

Atividade 01 - Modelagem de robôs móveis de tração diferencial

Mateus Soares Marques

2 de abril de 2023

1 Introdução

O objetivo desse trabalho é apresentar a modelagem dinâmica do robô móvel de tração diferencial (DDMR - *Differential Drive Mobile Robot*) baseada no trabalho de R. Dhaouadi e A.A. Hatab [1] e a partir dela, simular o modelo dinâmico do robô com controle de velocidade angular a fim de se comparar os resultados da modelagem dinâmica com a simulação do DDMR no software de simulação robótica CoppeliaSim.

Nesse trabalho, a comparação dos resultados da simulação baseada no modelo dinâmico com a simulação do robô no CoppeliaSim é apresentada na forma de gráficos da trajetória desenhada pelo robô no plano, das velocidades das rodas e das velocidades do robô (angular e linear), buscando, a partir das semelhanças e diferenças entre os resultados, entender o que o CoppeliaSim leva em consideração na simulação de um sistema mecânico e o que é abstraído pelo programa.

2 Fundamentação Teórica

Para a compreensão do modelo dinâmico adotado nesse trabalho, é importante se esclarecer alguns conceitos bem como explicar brevemente as duas abordagens consideradas na modelagem: a Lagrangeana e a abordagem de Newton-Euler. Os detalhes do procedimento matemático realizado para obter-se o modelo final são apresentados de maneira mais aprofundada no artigo de Hatab [1].

Os principais pontos da fundamentação teórica do problema da modelagem dinâmica são a definição dos sistemas de coordenadas, o entendimento das restrições de movimento do robô de tração diferencial, o modelo cinemático do robô e, por fim, a compreensão das abordagens de Lagrange e Newton-Euler, sendo a primeira baseada

na análise das energias cinéticas e potenciais do sistema, e a segunda baseada no diagrama de corpo-livre e nas forças que atuam sobre o sistema do robô.

2.1 Sistema de Coordenadas

A fim de descrever a posição do DDMR no espaço, dois sistemas de coordenadas precisam ser definidos.

- Sistema de coordenadas inercial: O sistema de coordenadas global, fixo no plano onde o robô se desloca. Denotado por $\{X_I, Y_I\}$.
- Sistema de coordenadas do robô: Sistema de coordenadas local do robô, sendo preso a ele e, portanto, se movendo com ele. Denotado por $\{X_r, Y_r\}$.

Os dois sistemas de coordenadas são mostrados na Figura 1. A origem do sistema de coordenadas do robô A é definida no ponto médio entre os centros das rodas. Considera-se o centro de massa C do robô sobre o eixo de simetria, a uma distância d de A .

Sendo q^I e q^r a posição e orientação do robô no sistema de coordenadas inercial e do robô, respectivamente, temos:

$$q^I = R(\theta)q^r \quad (1)$$

onde $R(\theta)$ é a matriz de rotação

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Da mesma forma, usamos $R(\theta)$ para relacionar o movimento entre os sistemas de coordenadas, basta tomar \dot{q} , o vetor das velocidades do robô.

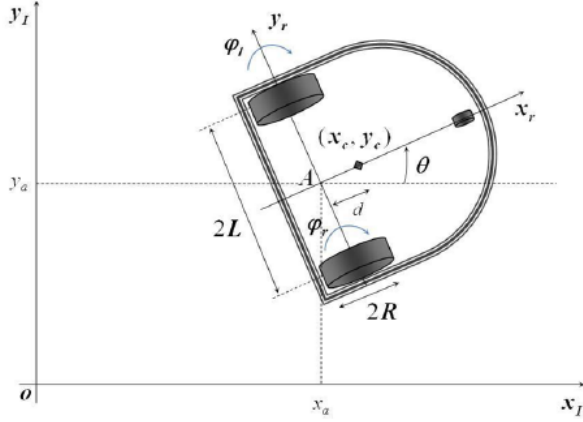


Figura 1: Sistemas de coordenadas

2.2 Restrições Cinemáticas do Robô de Tração Diferencial

Como explicado no artigo [1], o movimento do DDMR é caracterizado por duas equações de restrições não-holonômicas, obtidas de duas importantes suposições:

