

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

JULIO CESAR DE OLIVEIRA BRAGA FILHO

**IMPACTO DA TROPICALIZAÇÃO DO PROJETO NO DESEMPENHO DE
TRATORES AGRÍCOLAS**

**VIÇOSA – MG
2025**

JULIO CESAR DE OLIVEIRA BRAGA FILHO

**IMPACTO DA TROPICALIZAÇÃO DO PROJETO NO DESEMPENHO DE
TRATORES AGRÍCOLAS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2025


JULIO CESAR DE OLIVEIRA BRAGA FILHO

**IMPACTO DA TROPICALIZAÇÃO DO PROJETO NO DESEMPENHO DE
TRATORES AGRÍCOLAS**


Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 24 de junho de 2025.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **JULIO CESAR DE OLIVEIRA BRAGA FILHO**
Data: 10/07/2025 10:38:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Julio Cesar de Oliveira Braga Filho
Autor

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL MARÇAL DE QUEIROZ**
Data: 10/07/2025 17:31:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Daniel Marçal de Queiroz
Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha esposa, por estar ao meu lado em todos os momentos, compartilhando dificuldades, conquistas e sendo uma fonte constante de apoio.

Aos meus pais e à minha família, pelo amor, pelo incentivo e pelas valiosas lições que marcaram a minha jornada.

Aos meus amigos, que a UFV me proporcionou, pelas experiências compartilhadas, pelas ajudas nas horas necessárias e pelas parcerias que levarei para toda a vida.

Ao Professor Daniel Marçal de Queiroz, pelas orientações, pelo apoio constante e pelo compartilhamento de seu conhecimento, que foram fundamentais para a execução deste trabalho.

À Professora Fernanda Campos de Sousa, por proporcionar os conhecimentos e ferramentas necessárias para a confecção deste trabalho.

Aos grupos GETAM e PET.EAA, pelas experiências, pelo aprendizado, pelo crescimento profissional e pelas conexões pessoais que marcaram essa jornada.

À Universidade Federal de Viçosa, por proporcionar um ambiente transformador, cheio de ensino, parceria, trocas de experiências e pelas inúmeras possibilidades de crescimento.

Muito obrigado a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que esta jornada se tornasse uma realidade.

RESUMO

BRAGA FILHO, Julio Cesar de Oliveira, Universidade Federal de Viçosa, Junho de 2025. **Impacto da tropicalização do projeto no desempenho de tratores agrícolas.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.

Com esse trabalho, objetivou-se analisar comparativamente o desempenho de tratores agrícolas, investigando o impacto da tropicalização do projeto na capacidade de tração e no consumo de combustível. Para a pesquisa, utilizou-se o software de simulação *Traction*, desenvolvido para simular o desempenho de tratores em diferentes condições. Na metodologia foi empregada uma abordagem quantitativa, com base em simulação computacional, dividida em duas etapas principais: validação do modelo e análise comparativa sob condições tropicalizadas. A validação do modelo *Traction* foi realizada comparando os resultados simulados com dados de testes oficiais do Nebraska Tractor Test *Laboratory* (NTTL). Observou-se que o modelo foi eficiente na predição da força de tração, embora tenha apresentado desvios na patinagem e potência. Esses desvios foram encontrados principalmente porque o modelo foi desenvolvido para simular a tração em solo e não em superfície de concreto, como são as pistas utilizadas em testes de tratores. Essas variações foram discutidas e justificadas, reforçando a aplicabilidade do modelo para o objetivo proposto. Após validado, foram analisados três modelos de tratores (John Deere 9R 490, FENDT 700 VARIO Gen7 e John Deere 8R370) sob condições tropicalizadas, utilizando dados de catálogos brasileiros. As adaptações de tropicalização, como alterações no rodado, nas características do motor (torque e rotação) e aumento de peso, foram identificadas como fatores-chave que influenciam o desempenho. Os resultados das análises comparativas entre os tratores originais e tropicalizados indicaram que essas modificações, na rotação, no tipo de rodado e no tamanho das rodas, melhoraram a eficiência trativa e o consumo de combustível para as condições operacionais brasileiras, demonstrando a relevância da tropicalização para a adequação dos tratores ao mercado local.

Palavras-chave: Máquinas agrícolas; Simulação computacional; Tração; Consumo de combustível; Teste de tratores.

ABSTRACT

BRAGA FILHO, Julio Cesar de Oliveira, Federal University of Viçosa, June 2025. **Comparative Analysis of Tractor Performance: Impact of Project Tropicalization on Traction Capacity and Fuel Consumption.** Advisor: Daniel Marçal de Queiroz.

