

## SIMULAÇÃO NÚMERICA DOS PARÂMETROS DE TRACÇÃO DE UM TRATOR ELÉTRICO 4WD COM IMPLEMENTO DE ARRASTO

WESLLEN LINS DE ARAUJO<sup>1</sup>, GABRIEL DEL ALAMO CARDOSO DE MORAES<sup>2</sup>,  
IVAN CAMILO ARBELAEZ RUIZ<sup>3</sup>, JENYFFER DA SILVA GOMES SANTOS<sup>4</sup>,  
TÁRCIO ANDRÉ DOS SANTOS BARROS<sup>5</sup>, ANGEL POTIN GARCIA<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Eng. Mecânico, Mestrando em Eng. Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, FEM/Unicamp - Campinas - SP, w203979@dac.unicamp.br

<sup>2</sup> Eng. Agrícola, Mestrando em Eng. Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI/Unicamp, Campinas - SP

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Doutorando em Eng. Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI/Unicamp, Campinas - SP

<sup>4</sup> Eng. Agrícola, Doutoranda em Eng. Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI/Unicamp, Campinas - SP

<sup>5</sup> Eng. Elétrico, Prof. Doutor, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, FEEC/Unicamp - Campinas - SP

<sup>6</sup> Eng. Agrícola, Prof. Doutor, Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI/Unicamp - Campinas - SP

Apresentado no  
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023  
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** Sistemas de controle inteligentes embarcados em veículos agrícolas se destacam como uma forma de otimização tratoria e conseqüentemente da redução do consumo energético. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma modelagem da dinâmica de um trator elétrico 4WD, trabalhando com implemento de arrasto. Utilizando o software Simulink-Matlab, foi proposto um modelo veicular longitudinal para modelagem do trator, modelo da interação pneu-solo agrícola, operação de manobra, trabalho e variações do índice de cone do solo e inclinação. Os parâmetros de tração foram obtidos, como patinagem e velocidade real de um pequeno trator de 1300kg puxando um implemento de 6kN de força de arrasto, chegando a 29,66% de deslizamento na roda dianteira sob inclinação de 15° em solo arado. Os resultados da simulação obtiveram comportamentos esperados, podendo ser validada futuramente através de um experimento real e ser utilizado para projeto de sistemas de controle.

**PALAVRAS-CHAVE:** simulação dinâmica, eficiência energética, trator elétrico

### NUMERICAL SIMULATION OF TRACTION PARAMETERS FOR A 4WD ELECTRIC TRACTOR WITH A DRAG IMPLEMENT

**ABSTRACT:** Intelligent control systems embedded in agricultural vehicles stand out as a means of optimizing tractor operations and consequently reducing energy consumption. The objective of this work was to develop a modeling of the dynamics of a 4WD, electric tractor working with a drag implement. Using Simulink-Matlab software, a longitudinal vehicle model was proposed to represent the tractor, including the tire-soil interaction model, maneuvering operation, work mode, variations in the soil cone index, and inclination. Traction parameters were obtained, such as slip and actual speed, for a small 1300kg tractor pulling a 6kN drag force implement, resulting in a 29.66% slip on the front wheel under a 15° inclination on plowed soil. The simulation results exhibited expected behaviors, which could be further validated through a real experiment and used for control system design.

**KEYWORDS:** dynamic simulation, energy efficiency, electric tractor

**INTRODUÇÃO:** Segundo Zoz, M., & Grisso, T. (2003) a operação eficiente de veículos agrícolas depende da seleção da velocidade ideal para determinado trabalho, seleção correta da transmissão, da ótima relação peso sobre o rodado e capacidade de tração requerida. Os principais parâmetros que afetam na eficiência de tração nos veículos agrícolas são a pressão do pneu, tipo do rodado, peso dinâmico e a patinação (Osinenko et al, 2015). Esses valores podem ser otimizados através do lastreamento de peso, escolha correta do pneu de acordo com o tipo do solo. Esses ajustes são difíceis de serem realizados dinamicamente, ou seja, durante a operação, para manter a máxima eficiência de tração (Osinenko et al, 2015) e conseqüentemente na redução do consumo de combustível. Sistemas embarcados de controle ajudam a minimizar as variações dos parâmetros de tração causadas pela dinâmica da operação e mudança das condições do solo, como foi feito por Kobelski et al. (2021) em um estimador de adesão do solo. Gao et al. (2015) desenvolveram um sistema de controle para o deslizamento longitudinal, visando a máxima eficiência de tração e minimizar o consumo de energia. Esses sistemas são desenvolvidos e testados em ambiente computacional, antes de serem implementados em testes reais. Para isto, uma boa simulação da dinâmica de um trator com sua particularidade na interação pneu-solo deve ser feita. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma modelagem dinâmica de um trator elétrico com implemento de arrasto sob condições de operação e solo no software Simulink-Matlab para ser utilizado futuramente na concepção de sistemas de controle.

