representação visual mais fiel e dinâmica da trajetória original.

Palavras-chave: Estimacão de posicão, Robótica móvel, Modelagem cinemática, Robô diferencial, Simulacão.

Introdução

O desenvolvimento de robôs autônomos para competições como o futebol de robôs demanda ferramentas de simulacão eficientes para acelerar os ciclos de projeto e teste. Dando continuidade aos estudos sobre o tema na instituicão, iniciados com o simulador FUTVSS de Nogueira (2018), este trabalho aprofunda a análise da modelagem cinemática de robôs diferenciais não holonômicos. O foco consiste na comparacão de dois modelos matemáticos para a simulacão de um robô de acionamento diferencial: um baseado na cinemática direta e outro na odometria clássica. Os modelos são validados utilizando dados de velocidade reais, coletados de uma planta funcional, e explora-se, secundariamente, uma abordagem de simulacão baseada em um modelo linear simplificado dos motores.

Metodologia

O sistema utilizado para o desenvolvimento da pesquisa é baseado em um modelo de robôs diferenciais não holonômicos propostos para a resolucão do problema do futebol de robôs, uma categoria de competicão tecnológica que visa o desenvolvimento de dispositivos autônomos com objetivos semelhantes ao futebol convencional, sendo que cada partida ocorre em um campo com medidas padronizadas e possui uma câmara acima deste para aquisicão das informacões de interesse para o jogo.

O robô foi construído utilizando um motor

pololu com caixa de reduçã de 30:1, junto à *encoders* magnéticos de 12 pulsos por revolucão, placa ESP32, rodas com raio de 16 mm e distância entre as rodas de 70mm.

Os motores podem ter sua velocidade controlada a partir de um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*), utilizando de um módulo destinado, presente na placa ESP32, assim como existe uma malha de controle aplicada em *software* para garantir a velocidade desejada para cada roda.

Durante o trabalho, houve duas fontes de dados, uma para aquisicão de posicões e outra para velocidades reais. As posicões são obtidas a partir de um tratamento de imagem aplicado aos *frames* da câmara que é posicionada acima do campo, registrando em um sistema cartesiano de coordenadas x e y, a localizacão do robô. As velocidades de cada roda são medidas a partir dos *encoders* à uma taxa constante de 50Hz. Resultando em uma resolucão de 8,33 RPM por pulso registrado.

A primeira abordagem de simulacão abordada no trabalho foi o uso dos motores reais para gerar os dados necessários no cálculo de posicões do modelo. Este tipo de simulacão exige que se tenha uma planta em condições de funcionamento, mas dispensa a necessidade do campo, pois se baseia na aquisicão das leituras angulares dos *encoders*.

Nesse sentido, foram estudados um modelo de cinemática diferencial direta e um modelo de odometria. No modelo de cinemática diferencial, o sistema é descrito por Aleksandar Haber [2], equaciona as derivadas de posicão e orientacão, que devem ser resolvidas por um método numérico de integracão.,

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

expresso pelo sistema de Equações (1).

$$\begin{aligned} dx &= \frac{v_l}{2} \cos(\theta) + \frac{v_r}{2} \cos(\theta) \\ dy &= \frac{v_l}{2} \sin(\theta) + \frac{v_r}{2} \sin(\theta) \\ d\theta &= -\frac{1}{s} v_l + \frac{1}{s} v_r \end{aligned} \quad (1)$$

Já o modelo clássico de odometria, descrito em [3] e representado pelo sistema de Equações 2, utiliza uma abordagem diferente no desenvolvimento do equacionamento, encontrando um modelo final já em equações algébricas.

$$\begin{aligned} x_t &= x_{t-1} + \frac{\Delta L}{\Delta \theta} [\sin(\theta_{t-1} + \Delta \theta) - \sin(\theta_{t-1})] \\ y_t &= y_{t-1} - \frac{\Delta L}{\Delta \theta} [\cos(\theta_{t-1} + \Delta \theta) - \cos(\theta_{t-1})] \\ \theta_{t-1} &= \theta_t + \Delta \theta \end{aligned} \quad (2)$$

Os modelos anteriores, combinados com um dinamômetro simplificado, permitirão que os motores se movimentem sem que o dispositivo se mova, sendo assim possível simular o sistema real sem a necessidade de um campo.