This study aimed to comparatively analyze the performance of agricultural tractors, investigating the impact of project tropicalization on traction capacity and fuel consumption. The research employed the Traction simulation software, developed to simulate tractor performance under different conditions. A quantitative approach based on computational simulation was used in the methodology, divided into two main stages: model validation and comparative analysis under tropicalized conditions. The Traction model was validated by comparing simulated results with official test data from the Nebraska Tractor Test Laboratory (NTTL). It was observed that the model was effective in predicting traction force, although deviations were noted in wheel slip and power. These deviations were mainly attributed to the fact that the model was developed to simulate traction on soil, rather than on concrete surfaces like those used in tractor test tracks. These variations were discussed and justified, reinforcing the applicability of the model for the intended purpose. Once validated, three tractor models (John Deere 9R 490, FENDT 700 VARIO Gen7, and John Deere 8R370) were analyzed under tropicalized conditions using data from Brazilian catalogs. The tropicalization adaptations, such as changes in the wheel configuration, engine characteristics (torque and RPM), and increased weight, were identified as key factors influencing performance. The results of the comparative analyses between the original and tropicalized tractors indicated that these modifications, in engine speed, wheel type, and wheel size, improved traction efficiency and fuel consumption under Brazilian operating conditions, demonstrating the relevance of tropicalization in adapting tractors to the local market.

Keywords: Agricultural machinery; Computer simulation; Traction; Fuel consumption; Tractor testing.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1	Definição de tropicalização	10
2.2	Extração e Preparação de Dados para Simulação	10
2.2.1	Obtenção dos dados de entrada para o software <i>Traction</i>	11
2.3	Validação do modelo de simulação (Fase 1 – Validação NTTL)	14
2.4	Análise comparativa de desempenho (Fase 2 – Condições tropicalizadas)	15
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1	Análise Comparativa dos Resultados	17
3.1.1	Trator John Deere 9R 490	17
3.1.2	Trator John Deere 8R370	19
3.1.3	Trator John Deere FENDT 726 VARIO Gen7	21
3.2	Discussão das discrepâncias e fatores influenciadores	24
3.3	Impacto da tropicalização do projeto na capacidade de tração e consumo de combustível	25
3.3.1	Trator John Deere 9R 490	25
3.3.2	Trator John Deere 8R370	27
3.3.3	Trator FENDT 726 VARIO Gen7.....	29
4	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A agricultura desempenha um papel crucial na economia global, com diferentes regiões enfrentando desafios específicos que exigem soluções personalizadas. No Brasil, a variabilidade da extensão das propriedades agrícolas e a alta demanda de trabalho impõem requisitos distintos no que se refere aos tratores agrícolas. Essas condições são bem diferentes daquelas observadas nos Estados Unidos e em países da Europa, em que o setor agrícola frequentemente opera em áreas menores, com condições mais previsíveis e realiza apenas um cultivo durante o ano (SILVEIRA; SIERRA, 2010). Seja qual for o cenário, os tratores agrícolas desempenham um papel central para garantir o atingimento de elevadas produtividades e eficiência nas operações no campo.

Realizando uma análise comparativa da estrutura fundiária é revelada uma disparidade notável na escala das maiores propriedades agrícolas entre o Brasil, os Estados Unidos (EUA) e a União Europeia (UE). Enquanto todas as regiões exibem concentração de terras, o Brasil se destaca pela magnitude extrema de suas maiores *holdings* agrícolas. Propriedades brasileiras com mais de 2.500 hectares, embora numericamente raras (0,3% do total), controlam quase um terço (32,8%) da área agrícola nacional (IBGE, 2020). Em contraste, nos EUA, embora existam proprietários com vastas extensões (frequentemente florestais), o maior proprietário de terras agrícolas identificado possui cerca de 111 mil hectares. Na União Europeia, apesar da alta concentração de área, as maiores explorações agrícolas individuais identificadas, principalmente na Europa Oriental, atingem escalas de 57 mil a 65 mil hectares. Essa diferença de escala sugere um modelo de agronegócio no Brasil operando em dimensões territoriais significativamente superiores às encontradas nas maiores operações dos EUA e da UE (EUROSTAT, 2018).

Essa vasta escala das propriedades brasileiras, especialmente as focadas em *commodities* para exportação (VALDES; HJORT; SEELEY, 2016), impõe demandas específicas sobre a mecanização agrícola. A necessidade de cobrir extensas áreas de forma eficiente e dentro de janelas agronômicas ótimas exige o emprego de maquinário de grande porte, alta potência e robustez (MELIYEV, 2022). O expressivo aumento na frota de tratores no Brasil, com um crescimento de quase 50% entre 2006 e 2017, e o papel de programas de financiamento como o Moderfrota (IBGE, 2019), refletem a busca contínua por capacidade operacional para lidar com essa escala. A eficiência tratória e o desempenho das máquinas em diferentes condições de solo tornam-se fatores críticos, demandando equipamentos não apenas

potentes, mas também duráveis e adaptados às diversas realidades do solo e clima brasileiros, garantindo a viabilidade econômica das operações em larga escala (GABRIEL FILHO et al., 2010).

