

CARATERIZAÇÃO PARAMETRICA, COM BASE EM SIMULAÇÃO, DE MOTORES ELETRICOS PARA APLICAÇÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS AGRÍCOLAS

ELMER A. G. PEÑALOZA¹, YAN C. ALEGRE², TAILON A. PODEWILS³, SIGMAR DE LIMA⁴, LUCIANO A. LESTON⁵, CARLOS G. C. NEVES⁶

¹ Prof. Dr., Dep. Eng. Controle e Automação (UFPEL), eagpenaloza@ufpel.edu.br

² Graduando, Dep. Eng. Eletrônica (UFPEL), yan.alegre@ufpel.edu.br

³ Graduando, Dep. Eng. Eletrônica (UFPEL), tailon.andre@ufpel.edu.br

⁴ Prof. Dr., Dep. Eng. Controle e Automação (UFPEL), sigmar.lima@ufpel.edu.br

⁵ Prof. Dr., Dep. Eng. Controle e Automação (UFPEL), luciano.leston@ufpel.edu.br

⁶ Prof. Dr., Dep. Eng. Controle e Automação (UFPEL), carlos.neves@ufpel.edu.br

Apresentado no
LI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2022
27 a 29 de outubro de 2022 - Pelotas - RS, Brasil

RESUMO: A escolha adequada dos atuadores principais de movimentação (motores) e seus respectivos sistemas odométricos, é uma grande responsabilidade a qual deve ser baseada em conhecimentos estritos de parâmetros levantados das dinâmicas implícitas no sistema, assim como nas dinâmicas decorrentes do ambiente de trabalho e da atuação do veículo elétrico no campo. Por conseguinte, a construção de ambientes de simulação dinâmica, que combinem modelos analíticos com parâmetros reais da aplicação, fornecem bases sólidas para auxílio na tomada de decisão nas etapas de design e caracterização de dispositivos de atuação para veículos elétricos aplicados na agricultura. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um ambiente de simulação que permite configurar e testar diferentes dinâmicas de um veículo agrícola para realizar análises e levantamentos de parâmetros físicos com a finalidade de obter bases de escolha de atuadores dinâmicos. Assim, são apresentados os modelos analíticos (cinemáticos e dinâmicos) para um veículo elétrico não holonômico, construção de trajetórias de seguimento e a metodologia de construção do ambiente. Os resultados obtidos servem como base de conhecimento para a tomada de decisão no projeto de construção.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos elétricos agrícolas; Cinemática; Dinâmica; Simulação dinâmica.

DC MOTORS ELECTRICAL PARAMETERS CHARACTERIZATION BASED ON DYNAMIC SIMULATION FOR APPLICATION IN AUTONOMOUS AGRICULTURAL VEHICLES

ABSTRACT: The adequate choice of main movement actuators (motors) and their respective odometry systems is a great responsibility which should be based on strict knowledge of parameters raised from the dynamics in the electrical vehicle, as well as the workplace dynamics and the performance of the electric vehicle in the agricultural fields. Therefore, the construction of dynamic simulation environments, which combine analytical models with real application parameters, provide solid bases to assist in the decision making in the design steps and characterization of acting devices for electric vehicles applied in agriculture. In this work is presented the development of a simulation environment that allows configure and test different dynamics of agricultural electrical vehicles to perform analysis and surveys of physical parameters in order to obtain bases of choice for dynamic actuators.

KEYWORDS: Electric Agricultural Vehicles; Kinematics; Dynamics; Dynamic simulation.

INTRODUÇÃO: Os desafios de autonomia energética, os quais vêm tendo mais relevância nos últimos tempos, permitem observar a necessidade de utilizar motores elétricos que consigam movimentar grandes cargas e que trabalhem de uma forma eficiente, i.e., com grande autonomia, poucas perdas de potência, baixo impacto ecológico e de forma econômica. Na atualidade, existem desafios tecnológicos relacionados à aplicação de veículos elétricos (VE) para diferentes segmentos industriais, assim como na adoção de políticas que propendam pela substituição de veículos de combustão por VEs estão sendo abordados por países desenvolvidos e em desenvolvimento (OCDE, 2019). Um dos principais problemas detectados, para VE aplicados aos processos agrícolas, é a limitação da autonomia e limitação de energia para carregar grandes pesos. Este tipo de problemas é acentuado em função das grandes distâncias que devem ser percorridas e os maiores volumes de produção que existem em agricultura de média e grande escala.