- Não há derrapagem lateral, ou seja, o robô não possui velocidade na direção axial de suas rodas, podendo se mover para sua esquerda ou direita unicamente em curvas, implicando que:

$$\dot{y}_a^r = 0 \quad (3)$$

logo, em coordenadas inerciais (usando $R(\theta)$)

$$-\dot{x}_a \sin \theta + \dot{y}_a \cos \theta = 0 \quad (4)$$

- Não há escorregamento das rodas, ou seja, o rolamento é puro. Dessa forma, a velocidade dos pontos de contato das rodas com o plano são relacionadas com a velocidade angular das rodas por

$$\begin{cases} \nu_{pR} = R\dot{\phi}_R \\ \nu_{pL} = R\dot{\phi}_L \end{cases} \quad (5)$$

Desenvolvendo algebricamente as equações, primeiro expressando a equação (5) em termos da velocidade da origem A e, em seguida, usando a matriz $R(\theta)$ para expressar as velocidades nas coordenadas inerciais, as equações das restrições podem ser expressas por

$$\Lambda(q)\dot{q} = 0 \quad (6)$$

onde

$$\Lambda(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & L & -R & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & -L & 0 & -R \end{bmatrix} \quad (7)$$

e

$$\dot{q} = [\dot{x}_a \quad \dot{y}_a \quad \dot{\theta} \quad \dot{\phi}_R \quad \dot{\phi}_L] \quad (8)$$

As equações (7) e (8) são importantes para a modelagem dinâmica do sistema.

2.3 Modelo Cinemático

O modelo cinemático é uma forma de abordar o problema do movimento do robô sem levar em consideração as forças que afetam esse movimento. No caso do movimento do DDMR, o modelo cinemático possibilita representar as velocidades do robô (velocidade de translação e de rotação) como uma função das velocidades angulares das rodas e da geometria do DDMR.

As velocidades de translação (ν) e rotação (ω , velocidade de guinada) são dadas por

$$\nu = \frac{\nu_R + \nu_L}{2} = R \frac{(\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L)}{2} \quad (9)$$

$$\omega = \frac{\nu_R - \nu_L}{2L} = R \frac{(\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L)}{2L} \quad (10)$$

É importante se expressar as velocidades angulares das rodas como função de ν e ω , uma vez que se deseja configurar essas velocidades para um determinado deslocamento no plano.

$$\dot{\phi}_R = \frac{\nu + L\omega}{R} \quad (11)$$

$$\dot{\phi}_L = \frac{\nu - L\omega}{R} \quad (12)$$

Manipulando as equações (9) e (10) sabendo que $\dot{\theta} = \omega$, $\dot{x}_a = \nu$ e $\dot{y}_a = 0$ se obtém o modelo cinemático

$$\dot{q}^I = \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

O modelo da equação (13) será utilizado na simulação do sistema dinâmico para calcular o deslocamento do robô no plano, enquanto ν e ω são

obtidos da modelagem dinâmica, apresentada nas próximas seções.

Apesar de ser uma maneira menos complexa e, portanto, mais rápida de descrever o movimento do robô, o modelo cinemático é menos preciso que o dinâmico, principalmente quando há altas velocidades e alto torque envolvidos.

2.4 Modelagem Dinâmica do Robô de Tração Diferencial

Em contrapartida ao modelo cinemático, o modelo dinâmico do sistema é construído levando-se em consideração as forças que atuam sobre o sistema. O modelo dinâmico do DDMR é essencial para a análise da simulação, como frisado por Hatab [1].