No Brasil, muitos modelos de tratores vendidos são importados e submetidos a um processo conhecido como "tropicalização", no qual o rodado e outros componentes são adaptados para atender às condições locais. Essas alterações visam garantir maior robustez e durabilidade, mas podem impactar aspectos como consumo de combustível, força de tração e eficiência energética (HOY; KOCHER, 2020). Em algumas situações, os tratores originais não conseguem tracionar adequadamente os implementos utilizados pelos produtores por conta da alta demanda de trabalho, resultando em dificuldades operacionais e prejuízos financeiros tanto para produtores quanto para as próprias indústrias. Essa situação reforça a necessidade de investigar como a tropicalização pode influenciar o desempenho e a adequação dos tratores às demandas do mercado brasileiro.

Nesse contexto, a utilização de ferramentas computacionais para avaliar o desempenho de tratores ganha relevância. O software *Traction*, desenvolvido por Barbosa et al. (2025), é uma solução eficiente para simular o desempenho de tratores, oferecendo análises detalhadas sobre variáveis como capacidade de tração e consumo de combustível. Validado por meio de ensaios experimentais, o software provou ser preciso ao reproduzir condições reais de operação. Além disso, a interface intuitiva e os gráficos gerados pelo programa permitem que pesquisadores e produtores compreendam as limitações e possibilidades dos tratores em diferentes cenários operacionais.

A combinação de diferentes abordagens é fundamental para otimizar projetos e estratégias de tropicalização de tratores agrícolas, visando aprimorar a capacidade de tração e reduzir o consumo de combustível. Ensaios padronizados avaliam o desempenho de tratores agrícolas para o dimensionamento de máquinas e implementos (LANÇAS et al., 2020; MARCOS NUNES COSMO et al., 2020). Modelos teóricos identificam os parâmetros de projeto mais influentes na eficiência de entrega de potência dos veículos. Softwares de simulação auxiliam ao simular o desempenho da máquina em dadas situações estabelecidas pelo usuário. Ao integrar esses elementos, é possível estabelecer metodologias robustas para otimizar projetos e estratégias de tropicalização. Essa abordagem integrada potencializa a capacidade preditiva das simulações, oferece subsídios quantitativos para ajustes de lastro, calibragem de pneus e seleção de componentes, e reduz o ciclo de desenvolvimento de novas configurações de tratores adaptados às condições brasileiras. Essa abordagem integrada potencializa a capacidade preditiva das simulações, oferece subsídios quantitativos para ajustes

de lastro, calibragem de pneus e seleção de componentes, e reduz o ciclo de desenvolvimento de novas configurações de tratores adaptados às condições brasileiras.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho analisar o efeito da tropicalização de projetos de tratores concebidos no exterior, por meio de simulações computacionais voltadas à avaliação do desempenho e da eficiência operacional. Inicialmente, realizou-se a validação do modelo de simulação Traction, com base em dados experimentais provenientes do Nebraska Tractor Test Laboratory (NTTL), assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos. Em seguida, buscando verificar se as adaptações realizadas pelas fabricantes no processo de tropicalização (como modificações no rodado, ajustes no torque e na rotação do motor, além do aumento de peso) resultam, de fato, em melhorias na capacidade de tração e na redução do consumo de combustível, considerando as condições específicas de uso no contexto agrícola brasileiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Definição de tropicalização

As adaptações de tropicalização investigadas abrangeram um amplo espectro de modificações. Estas incluíram, por exemplo, alterações no rodado, como a seleção de pneus com compostos de borracha e desenhos de banda de rodagem otimizados para solos tropicais, que frequentemente apresentam menor capacidade de suporte e maior variabilidade de umidade, além do ajuste de dimensões e tipos de pneus para otimizar a tração e minimizar a compactação do solo. Também foram consideradas modificações nos sistemas de transmissão de potência que os fabricantes inseriram para atender ao mercado brasileiro. O impacto dessas adaptações de tropicalização na capacidade de tração e no consumo de combustível foi quantificado por meio de análises comparativas de desempenho, utilizando o software de simulação *Traction* (BARBOSA, 2024).

2.2 Extração e Preparação de Dados para Simulação

A fase inicial do estudo concentrou-se na coleta e preparação de dados técnicos detalhados, essenciais para estabelecer uma linha de base comparativa e para a validação do modelo de simulação. Foram coletados dados técnicos de tratores agrícolas comercializados no Brasil e que possuem relatórios de testes oficiais publicados pelo *Nebraska Tractor Test Laboratory*, os quais são reconhecidos internacionalmente por sua metodologia padronizada e rigorosa. Os dados foram extraídos diretamente dos respectivos relatórios disponíveis no repositório digital *DigitalCommons@University of Nebraska–Lincoln* (NTTL, 2023). Para garantir a relevância do estudo, foram selecionados tratores que, além de possuírem dados completos e publicamente acessíveis no NTTL, também são comercializados no mercado brasileiro ou possuem modelos equivalentes, visando permitir uma comparação mais direta entre o desempenho no teste padrão e o desempenho simulado sob condições brasileiras.