A adoção de veículos elétricos e plataformas robóticas autônomas para a agricultura, representa benefícios econômicos e ecológicos, assim como fornecem um grau de inteligência, tornando os processos mais precisos e eficientes (ALEGRE, 2021). Nesse contexto, este trabalho apresenta um ambiente de simulação que, com base em parâmetros físicos de um veículo elétrico não-honolômico, calcula características cinemáticas e dinâmicas que servem como base de informações para a análise da dinâmica para a tomada de decisão no processo de construção de veículos elétricos para aplicação em processos agrícolas.

MATERIAL E MÉTODOS: A construção dos modelos cinemáticos e dinâmicos têm como base as características geométricas e de localização espacial do veículo não honolômico ilustrado na Figura 1. A posição e orientação do veículo é referenciada no ponto O e os eixos Y e X do plano Cartesiano (ALEGRE, 2021).

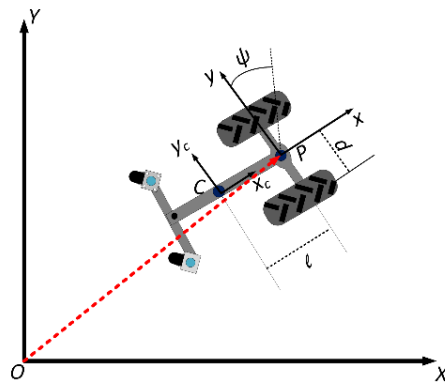


FIGURA 1. Cinemática de movimento do veículo.

Os pontos C e P estão caracterizados como o centro de massa e o centro das rodas dianteiras respectivamente. As rodas dianteiras atuam gerando o torque para movimentação e orientação do veículo. Assim, o modelo cinemático para o veículo está representado pelo seguinte conjunto de equações:

$$\dot{x} = \frac{r}{2} \cos(\varphi)(\omega_R + \omega_L) \quad (1)$$

$$\dot{y} = \frac{r}{2} \sin(\varphi)(\omega_R + \omega_L) \quad (2)$$

em que,

φ – orientação do veículo [rad];

ω_R e ω_L – velocidades angulares roda direita e esquerda [rad/s];

r – raio da roda [m];

\dot{x} e \dot{y} – velocidades lineares no eixo x e y [m/s];

Para a construção do modelo dinâmico do veículo frequentemente é utilizado o vetor de coordenadas gerais $q = [x, y, \varphi]$ (COOPER, 2018). Para veículos holonômicos existe restrição de movimento no eixo y . A energia cinética produzida pelo movimento do veículo está caracterizada pela seguinte expressão:

$$K = \frac{1}{2}m\dot{x}_c^2 + \frac{1}{2}m\dot{y}_c^2 + \frac{1}{2}I\dot{\varphi}^2 \quad (3)$$

em que,

\dot{x}_c e \dot{y}_c – velocidade das coordenadas inerciais do centro de massa C [m/s];

m – massa do veículo [kg];

I – momento de inercia [kg·m²].