**MATERIAL E MÉTODOS:** A simulação dinâmica do trator elétrico foi desenvolvida utilizando um modelo veicular longitudinal, adaptado para os parâmetros de um trator 4WD como mostra a figura 1. Foi considerado na modelagem a força bruta de tração  $GT$ , resistência ao rolamento  $MR$  e os pesos dinâmicos  $W_i$  de cada rodado. A força de tração causada pelo implemento  $P$  bem como os parâmetros de dimensão necessários e a inclinação  $\alpha$  do solo, também foram adicionadas ao modelo.

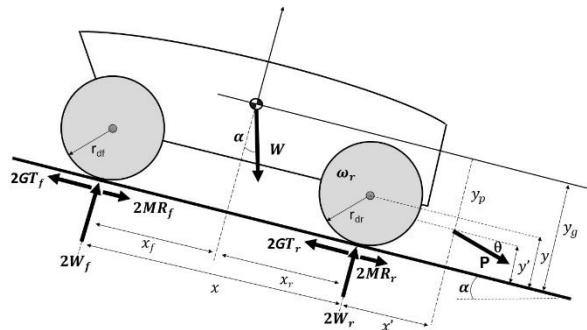


FIGURA 1. Modelo dinâmico.

Para uma modelagem mais completa da dinâmica do trator elétrico, a metodologia do Brixius (1987) da interação pneu-solo agrícola foi empregada, para o cálculo dos parâmetros de tração como seguem as equações 1, 2 e o número de mobilidade na equação 3.

$$GT = W \cdot (0.88(1 - e^{-0.1Bn}) \cdot (1 - e^{-7.5s}) + 0.04) \quad (1)$$

$$MR = W \cdot (1.0/Bn + 0.04 + 0.5 \cdot s / \sqrt{Bn}) \quad (2)$$

$$Bn = ((CI \cdot b \cdot d) / W) \cdot ((1 + 5 \cdot (\delta/h)) / (1 + 3 \cdot (b/d))) \quad (3)$$

O modelo do trator elétrico utilizado possui uma massa de 1300kg com 3m de entre eixo, quatro motores elétricos WEGIR3, quatro pneus iguais com largura de 220mm e diâmetro de 510mm. Dois tipos de solo foram considerados para simulação, o primeiro tratasse de um campo arado e o segundo com palhada, estes com índice de cone de 510kPa e 1025kPa respectivamente

Zhang et al. (2023). Foi considerada uma força de arrasto do implemento P de 6kN para as duas condições. A simulação da operação inicia com velocidade zero e tem um tempo amostral de 100s. Em  $t = 10$ s o implemento entra em trabalho até  $t = 45$ s, onde o implemento é erguido e volta a trabalhar em  $t = 65$ s. A inclinação do solo inicial com  $\alpha = 0$ , e em  $t = 30$ s se inicia uma inclinação de  $15^\circ$  até  $t = 70$ s. Foram realizadas duas simulações, com o campo arado e outra com palhada. Os motores elétricos recebem um sinal step com 40% do torque nominal que se mantém ao longo de toda simulação, para não haver influência dos resultados pela variação dos torques nos motores elétricos.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Foram extraídos da simulação realizada no software Simulink-Matlab, o comportamento da patinagem e da velocidade em função das operações e tipo de solo. A figura 2 mostra a primeira simulação para um solo com índice de cone de 510kPa, onde a velocidade de manobra chega a 9,67km/h e na operação de trabalho em  $t = 10$ s cai para 8,76km/h, 8,53% de patinagem no rodado traseiro e 14,70% no dianteiro. Em  $t = 30$ s inicia uma inclinação de  $15^\circ$ , onde a velocidade de trabalho cai para 7,44km/h e a patinagem nos rodados aumentam para 14,99% na traseira e 29,66% na dianteira. Em  $t = 45$ s inicia novamente a operação de manobra e o ciclo de trabalho se repete em  $t = 65$ s.