As informações extraídas dos relatórios do NTTL abrangeram diversas categorias. Primeiramente, foram coletadas as características gerais do trator, como sua massa total conforme o teste, a distribuição de peso entre os eixos dianteiro e traseiro, a distância entre eixos, a posição horizontal e vertical do centro de gravidade (CG), e a geometria da barra de tração, incluindo as distâncias horizontal e vertical do centro da roda traseira à barra de tração, expressas em metros. Em seguida, foram obtidos os dados do motor e da transmissão, o que

incluiu as curvas de torque e potência do motor (com as rotações máxima, nominal, de potência máxima e de torque máximo), os valores de torque na rotação nominal, a potência máxima e o torque máximo. Também foram coletados dados sobre as relações de transmissão para os eixos dianteiro e traseiro, e a condição da tração dianteira auxiliar (TDA) utilizada durante o teste. Finalmente, foram levantadas as características dos eixos e rodados, como o número de pneus por eixo, as especificações da lastragem líquida e sólida utilizada no teste NTTL, e as especificações detalhadas dos pneus efetivamente usados no teste. As dimensões dos pneus, como sua especificação completa, largura da seção, diâmetro do aro, diâmetro externo não deformado e raio estático sob carga (SLR), todos em metros, foram obtidas por meio da consulta a bancos de dados técnicos de fabricantes renomados como Michelin e Firestone, ou de outros fornecedores homologados, para os modelos de pneu especificados no relatório NTTL, fazendo-se a devida conversão das unidades para o Sistema Internacional e a consideração das tolerâncias de fábrica.

Para representar adequadamente as condições de solo necessárias para os testes, foi adotado no software *Traction* (Barbosa et al., 2025) um valor de 5000 kN/m² como índice de cone do solo (IC) na Fase 1 (validação do modelo), para simular uma superfície de concreto. Por outro lado, na Fase 2 (análise comparativa nas condições tropicalizadas), o modelo passou a considerar um valor de IC de 700 kN/m² tanto nas configurações baseadas nos relatórios NTTL quanto nas configurações baseadas nos catálogos brasileiros, sendo que essa alteração representa um solo propriamente agrícola, com menor resistência. Dessa forma, foi possível avaliar o desempenho dos tratores nas condições de trabalho que serão efetivamente vivenciadas nas lavouras, aumentando a eficácia e a pertinência dos resultados.

2.2.1 Obtenção dos dados de entrada para o software *Traction*

Para a execução das simulações no software *Traction*, os dados de entrada foram meticulosamente coletados e organizados de acordo com as três principais telas de inserção do programa:

Tela 1: Eixos Dianteiro e Traseiro

- **Tipo de pneu (Diagonal ou Radial):** Obtido diretamente da especificação do pneu fornecida nos relatórios de teste ou catálogos.
- **Número de pneus no eixo:** Determinado pelo tipo de rodado do trator (simples ou

duplo).

- **Largura do Pneu (m):** Extraída das especificações técnicas do pneu.
- **Diâmetro nominal do aro (m):** Encontrado nas especificações do pneu.
- **Diâmetro do pneu indeformado (m):** Disponível nas especificações do pneu.
- **Raio de rolamento da roda (m):** Calculado a partir da circunferência de rolamento dividida por 2π .
- **Lastragem do eixo:** Para todos os testes, este parâmetro foi considerado zero.

Tela 2: Dados Gerais

- **Características Gerais do Trator:**
 - **Peso do trator (N):** Calculado multiplicando o peso do trator (em kg) por 9,80665 (aceleração da gravidade).
 - **Distância entre centro dos rodados (m):** Definida pelas características técnicas do trator.
 - **Posição horizontal do centro de gravidade do trator (m):** Calculada utilizando-se a Equação 1.

$$Ph = \frac{Wf \times Dc}{Wt} \quad (1)$$

Em que:

Ph : Posição horizontal do centro de gravidade do trator

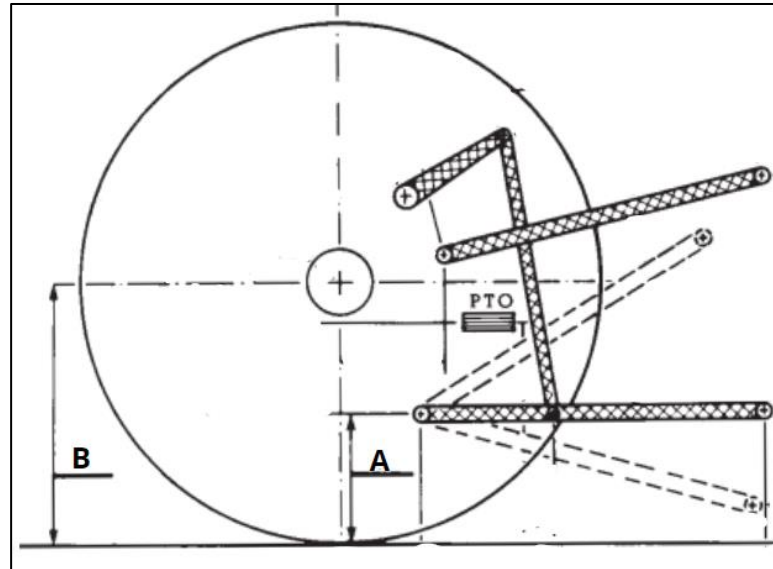
Wf: Peso frontal do trator

Dc: Distância entre centro dos rodados

Wt: Peso total do trator

- **Posição vertical do centro de gravidade do trator (m):** Definida como 0,3 m para todos os testes.
- **Distância horizontal entre a barra de tração e o centro da roda traseira (m):** Obtida a partir das especificações do trator.
- **Distância vertical entre a barra de tração e o centro da roda traseira (m):** Determinada a partir das características do trator, especificamente pelas dimensões do engate conforme testado (sem carga), utilizando o parâmetro B menos o parâmetro A do diagrama de dimensões do engate ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de dimensões do engate



Fonte: Adaptado de *Nebraska Tractor Test Laboratory*.

- **Outros Dados Gerais**

- **Índice de cone do solo (kN/m^2):** Definido como 5000 kN/m^2 para todos os testes da fase 1 e 700 kN/m^2 na fase 2, representando a superfície de teste de cada fase, conforme a metodologia de simulação, como o concreto utilizado nos ensaios do NTTL e o solo agrícola nos ensaios de comparação.
- **Ângulo de inclinação da superfície do solo (graus):** Zero.
- **Ângulo de aplicação da força na barra de tração (graus):** Zero.
- **Incremento de força aplicada na barra de tração (N):** Definido como 100 N , correspondendo ao incremento utilizado pelo programa para cada iteração da simulação.

Tela 3: Motor e Transmissão

- **Rotação máxima (rpm):** Obtida a partir dos dados do trator.
- **Rotação nominal (rpm):** Obtida a partir dos dados do trator.

- **Rotação no Regime de potência máxima (rpm):** Obtida a partir dos dados do trator.
- **Rotação no Regime de torque máximo (rpm):** Obtida a partir dos dados do trator.
- **Torque na rotação nominal (N.m):** Calculada utilizando-se a Equação 2.

$$T_e = \frac{P_e \times 0,92 * 60000}{2 * \pi * N_e} \quad (2)$$

Em que:

T_e : Torque na rotação nominal

P_e : Potência na rotação nominal

N_e : Rotação nominal

- **Torque no regime de potência máxima (N.m):** Calculada utilizando-se a Equação 3.

$$T_{pmax} = \frac{P_{max} \times 0,92 * 60000}{2 * \pi * N_{pmax}} \quad (3)$$

Em que:

T_{pmax} : Torque na potência máxima;

P_{max} : Potência máxima;

N_{pmax} : Rotação na potência máxima.

- **Torque máximo (N.m):** Obtido a partir dos dados do trator.
- **Tipo de transmissão:** Manual ou automática, conforme especificação do trator.
- **Eficiência do sistema de transmissão de potência:** Definido como 0,85.

2.3 Validação do modelo de simulação (Fase 1 – Validação NTTL)

Na validação do modelo de simulação *Traction* em condições NTTL, procedeu-se à comparação direta dos resultados simulados com os valores extraídos dos relatórios oficiais do NTTL, focando-se exclusivamente em duas situações de ensaio: “*Power at Rated Engine Speed*” (potência na rotação nominal do motor) e “*75% of Pull at Rated Engine Speed*” (75% da força de tração obtida na rotação nominal do motor). Para cada trator, inicialmente identificou-se no relatório NTTL o valor de força aplicada na barra de tração associado a essas

duas condições operacionais. Em seguida, no conjunto de resultados simulados pelo *Traction*, buscou-se o ponto em que a força aplicada na barra se aproximasse daquele valor de referência; caso o resultado exato não estivesse presente entre os incrementos simulados, utilizou-se o ponto de força imediatamente superior para obter o valor correspondente de cada variável de saída (potência no motor, velocidade de avanço, rotação do motor, patinagem e consumo de combustível). Dessa forma, para cada condição (“*Power at Rated Engine Speed*” e “*75% of Pull at Rated Engine Speed*”), formou-se um par “simulado vs. real” em que a força na barra era idêntica ou muito próxima, garantindo que qualquer diferença observada nas demais variáveis refletisse exclusivamente o comportamento do modelo de simulação em reproduzir o ensaio de Nebraska.