Um DDMR não-holonômico com n coordenadas generalizadas (q_1, q_2, \dots, q_n) e sujeito a m restrições pode ser descrito pela seguinte equação de movimento

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad (14)$$

onde $M(q)$ é uma matriz $n \times n$ da inércia, $V(q, \dot{q})$ é a matriz centripetal e de Couriolis, $F(\dot{q})$ é a matriz de fricção superficial, $G(q)$ é o vetor gravitacional, τ_d é o vetor de perturbações finitas (incluindo dinâmicas não modeladas), $B(q)$ é a matriz de entrada, τ é o vetor de entrada, $\Lambda^T(q)$ é a matriz associada as restrições cinemáticas e λ é o vetor dos multiplicadores de Lagrange.

A equação (14) será útil no entendimento da abordagem de Lagrange, explicada em seguida.

2.4.1 Abordagem Dinâmica de Lagrange

Como dito anteriormente, a abordagem Lagrangeana deriva as equações de movimento considerando as energias potenciais e cinéticas do sistema. A equação de Lagrange pode ser escrita na seguinte forma

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial q_i} = F - \Lambda^T(q)\lambda \quad (15)$$

onde $L = T - V$ é a função Lagrangeana, T é a energia cinética do sistema, V é a energia potencial do sistema, q_i são as coordenadas generalizadas, F é o vetor generalizado de forças, Λ é a matriz

de restrições, λ é o vetor dos multiplicadores de Lagrange associado as restrições.

O primeiro e principal passo na abordagem de Lagrange é encontrar as energias cinéticas e potenciais do sistema. Como o robô está sobre o plano $\{X_I, Y_I\}$, a energia potencial do DDMR é considerada zero. Para o DDMR as coordenadas generalizadas são dadas por (8). O processo de encontrar as energias cinéticas é detalhado no artigo [1]. Encontradas as energias cinéticas (T), substitui-se os valores em (15), onde $\Lambda(q)$ é dada por (7). Feito isso, põe-se as equações obtidas na forma geral (14), onde considerou-se $F(\dot{q})$, $G(q)$ e τ_d iguais a zero. Assim

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad (16)$$

onde

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -md \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & m & md \cos \theta & 0 & 0 \\ -md \sin \theta & md \cos \theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -md\dot{\theta} \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -md\dot{\theta} \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \Lambda^T(q)\lambda = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta & \sin \theta \\ 0 & L & -L \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix}$$

Do modelo cinemático abordado na seção anterior é possível, partindo das equações (9) e (10), se chegar a

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos \theta & R \cos \theta \\ R \cos \theta & R \cos \theta \\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} \\ 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \eta \quad (17)$$

onde $\eta = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix}$.

A equação (17) pode ser reescrita na forma

$$\dot{q} = S(q)\eta \quad (18)$$

A derivada no tempo de (18) nos dá

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)\dot{\eta} + S(q)\ddot{q} \quad (19)$$

Substituindo (18) e (19) em (16) e depois rearranjando os termos, chega-se a

$$\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta = \bar{B}(q)\tau \quad (20)$$

onde

$$\bar{M}(q) = S^T(q)M(q)S(q)$$

$$\bar{V}(q, \dot{q}) = S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V(q, \dot{q})S(q)$$

$$\bar{B}(q) = S^T(q)B(q)$$

A equação (20) é uma forma reduzida da equação (16). Os termos acima podem ser calculados a partir dos já conhecidos valores de $S(q)$, $M(q)$, $V(q, \dot{q})$ e $B(q)$. Assim

$$\begin{cases} \left(m + \frac{2I_w}{R^2}\right)\dot{\nu} - m_c d\omega^2 = \frac{1}{R}(\tau_R + \tau_L) \\ \left(I + \frac{2L^2}{R^2}I_w\right)\dot{\omega} + m_c d\omega\nu = \frac{L}{R}(\tau_R - \tau_L) \end{cases} \quad (21)$$

onde m é a massa total do robô; m_c é a massa da plataforma do robô, sem as rodas; d é a distância entre A e C , I é a inércia total do robô (rodas mais plataforma), I_w é a inércia das rodas, L é a distância de A ao centro de uma das rodas, R é o raio da roda e τ_R e τ_L são os torques aplicados sobre as rodas. O modelo do DDMR adotado nas simulações corresponde a equação (21).