As equações do movimento de um sistema mecânico, podem ser obtidas através do Lagrangiano L , o qual é definido como a diferença entre a energia cinética T e potencial $U(L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - U(q))$. Considerando $A(q)$ o vetor que representa o conjunto de restrições, as equações de estado para sistemas não holonômicos podem ser calculadas com a relação: $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = Q_{NP} + A(q)\lambda$, na qual Q_{NP} são as forças não potenciais aplicadas e λ é o vetor dos multiplicadores de Lagrange (SICILIANO, 2008). A partir da relação dinâmica resultante, pode-se obter a relação entre os torques da cada roda (T_{Rm} roda direita e T_{Lm} roda esquerda) em função das velocidades angulares e lineares do sistema (ALEGRE, 2021):

$$T_{Rm} = \frac{mr}{2N} \left[\iota\omega^2 + \dot{v} + \frac{\dot{\omega}(I + m\iota^2)}{dm} - \frac{\iota\omega v}{d} + \frac{4g\mu_d}{\pi} \tan^{-1}(100(v + \iota\omega)) \right] \quad (4)$$

$$T_{Lm} = \frac{mr}{2N} \left[\iota\omega^2 + \dot{v} - \frac{\dot{\omega}(I + m\iota^2)}{dm} + \frac{\iota\omega v}{d} + \frac{4g\mu_d}{\pi} \tan^{-1}(100(v - \iota\omega)) \right] \quad (5)$$

em que,

g – aceleração gravitacional [m/ s²];

μ_d – coeficiente dinâmico de atrito;

v – velocidade lineal [m/s];

ω – velocidade angular de esterçamento [rad/s];

Assim, a partir dos modelos cinemáticos descritos por (1) e (2) e os modelos dinâmicos descritos em (3), (4) e (5), obtêm-se a base de conhecimento necessária para construir o ambiente de simulação dinâmica. Neste sentido, alguns dos principais parâmetros físicos usados no ambiente de simulação construído foram determinados a partir de aplicações de maquinaria agrícola para as quatro principais culturas da região sul do Brasil, i.e., arroz, soja, milho e tabaco. O ambiente de simulação é desenvolvido de forma flexível, i.e., pode-se adaptar a diferentes parâmetros ambientais de aplicação.

Um dos principais problemas, em veículos elétricos para aplicações agrícolas, é atingir a capacidade de movimentar grandes pesos. Em função disso, no ambiente de simulação foi utilizado o valor de $m = 300$ [kg], o comprimento ao centro do veículo $\iota = 0,80$ [m], o raio das rodas $r = 0,30$ [m] e a distância da roda ao centro de massa $d = 0,60$ [m]. Para atingir altos patamares de torque, é acrescentado ao modelo uma caixa de transmissão de relação $N = 50: 1$, assim pode-se movimentar grandes pesos com momento de inercia de $I = 100$ [kg · m²]. Com a finalidade de obter simulações que aproximem à realidade o efeito encontrado em campo foi ajustado o coeficiente de fricção $\mu_d = 0,10$.

O diagrama de blocos na Figura 2, ilustra o ambiente de simulação dinâmica o qual foi construído utilizando a plataforma Simulink®. O ambiente construído é composto por três estágios principais: cinemática inversa, dinâmica e cinemática direta. Na cinemática inversa é gerada uma trajetória de referência, juntamente com o estágio da computação das velocidades lineares e angulares do veículo com base nas relações matemáticas em (1) e (2). Uma etapa importante no ambiente de simulação, é o compute da dinâmica do veículo ((4) e (5)), uma vez que nesta etapa são calculados os valores de torque necessários para atingir os pressupostos configurados de massa do veículo e momento de inercia. Finalmente, como base para validação da simulação dinâmica a cinemática direta é utilizada.