As comparações consistiram em calcular, para cada variável de interesse, a diferença absoluta e a diferença percentual entre o valor simulado e o valor medido no teste NTTL, sem recorrer a testes estatísticos formais. Essa análise permitiu aferir o grau de aproximação do modelo: valores de potência, velocidade, rotação, patinagem e consumo foram confrontados diretamente com os correspondentes relatados no NTTL para o mesmo esforço de tração. Sempre que a diferença percentual se mantinha dentro de faixas consideradas aceitáveis (por exemplo, pequenas variações de poucos por cento em potência e velocidade), interpretou-se que o modelo reproduziu adequadamente aquela condição de ensaio. Em situações em que a divergência superava magnitudes maiores, procedeu-se à discussão qualitativa das possíveis causas, como limitações do modelo de interação pneu-solo em superfície de concreto ou suposições de eficiência de transmissão, sem excluir automaticamente o ponto de comparação, mas apontando a necessidade de interpretação cuidadosa.

Esse procedimento simples de correspondência pelo valor de força aplicada na barra de tração e de comparação direta das demais variáveis garantiu objetividade e transparência na validação: para cada condição-chave do NTTL, avaliou-se se o *Traction* era capaz de fornecer valores próximos aos medidos em potência no motor, velocidade de avanço, rotação, patinagem e consumo de combustível. A análise de diferenças permitiu evidenciar em que parâmetros o modelo apresentou maior concordância e em quais houve discrepâncias, elucidando o alcance da confiabilidade do *Traction* para predizer o desempenho em superfície rígida antes de avançar para a fase de simulação em solo agrícola.

2.4 Análise comparativa de desempenho (Fase 2 – Condições tropicalizadas)

Na fase de análise comparativa de desempenho em condições tropicalizadas, o foco

foi avaliar como as modificações de projeto (rodado, peso do trator, ajustes de motor) influenciam a capacidade de tração e o consumo de combustível em um solo típico de campo brasileiro, diferentemente da superfície de concreto simulada na validação. Para isso, o índice de cone do solo (IC) foi ajustado de 5000 kN/m² (utilizado na simulação de pista de concreto na fase de validação) para 700 kN/m², refletindo a resistência à penetração encontrada em solos agrícolas em condições operacionais reais. Estudos de resistência do solo em profundidades relevantes para pneus de tratores indicam valores de IC em torno de 500 a 1500 kN/m² para solos aráveis sob condições usuais de umidade e manejo. A escolha de 700 kN/m² baseou-se em médias reportadas para camadas de trabalho (0–20 cm) em Latossolos e Argissolos brasileiros com teor de umidade moderado, adaptando-se à realidade de tração em campo e garantindo que o software reflita a interação pneu-solo com maior fidelidade à operação agrícola (MARASCA et al., 2015).

A redução do IC implica em menor resistência à penetração, o que se traduz em aumento da patinação potencial caso não haja adequadas adaptações de projeto; porém, esse cenário é mais representativo das condições em que o trator opera em lavouras, em que o solo apresenta deformabilidade, variabilidade de umidade e heterogeneidade estrutural (KLONOWSKI et al., 2024).

Ao adotar IC de 700 kN/m², a simulação capta o aumento de energia requerida para gerar tração útil, pois parte do esforço do motor é dissipada na deformação do solo em cada rotação de roda. Essa configuração amplia a sensibilidade da modelagem para diferenciar as estratégias de tropicalização: pneus de maior área de contato, configurações de rodado duplo e lastro aumentado influenciam diretamente na pressão de contato e na profundidade de penetração, afetando a patinação e, conseqüentemente, o consumo de combustível.

As análises comparativas foram realizadas utilizando as mesmas métricas estatísticas empregadas na validação do modelo, com o objetivo de quantificar as diferenças e determinar se as adaptações de tropicalização resultaram em ganhos ou perdas de capacidade de tração e eficiência de combustível.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme a metodologia proposta, a validação foi realizada comparando-se os valores simulados pelo software *Traction* com os dados de referência do NTTL para as variáveis de força de tração, patinagem e potência na barra de tração. Esta seção detalha as comparações para cada um dos três tratores analisados: John Deere 9R 490, John Deere 8R370 e FENDT 726 VARIO Gen7, discutindo as diferenças observadas e suas possíveis causas.