2.4.2 Abordagem de Newton-Euler

O primeiro e mais importante passo na abordagem de Newton-Euler é desenhar o diagrama de corpo-livre do robô (Figura 2). Dado o diagrama, as seguintes notações são introduzidas.

(ν_u, ν_w) representa a velocidade do centro de massa do robô no sistema de coordenadas local, sendo ν_u a velocidade longitudinal e ν_w a velocidade lateral; (a_u, a_w) representa a aceleração do centro de massa do robô; (F_{uR}, F_{uL}) são as forças longitudinais exercidas sobre o robô pelas rodas direita e esquerda, respectivamente; (F_{wR}, F_{wL}) são as forças laterais exercidas sobre o robô pelas rodas direita e esquerda, respectivamente; θ é a orientação do robô; ω é a velocidade angular do robô; m é a massa total do robô e I é o momento de inércia de guinada com relação ao centro de massa.

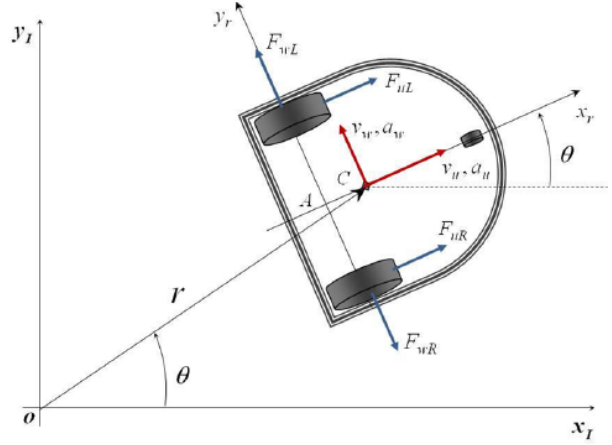


Figura 2: Diagrama de corpo-livre do robô.

Como pode ser visto no diagrama de corpo-livre da Figura 2, as únicas forças que atuam sobre o robô são as forças exercidas pelos atuadores sobre as rodas. Representando a posição do robô em coordenadas polares, a posição do centro de massa do robô pode ser dada pelo vetor complexo

$$\hat{r} = r e^{j\theta} \quad (22)$$

Derivando o vetor da equação (22) no tempo, chegamos a

$$\dot{\hat{r}} = \dot{r}e^{j\theta} + jr\dot{\theta}e^{j\theta} \quad (23)$$

$$\ddot{\hat{r}} = \ddot{r}e^{j\theta} + 2j\dot{r}\dot{\theta}e^{j\theta} + jr\ddot{\theta}e^{j\theta} - r\dot{\theta}^2e^{j\theta} \quad (24)$$

Reescrevendo as equações (23) e (24) em termos das componentes tangenciais e radiais

$$\dot{\hat{r}} = [\dot{r}]e^{j\theta} + [r\dot{\theta}]e^{j(\theta+\frac{\pi}{2})} \quad (25)$$

$$\ddot{\hat{r}} = [\ddot{r} - r\dot{\theta}^2]e^{j\theta} + [2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}]e^{j(\theta+\frac{\pi}{2})} \quad (26)$$