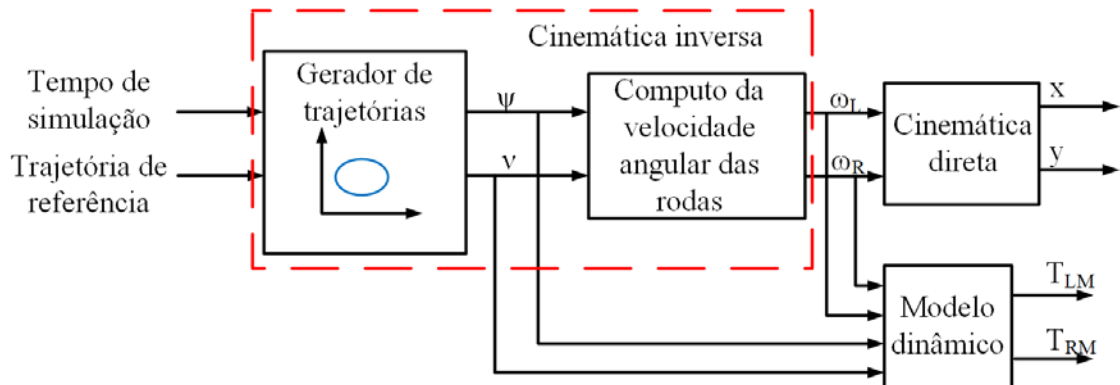


FIGURA 2. Diagrama de blocos do ambiente de simulação para análise dinâmica de um VE agrícola.

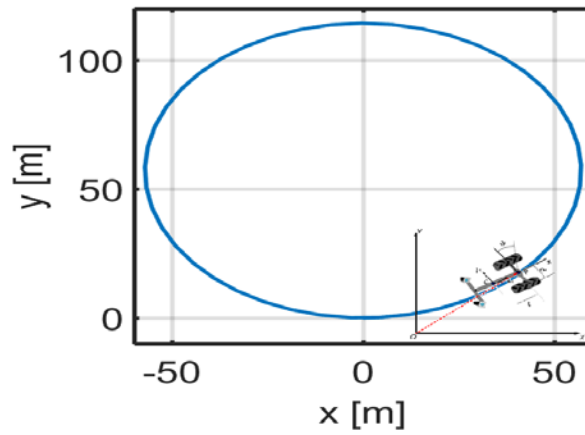
RESULTADOS E DISCUSSÃO: Os resultados obtidos do ambiente de simulação construído podem ser observados na Figura 3. Para analisar a dinâmica do veículo nas manobras de cabeceira (trajetórias curvilíneas) a trajetória de referência foi definida como um círculo de raio 25 [m] (Figura 3a). Na primeira manobra testada a velocidade média do veículo configurada foi de 14 [km/h]. Em destaque com o círculo pontilhado em verde na Figura 3b está a maior faixa de valores de torque necessário para atingir o movimento de uma carga ao redor de $m = 300[kg]$. Por outro lado, valores mínimos de torque para o veículo sem carga, i.e., uma estimativa de peso de $m = 50[kg]$ peso do próprio veículo.

Assim, o torque necessário para realizar o movimento do veículo aumenta na medida que se exige mais carga para o veículo. O aumento do torque torna-se mais crítico ao realizar manobras curvas, esse fato é evidente ao observar a Figura 3b na qual o torque que a roda esquerda precisa aplicar é maior da roda direita (executando a trajetória no sentido anti-horário), excedendo valores de 2,00 [$N \cdot m$].

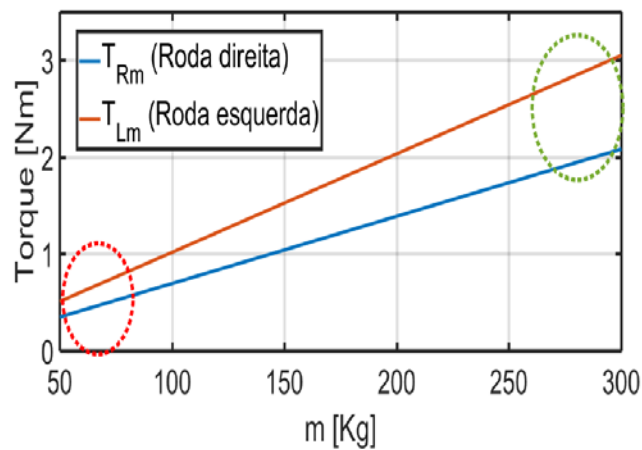
A informação obtida a partir do ambiente de simulação dinâmico construído permite quantificar o efeito que produz o aumento de peso carregado e o tipo de trajetória (manobra de execução) realizada pelo veículo agrícola sobre o torque necessário para cumprir com estes requisitos de carga e esterçamento. É importante destacar que o aumento de torque, para motores elétricos, possui implicação direta no consumo energético, uma vez que a corrente necessária para produzir estes altos valores pode descarregar as baterias de forma rápida.