3.1 Análise Comparativa dos Resultados da validação

3.1.1 Trator John Deere 9R 490

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de comparação das variáveis analisadas entre os valores dos testes de Nebraska e os valores obtidos pelo simulador, para o trator John Deere 9R 490:

Tabela 1 – Comparação dos resultados simulados e reais para o trator John Deere 9R 490

Variável	Ensaio com 100% da potência aplicada à barra de tração		Ensaio com 75% da potência aplicada à barra de tração	
	Resultados de Nebraska	Resultados do simulador	Resultados de Nebraska	Resultados do simulador
Potência na barra de tração (kW)	284,94	246,2	221,44	200,00
Força de Tração (kN)	123,77	123,8	92,72	92,7
Velocidade (km/h)	8,29	7,16	8,59	7,77
Rotação (rpm)	2099	2044,8	2165	2108,3
Patinagem (%)	2,5	13	1,9	6,7
Consumo de combustível (L/h)	87,54	98,45	71,97	85,55

Fonte: Autores.

Em relação à potência na barra de tração, a simulação (Tabela 1) apresentou 246,2 kW em “Ensaio com 100% da potência aplicada à barra de tração” versus 284,94 kW medidos no NTTL, e 200 kW em “Ensaio com 75% da potência aplicada à barra de tração” versus 221,44 kW reais. Essa subestimação está intimamente ligada ao cálculo de velocidade de

avanço e patinagem pelo modelo: ao simular interação típica de solo, o *Traction* estima patinagem elevada, o que reduz a velocidade efetiva para a mesma força na barra. Como a potência de barra é produto de força por velocidade, o resultado tende a ser inferior ao observado em pista de concreto, onde a aderência é maior e o deslizamento entre o pneu e a superfície é mínimo. Além disso, pressupostos conservadores de eficiência de transmissão podem contribuir para que a potência entregue ao engate seja menor do que a medição em pista de concreto sugere. Em solos agrícolas, tal lógica produzirá estimativas coerentes, mas em ensaios de concreto resulta em subestimação da potência de barra.

A influência dessa sobrestimação de potência é refletida também na velocidade de avanço indicada pelo software, que se mostra consistentemente abaixo dos valores medidos no ensaio. A maior patinagem simulada acarreta perda de deslocamento real a cada rotação, de modo que, para manter o mesmo esforço na barra, o avanço do trator é reduzido: 7,16 km/h vs. 8,29 km/h na condição plena de potência e 7,77 km/h vs. 8,59 km/h na condição a 75% de tração. Essa queda de velocidade está conectada à lógica de dissipação de energia em deformação do solo; o modelo interpreta que parte significativa do trabalho do motor é consumida no deslizamento, retardando o avanço. Em teste real sobre concreto, em que a aderência é muito maior e a derrapagem mínima, o trator mantém velocidades superiores para o mesmo esforço, explicando a discrepância verificada.

Também na tabela 1, nota-se um impacto no regime de rotação do motor, que aparece ligeiramente inferior ao valor do relatório. Essa diferença de aproximadamente 2 a 3% ocorre porque o *Traction*, ao simular maiores perdas de tração, ajusta o ponto de operação do motor para regimes em que o torque disponível compense o deslizamento previsto. Em solo, essa configuração faria sentido para manter a tração sob maior resistência, mas em pista de concreto provoca rotação subestimada em comparação aos resultados experimentais. Apesar de a variação ser relativamente modesta, ela reforça que o modelo, ao aplicar as curvas de torque-calibradas para solo, altera o regime de funcionamento para atender à estimativa de perda de energia, e que essa lógica, se aplicada a uma pista rígida, resultará em leve deslocamento do ponto de operação em rotação.

A simulação apresentada na tabela 1 indica patinagens muito acima dos valores medidos: aproximadamente 13% frente a 2,5% e 6,7% frente a 1,9% nos dois pontos de ensaio. Esse desvio é o mais expressivo e esperado, pois reflete o fato de o modelo ter sido projetado para interações em solos deformáveis, onde ocorre deslizamento considerável entre o pneu e a superfície, e não para pista de concreto, em que a aderência reduz fortemente a patinagem. Essa estimativa elevada de derrapagem faz com que o modelo inflacione a necessidade de potência

e explique as diferenças em velocidade e rotação. Embora não represente o comportamento real em ensaio de concreto, esse resultado confirma que o algoritmo segue coerentemente o pressuposto de cálculo em solo e que a limitação ao simular superfície rígida deve ser levada em conta, sem invalidar a utilidade do modelo para o propósito principal de simulações em campo.