As velocidades e acelerações tangenciais e radiais são definidas como

$$\nu_u = \dot{r} \quad (27)$$

$$\nu_w = r\dot{\theta} \quad (28)$$

$$a_u = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 \quad (29)$$

$$a_w = 2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} \quad (30)$$

A partir das equações (27) - (30), podemos escrever as seguintes relações entre as componentes

tangenciais e radiais da velocidade e aceleração do robô:

$$a_u = \dot{v}_u - \nu_w \dot{\theta} \quad (31)$$

$$a_w = \dot{v}_w - \nu_u \dot{\theta} \quad (32)$$

O próximo passo é escrever a segunda lei de Newton do movimento no sistema de coordenadas do robô e encontrar as relações entre forças, torques e acelerações. O DDMR exibe dois tipos de movimento: translações nas direções radiais e tangenciais; e rotação em torno do eixo perpendicular ao plano de movimento passando pelo centro de massa C . Sendo M a massa total do robô e J o momento de inércia total do robô com respeito ao centro de massa, as equações dinâmicas são

$$Ma_u = F_{uL} + F_{uR} \quad (33)$$

$$Ma_w = F_{wL} + F_{wR} \quad (34)$$

$$J\ddot{\theta} = (F_{uR} - F_{uL})L + (F_{wR} - F_{wL})d \quad (35)$$

Substituindo as equações (31) e (32) nas equações acima

$$\dot{v}_u = \nu_w \dot{\theta} + \frac{F_{uL} + F_{uR}}{M} \quad (36)$$

$$\dot{v}_w = -\nu_u \dot{\theta} + \frac{F_{wL} - F_{wR}}{M} \quad (37)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{L}{J}(F_{uR} - F_{uL}) + \frac{d}{J}(F_{wR} - F_{wL}) \quad (38)$$

A velocidade lateral do ponto central A é dada por $v_w - d\dot{\theta}$. Assim sendo, na ausência de derrapagem $v_w = d\dot{\theta}$. Substituindo v_w nas equações (36) e (37) e combinando-as com (38)

$$\dot{v}_u = d\dot{\theta}^2 + \frac{1}{M}(F_{uR} + F_{uL}) \quad (39)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{L}{Md^2 + J}(F_{uR} - F_{uL}) - \frac{Md\nu_u}{Md^2 + J}\dot{\theta} \quad (40)$$

As equações (39) e (40) podem ser reescritas para finalmente obtermos as equações dinâmicas em função dos torques dos atuadores.

$$M\dot{v}_u \dot{\theta} - Md\dot{\theta}^2 = \frac{1}{R}(\tau_R + \tau_L) \quad (41)$$

$$(Md^2 + J)\ddot{\theta} + Md\nu_u \dot{\theta} = \frac{L}{R}(\tau_R - \tau_L) \quad (42)$$

Percebe-se que a abordagem de Newton-Euler não levou em consideração a massa e a inércia das rodas e o robô foi tratado como um corpo rígido único. Portanto, as formulações são equivalentes se $M = m_c$ e $J = I_c$.

2.5 Modelagem do Atuador

O robô escolhido para as simulações foi o Pioneer 3-DX (P3DX). No P3DX, os atuadores são motores DC, considerados como servo atuadores. Em um motor DC controlado por tensão de armadura, que é o caso do nosso sistema, a tensão de armadura v_a é usada como entrada de controle. Para um motor DC de imã permanente, temos as seguintes equações para o circuito de armadura

$$\begin{cases} v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \\ e_a = K_b \omega_m \\ \tau_m = K_t i_a \\ \tau = N \tau_m \end{cases} \quad (43)$$

onde i_a é a corrente de armadura; (R_a, L_a) são a resistência e a indutância da armadura, respectivamente; e_a é a força contra-eletromotriz; ω_m é a velocidade angular do rotor; τ_m é o torque do motor; (K_t, K_b) são as constantes de torque e força contra-eletromotriz, respectivamente; N é a relação de engrenagem e τ é o torque de saída aplicado sobre a roda.