Por outro lado, o modelo dinâmico desenvolvido permite observar o efeito com a velocidade média com a que se executam as manobras de cabeceira. Este efeito pode ser observado a partir da Figura 3c, onde se configura a velocidade média em 7 [km/h] e se mantêm os valores de parâmetros e condições usados para obter os resultados da Figura 3a.

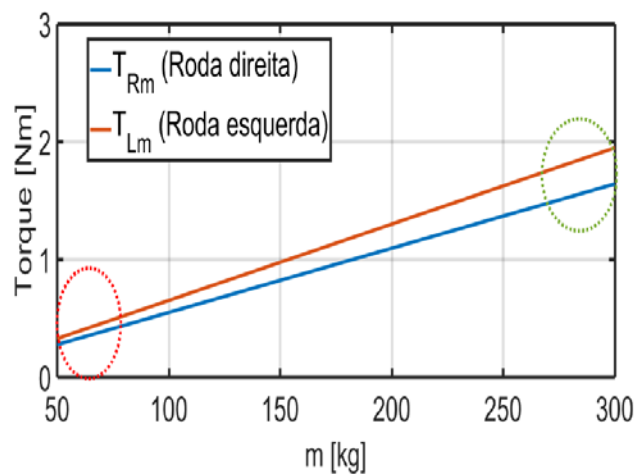
A implicação direta, na redução de velocidade, é a diminuição nos valores máximos de torques necessários para realizar a trajetória circular. Adicionalmente, o fato de realizar o movimento de forma mais suave (baixas velocidades) reduz a diferença de torque necessário entre a roda direita e roda esquerda produzido pela trajetória circular de referência e o sentido da realização do movimento.



a) trajetória de referência



b) $v=14$ [km/h]



c) $v = 7$ [km/h]

FIGURA 3. Manobra curvilínea realizada pelo veículo agrícola no ambiente de simulação.

As características dinâmicas observadas, i.e., torques máximos e mínimos em cada roda, podem definir os modelos de motores elétricos que consigam movimentar valores altos de carga.

CONCLUSÕES: Os resultados obtidos a partir do ambiente de simulação dinâmica construído, fornece uma base de conhecimento para tomada de decisão nas etapas de construção de veículos elétricos que consigam trabalhar movimentando grandes cargas com eficiência absoluta. Pode-se concluir que ter ambientes de simulação dinâmica que permitam testar condições operacionais típicas e extremas presentes nos processos agrícolas, além de oferecer informações relevantes sobre a dinâmica dos processos, melhora a execução de projetos de engenharia, ou seja, reduz os custos de construção e detecta possíveis problemas de design.

A partir dos dados de torque máximo obtidos do ambiente de simulação, como trabalho futuro, serão escolhidos os motores de corrente contínua para implementação em uma plataforma real.

AGRADECIMENTOS: os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS:

Y. C. Alegre, T. A. Podewils, E. A. G. Peñaloza, S. de Lima and L. A. Leston, "Characterization of Physical Parameters of an Agricultural Electric Vehicle based on the Dynamic Analysis in a Simulated Environment," **2021 IEEE 15th International Conference on Semantic Computing (ICSC)**, 2021, pp. 380-385.

M. Cooper and T. Perez, "Dual-particle-filtering for recursive estimation of agricultural-machinery dynamics," **IFAC-PapersOnLine**, vol. 51, no. 15, pp. 658–663, 2018.

B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, **Robotics: Modelling, Planning and Control**, 1st ed. Springer Publishing Company, 2008.

OECD, **Global EV Outlook 2019**, 2019. [Online]. Disponível: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/35fb60bd-en>.

A. JONES, J. BEGLEY, N. BERKELEY, D. JARVIS, AND E. BOS, "Electric vehicles and rural business: Findings from the warwickshire rural electric vehicle trial," **Journal of Rural Studies**, vol. 79, pp. 395 – 408, 2020.