O sistema consiste de um suporte para fixação do robô sobre dois cilindros independentes montados sobre um eixo comum por meio de rolamentos, como ilustrado na Figura 1. Os cilindros possuem 8 pontos de fixação para parafusos de radialmente simétricos ao eixo de modo a permitir o ajuste do momento de inércia do sistema para uma melhor representação dinâmica do movimento real no campo.

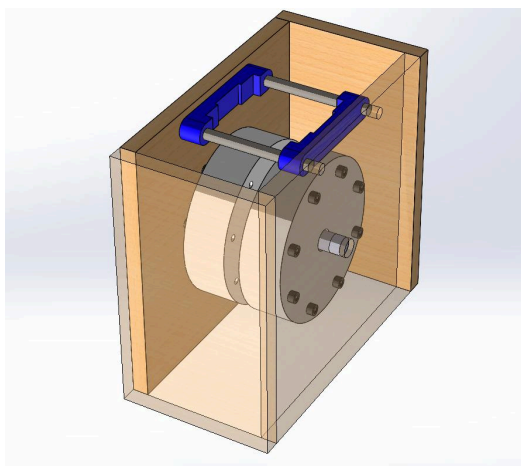


Figura 1 – Modelo 3D da plataforma.

Em paralelo à este trabalho, foi proposto outra

forma de aquisição dos dados de velocidade das rodas, baseada em uma simulação de passo livre considerando um sistema linear. Onde cada motor do robô foi representado por um modelo linear de primeira ordem, sendo as suas saídas usadas para alimentar um dos cálculos de dinâmica direta estudados ao longo do trabalho.

Para a obtenção dos modelos, foi realizado um processo de identificação dos motores para cada nível de tensão aplicada, por meio do sinal PWM. Essa identificação foi feita considerando o controle aplicado ao sistema a fim de linearizar a planta para todos os níveis de tensão aplicados.

A partir da Função de transferência do motor, que se assemelha à um sistema de primeira ordem, realizou-se a sua discretização para uma frequência de amostragem de 20 ms, obtendo um modelo discreto do tipo auto regressivo, descrito por uma equação de diferenças dada pela Equação 3.

$$\begin{aligned} y[n] &= \frac{KT}{2\tau+T} x[n] + \frac{KT}{2\tau+T} x[n-1] \\ &+ \frac{2\tau-T}{2\tau+T} y[n-1] \end{aligned} \quad (3)$$

Resultados e discussão

Durante o processo de validação dos modelos estudados, foram realizadas coletas no campo, com o objetivo de adquirir valores de velocidade que correspondem ao desenvolvimento do caminho planejado. Como movimento de teste, escolheu-se a lemniscata de Bernoulli.

Para a comparação dos resultados, foram feitos gráficos somente com as componentes x e y, desconsiderando o fator tempo do movimento.

Sobre os movimentos, foram coletados em 2 naturezas, um movimento mais curto, com objetivo de verificar se a dinâmica foi bem representada, e outro mais longo, com o objetivo de verificar a ação do efeito do erro acumulativo, presente a aproximação de cada modelo do sistema real.

Considerou-se também o erro inerente do sistema de medição de posição por passos de encoder, o qual só pode ser resolvido a partir de uma mudança no hardware do dispositivo, a fim de obter uma melhor resolução e uma rejeição de ruídos.

A simulação em poucos passos demonstrou que a dinâmica do sistema foi aproximada ao utilizar ambos os modelos, sendo as variações de direção e a distância percorrida são próximas para ambos os sistemas.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Conforme apresentado na Figura 2.

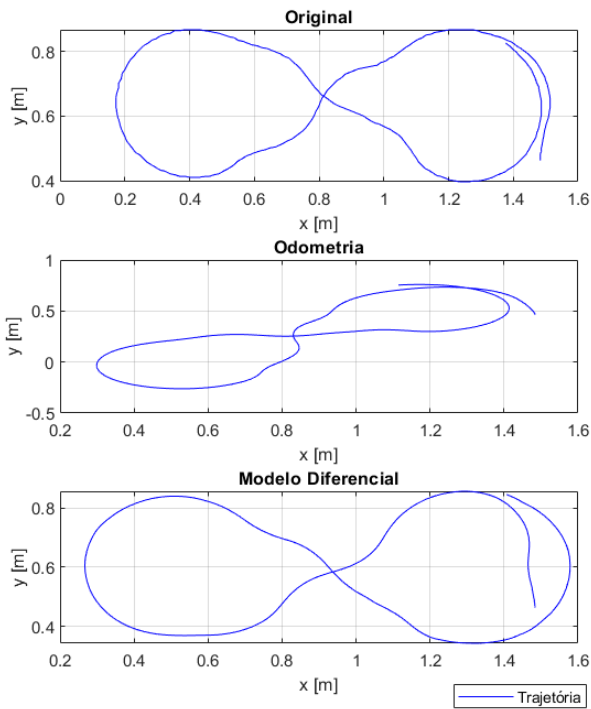


Figura 2 – Comparativo à curto prazo entre os modelos.