Como os motores do DDMR são mecanicamente acoplados às rodas do robô através das engrenagens, as equações de movimento dos motores são diretamente relacionadas à dinâmica do DDMR. Portanto, cada motor DC tem

$$\begin{cases} \omega_{mR} = N\dot{\phi}_R \\ \omega_{mL} = N\dot{\phi}_L \end{cases} \quad (44)$$

Combinando a equação (43) com o modelo dinâmico do DDMR têm-se o modelo completo do robô, incluído os atuadores. O modelo cinemático (13) foi adicionado em cascata com esse modelo completo, a fim de se obter a trajetória do robô no plano. O sistema completo utilizado nas simulações é explicado nas próximas seções.

3 Desenvolvimento

O robô considerado nas simulações foi o Pioneer 3DX, cujo os parâmetros constam na Tabela 1.

O cenário de simulação considerado consiste em aplicar uma tensão em cada um dos motores e observar as velocidades das rodas, bem como as velocidades do robô e sua trajetória no plano. Como

$2R$	$0,195m$
d	$0,04451m$
L	$0,1655m$
m_c	$13Kg$
m_w	$1,5Kg$
I_c	$0,1307Kg \cdot m^2$
I_w	$0,04Kg \cdot m^2$
I_m	$0,02Kg \cdot m^2$
R_a	$0,71\Omega$
I_a	$0,66mH$
K_b	$0,023V/(rad/s)$
K_t	$0,029N \cdot m/A$
N	$38,3$

Tabela 1: Parâmetros do P3DX

o CoppeliaSim não modela os atuadores, não é possível usar as tensões elétricas diretamente como entrada.

Também não é possível usar os conjugados como entrada, pois o CoppeliaSim só permite configurar o torque máximo das juntas. A maneira como o CoppeliaSim considera a relação entre torque e velocidade na junta não é realista: o torque máximo configurado para a junta é aplicado até que ela atinja a velocidade alvo, depois o torque não é aplicado mais. Isso não condiz com a dinâmica da maioria dos atuadores, também não condizendo com a dinâmica do motor DC usado no P3DX.

Uma vez que não é possível controlar o torque aplicado as juntas, a variável controlada usada no CoppeliaSim foi a velocidade angular das rodas. Para que seja coerente comparar os resultados da simulação do sistema no Simulink aos do CoppeliaSim, utilizou-se as velocidades das rodas obtidas no Simulink como entrada do sistema simulado no Coppelia. Dessa forma é possível simular o sistema completo e comparar as dinâmicas do Coppelia e da simulação do modelo do DDMR obtido na fundamentação teórica.

O modelo construído no Simulink foi baseado na abordagem de Lagrange e pode ser visto em detalhe na Figura 4.

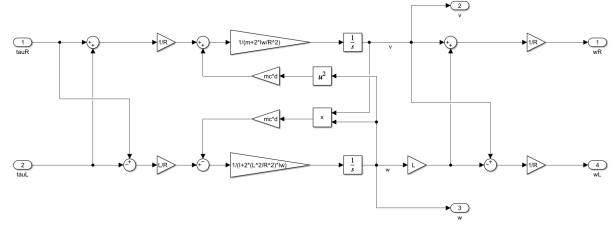


Figura 3: Modelo do DDMR.

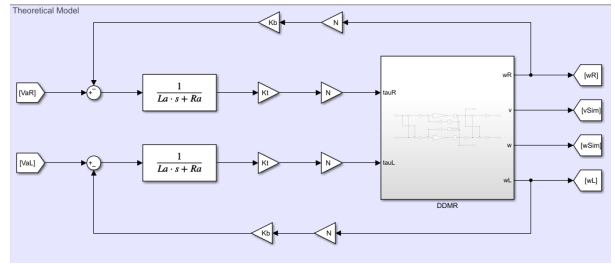


Figura 4: Modelo do DDMR com os atuadores.