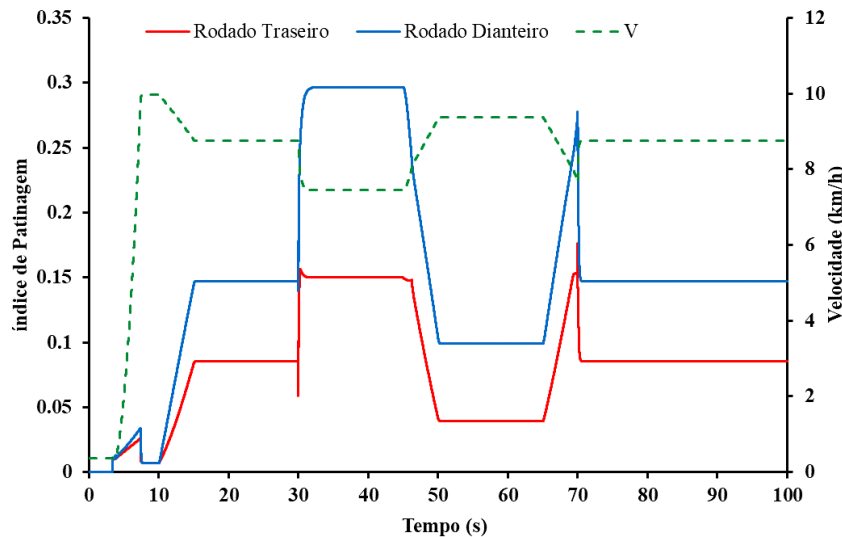


FIGURA 2. Patinagem dos rodados e velocidade com CI = 510kPa.

Na figura 3 a simulação foi realizada com CI = 1025kPa, onde a velocidade de manobra foi de 10,10km/h, caindo em  $t = 10$ s na operação de trabalho para 8,94km/h e patinagem de 6,47% nos rodados traseiros e 13,03% nos dianteiros. Ainda em trabalho, mas com  $15^\circ$  de inclinação a partir de  $t = 30$ s, a velocidade cai para 7,79km/h e a patinagem dos rodados traseiros e dianteiros aumentam para 11,13% e 26,51% respectivamente.

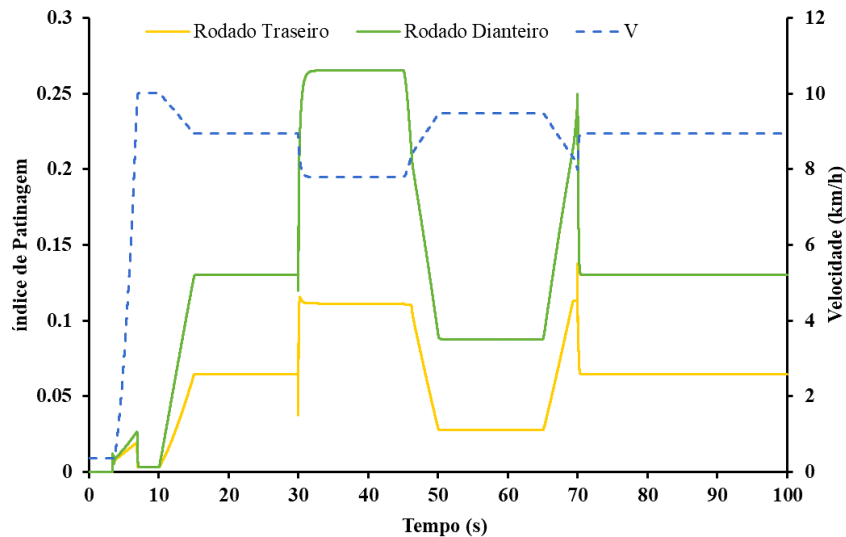


FIGURA 3. Patinação dos rodados e velocidade com CI = 1025kPa.

**CONCLUSÕES:** Os resultados que foram obtidos na simulação mostraram uma dinâmica esperada diante das operações de manobra, trabalho, variação da inclinação e do CI do solo. A patinação aumentou com a operação de trabalho e a inclinação, chegando a quase 30% na roda dianteira em solo arado. Esta simulação pode ser utilizada para prever o desempenho do trator, através dos seus dados técnicos, conhecimento da força de arrasto que o implemento causa e das condições do solo. Assim, sistemas de controles podem ser desenvolvidos utilizando esta simulação para otimizar os parâmetros de tração, e conseqüentemente melhorar o consumo energético.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem a Fundação de Desenvolvimento a Pesquisa (FUNDEP), Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) e Agrícola (FEAGRI) da Unicamp.

#### REFERÊNCIAS:

Brixius, W. W. 1987. Traction prediction equations for bias-ply tires. **ASAE Paper No. 871622**. St. Joseph, Mich.: ASAE.

GAO, H.; XIA, K.; DING, L.; et al. Optimized control for longitudinal slip ratio with reduced energy consumption. **Acta Astronautica**, v. 115, p. 1–17, 2015. Elsevier Ltd.

KOBELSKI, A.; OSINENKO, P.; STREIF, S. Experimental verification of an online traction parameter identification method. **Control Engineering Practice**, v. 113, 2021. Elsevier Ltd.

OSINENKO, P. V.; GEISLER, M.; HERLITZIUS, T. A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque. **Biosystems Engineering**, v. 129, p. 20–33, 2015. Academic Press.

ZOZ, F. M.; GRISSO, R. D. **ASAE DISTINGUISHED LECTURE SERIES Traction and Tractor Performance**. 2003.

ZHANG, S. LI; WEN, C. KAI; REN, W.; et al. A joint control method considering travel speed and slip for reducing energy consumption of rear wheel independent drive electric tractor in ploughing. **Energy**, v. 263, 2023. Elsevier Ltd.