A representação calculada pelo modelo diferencial apresentou uma precisão maior em sua relação ao movimento original, fato que se repetiu nos demais casos de teste. Para os movimentos mais longos, foi observado que as imprecisões inerentes ao sistema se acumulavam, fazendo com que a trajetória simulada divergisse consideravelmente do percurso real após um determinado tempo. Conforme mostrado na Figura 3. Neste sentido, a escolha recaiu sobre o método por meio do modelo diferencial, uma vez que este apresentou um movimento visualmente mais próximo e coerente com a trajetória original.

A outra forma de aquisição dos dados de velocidade das rodas, foi desenvolvido a partir do levantamento de curvas de ação para cada determinado nível de tensão. Verificou-se que, com a ação de controle sobre os motores, eles apresentam comportamento linear com valores de τ e K quase que constantes. Sendo a Equação 4 a função de transferência adotada no trabalho.

$$G(s) = \frac{8}{0,2s+1} \quad (4)$$

Considerando essa função como caso geral, obteve-se o gráfico de curva presente na Figura 4, onde

as linhas pontilhadas representam o cálculo de velocidade a partir do modelo e as linhas contínuas são os valores reais obtidos, considerando apenas um dos motores em atuação.

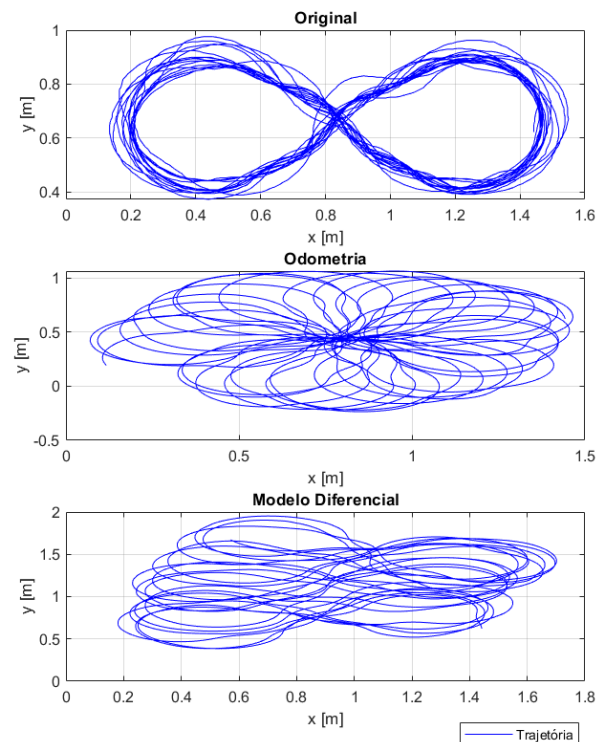


Figura 3 – Comparativo à longo prazo entre os modelos.

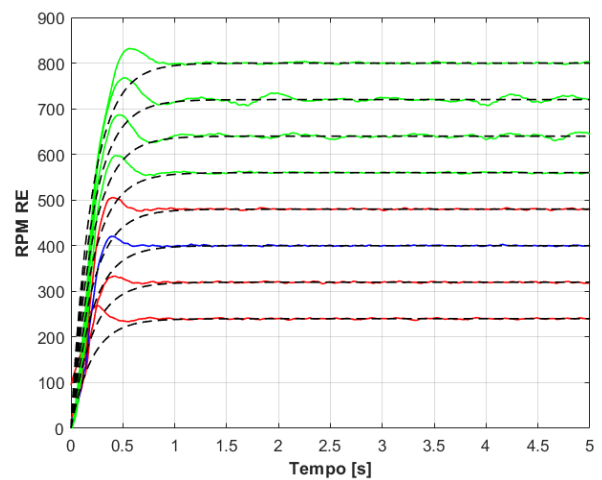


Figura 4 – Comparativo modelo e curva de atuação do motor.