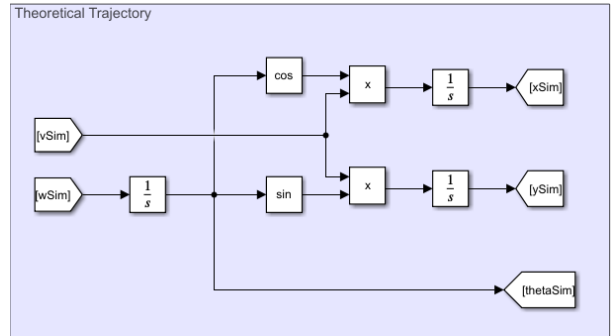


Figura 5: Modelo cinemático.

4 Resultados

O cenário considerado é representado pelas entradas de tensão da Figura 6. Nas Figuras 7 - ?? são apresentados os resultados da simulação, onde observou-se as velocidades de roda geradas pelo modelo dinâmico, as velocidades linear e angular desenvolvidas pelo modelo no Simulink e pelo movimento do Pioneer P3DX no CoppeliaSim, bem como a trajetória prevista pelo modelo e a trajetória descrita pelo robô no Coppelia.

As tensões foram aplicadas de maneira gradual, de forma minimizar o impacto da rotação da roda boba no início do movimento. O que se percebe dos resultados é a semelhança entre o movimento previsto pela modelagem dinâmica e o movimento desenvolvido pelo robô no Coppelia; tanto em termos de trajetória quanto de velocidades desenvolvidas. Esse comportamento similar se dá pela baixa velocidade e massa do robô em questão, que aproximam sua dinâmica do modelo cinemático na relação entre velocidades dos atuadores e velocidades linear e angular da plataforma. Apesar da análise qualitativa indicar uma forte correspondência entre os resultados, as diferenças que se evidenciam principalmente nas trajetórias se dão, dentre outros motivos, pelas considerações feitas na modelagem dinâmica que não são abstraídas pela simulação de corpos rígidos do Coppelia. São elas a presença da roda boba, como já comentado, e os atritos e derrapagens das rodas. Outras disparidades são o resolvidor escolhido no Simulink (Runge-Kutta de quarta ordem) e no Coppelia (Bullet 2.78) e a modelagem dos atuadores, que no Coppelia são tratados como geradores de velocidade de torque constante aplicado em transitório.

Referências

- [1] Dhaouadi R, Hatab AA (2013) Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework. Adv Robot Autom 2: 107. doi: 10.4172/2168-9695.1000107.

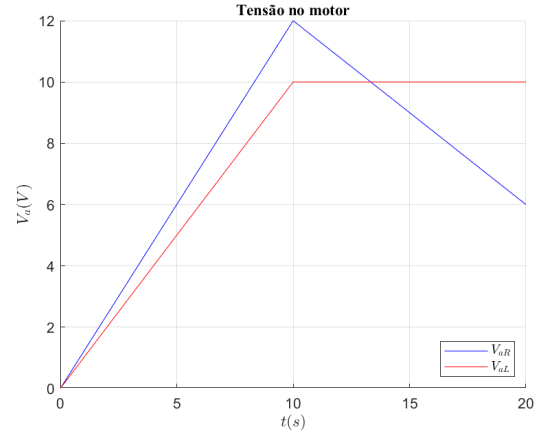


Figura 6: Tensão aplicada nos motores.

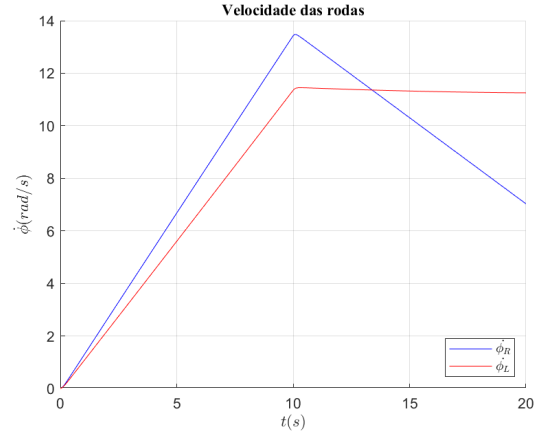


Figura 7: Velocidade desenvolvida pelas rodas.