Analisando a curva de resposta de cada condição de atuação, conclui-se que o sistema não é de

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

primeira ordem quando existe a aplicação de um controle de velocidade. Porém, a nível de testes para métodos de simulação, foi possível representar a dinâmica básica do motor apenas com esta representação simplificada. O modelo discreto gerado pela função de transferência é dado pela equação de diferenças da Equação 5.

$$y[n] = 0.38x[n] + 0.38x[n - 1] + 0.90y[n - 1] \quad (5)$$

Utilizando os dados de entrada para simulação da resposta do motor, foi traçado o gráfico da Figura 5, onde é possível observar que a curva de ação do motor simulado acompanha a dinamicidade do real, embora não seja uma representação fiel da realidade.

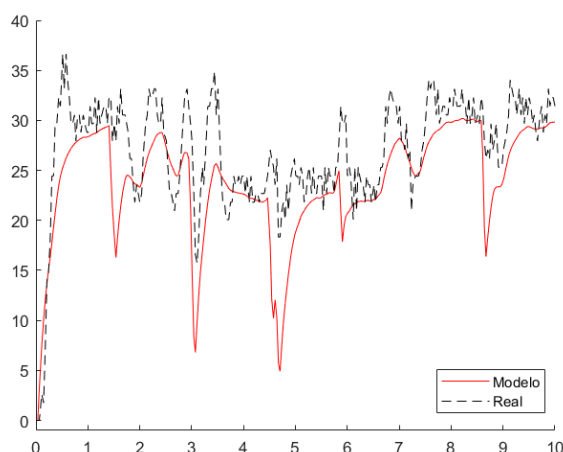


Figura 5 – Comparativo modelo e curva de atuação do motor.

Conclusões

A análise comparativa dos modelos de simulação demonstrou que, embora ambos apresentem erros acumulativos, o modelo de cinemática diferencial oferece uma representação visualmente mais fiel e dinâmica da trajetória original do robô. Adicionalmente, concluiu-se que a simulação dos motores com um modelo linear de primeira ordem, apesar de capturar a dinâmica básica, não representa adequadamente o comportamento do sistema real sob o efeito de um controle de velocidade. De forma geral, apesar dos erros verificados, considera-se que os resultados alcançados neste projeto contribuem para uma melhor aproximação das simulações de futebol com o modelo dinâmico real dos robôs, superando os resultados obtidos em [1].

Por fim, como propostas de trabalhos futuros

podem ser citados: desenvolvimento de uma plataforma mais próxima da realidade a partir da aplicação de um freio magnético, para ajuste das forças de atrito; uso da plataforma desenvolvida para possíveis ajustes de constantes de controle, uma vez que a dinâmica do sistema é bem representada; e aproximar o sistema dos motores do robô ao considerar a resposta, junto da ação de controle aplicada, como um sistema de segunda ordem.

Agradecimentos

Agradecimentos especiais são direcionados à equipe de robótica Drumonsters, pelo apoio técnico e pela contribuição no desenvolvimento do trabalho. A expertise e o incentivo de seus membros foram fundamentais para a execução do projeto.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), que proporcionou o ambiente e os recursos necessários. A pesquisa também contou com o suporte do programa PIBIC/UNIFEI, que viabilizou o estudo e o desenvolvimento do projeto.

Referências

- [1] A. S. Nogueira, "FUTVSS - Simulador de Futebol de Robôs na modalidade Very Small Size," Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia da Computação, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Campus Itabira, Itabira, 2018.
- [2] A. Haber, "Numerical Solution of Forward Kinematics Problem of Differential Drive Robot and 2D Simulation Animation of Trajectory in Python and Pygame," 23 out. 2023. [Online]. Disponível em: <https://aleksandarhaber.com/numerical-solution-of-forward-kinematics-problem-of-differential-drive-robot-and-2d-simulation-animation-of-trajectory-in-python-and-pygame/>. Acessado em: 20 ago. 2025.
- [3] A. A. F. da Silva, "Localização de Robôs Móveis," DCA/UFRN, [2007?]. [Online]. Disponível em: <https://www.dca.ufrn.br/~adelardo/artigos/SBAI07b.pdf>. Acessado em: 20 ago. 2025.
- [4] L. A. Aguirre, *Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não lineares: teoria e aplicação*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.
- [5] J. C. Poletto, "Avaliação de parâmetros para quantificação de ruído de freio em ensaios realizados em dinamômetro inercial," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.