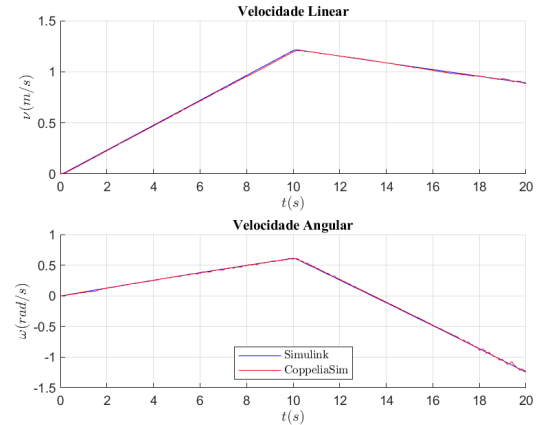


Figura 8: Velocidade do DDMR.

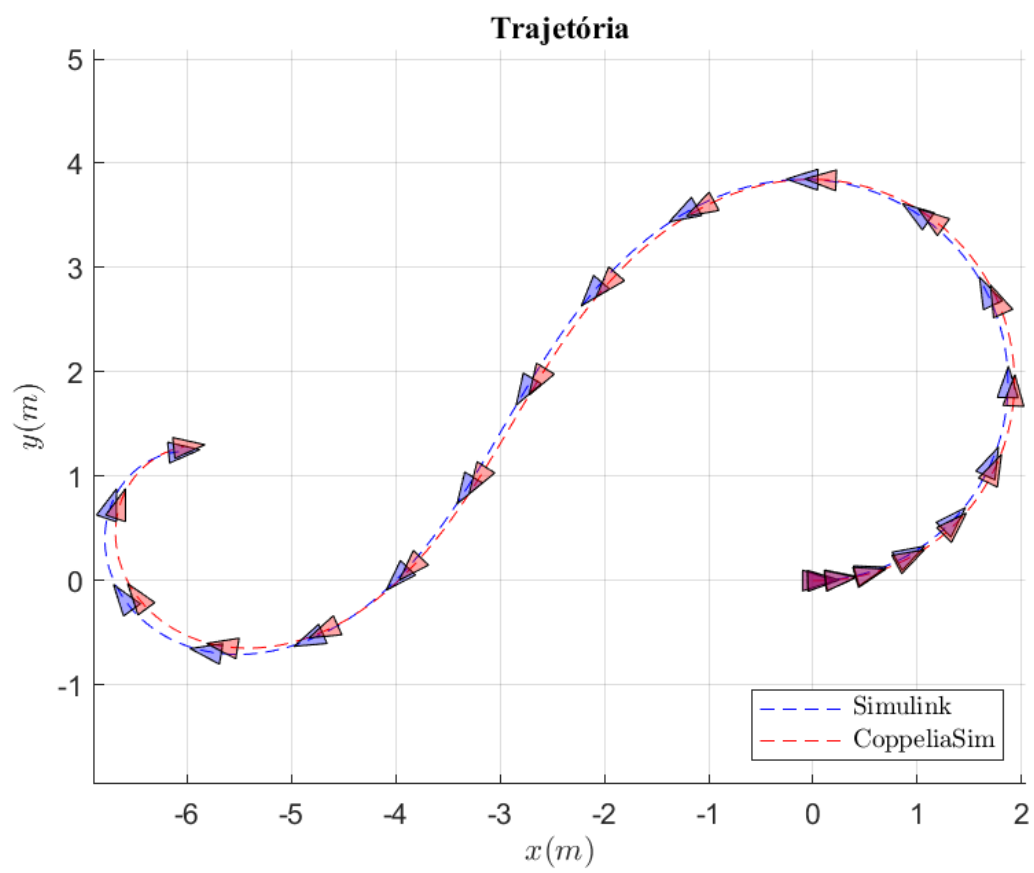


Figura 9: Trajetória do DDMR.