O consumo de combustível obtido na tabela 1 supera em cerca de 12–19% o valor reportado pelo NTTL. Esse aumento é consequência direta da maior potência calculada e das perdas por patinagem assumidas: ao exigir maior torque e trabalhar em regime de compensação da patinagem, o motor consome mais combustível. Em testes em pista de concreto, em que o deslizamento entre o pneu e a superfície é mínimo e a potência demandada menor, o consumo real se reduz, explicando a diferença observada. Contudo, em solo agrícola, a lógica aplicada pelo *Traction* para consumo será adequada, pois reflete a necessidade real de combustível para superar as perdas por deformação do terreno. A discrepância explícita para ensaio de concreto destaca que a interpretação dos valores de consumo deve considerar o contexto de solo versus concreto, e que a validação por força de tração assegura a aplicabilidade do modelo para as simulações subsequentes em condições de campo.

3.1.2 Trator John Deere 8R370

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de comparação das variáveis analisadas entre os valores dos testes de Nebraska e os valores obtidos pelo simulador, para o trator John Deere 8R370.

Tabela 2 – Comparação dos resultados simulados e reais para o trator John Deere 8R370

Variável	Ensaio com 100% da potência aplicada à barra de tração		Ensaio com 75% da potência aplicada à barra de tração	
	Resultados de Nebraska	Resultados do simulador	Resultados de Nebraska	Resultados do simulador
Potência na barra de tração (kW)	212,41	182,3	169,19	164,1
Força de Tração (kN)	85,9	85,9	64,37	64,4
Velocidade (km/h)	8,9	7,64	9,46	9,17
Rotação (rpm)	2099	1886,9	2208	2109,7
Patinagem (%)	4,7	14,9	3,5	8,5

Consumo de combustível (L/h)	64,71	74,91	54,37	67,3
------------------------------	-------	-------	-------	------

Fonte: Autores.

A Tabela 2 indicou potência na barra de tração de 182,3 kW em “Ensaio com 100% da potência aplicada à barra de tração” contra 212,41 kW medidos no NTTL, e 164,1 kW em “Ensaio com 75% da potência aplicada à barra de tração” frente a 169,19 kW reais. Essa subestimação, especialmente pronunciada na condição de plena carga, decorre do modo como o modelo calcula a interação pneu-solo: ao supor patinagem significativamente maior do que a observada em pista rígida, o *Traction* reduz a velocidade efetiva para manter a força fixa na barra, e como potência de barra é o produto de força por velocidade, o valor resultante fica inferior ao teste real em concreto. Em carga reduzida (75% da força de tração obtida na rotação nominal), a discrepância diminui, pois a patinagem relativa é menor e a velocidade simulada se aproxima mais da real, logo a diferença de potência na barra fica menos acentuada. Além disso, suposições conservadoras de eficiência de transmissão e ajustes de torque calibrados para solo podem contribuir para que a potência entregue ao engate seja subestimada quando aplicada a ensaios em concreto.

A velocidade de avanço simulada apresentou 7,64 km/h em “Ensaio com 100% da potência aplicada à barra de tração” versus 8,9 km/h medidos nos testes reais, e 9,17 km/h em “Ensaio com 75% da potência aplicada à barra de tração” contra 9,46 km/h medidos. A queda percentual maior na condição de plena potência reflete a maior patinagem prevista pelo modelo sob carga elevada: grande parte da energia do motor é considerada perdida em deslizamento, reduzindo o deslocamento real por rotação. Em cargas menores, a simulação ainda assume mais derrapagem que o teste em concreto, mas o efeito sobre a velocidade é menos drástico, resultando em valores simulados mais próximos dos observados. Esse comportamento mostra coerência interna do modelo quando aplicado a solo deformável, mas revela sua limitação ao reproduzir fielmente velocidades em superfície rígida.

A rotação do motor indicada pelo *Traction* ficou em torno de 1.886,9 rpm na condição de potência nominal (vs. 2.099 rpm medidos) e 2.109,7 rpm na condição a 75% de tração (vs. 2.208 rpm reais). A escolha de um ponto de rotação inferior decorre da estratégia interna de manter torque suficiente para compensar a patinagem simulada: sob alta resistência simulada ao solo, o modelo posiciona o regime de motor em faixa que maximize torque disponível, o que implica rotação menor para gerar esforço maior, ainda que em concreto o motor opere em rotações mais altas devido à menor derrapagem. Em carga reduzida, essa diferença de rotação

diminui, já que a patinação prevista é relativamente menor e a necessidade de torque extra reduzida, aproximando o ponto de operação daquele observado no ensaio real.

A patinação obtida na tabela 2 mostra discrepâncias muito relevantes: cerca de 14,9% frente a 4,7% reais em plena potência e 8,5% frente a 3,5% em 75% da força de tração obtida na rotação nominal do motor. Esse desvio expressivo é esperado, pois o modelo foi calibrado para solo, onde a deformação e o escorregamento do pneu são muito maiores do que em pista de concreto, que oferece aderência superior. A estimativa elevada de derrapagem faz com que o *Traction* inflacione as perdas de trabalho e ajuste potência, velocidade e rotação em função desse deslizamento suposto. Embora esses valores não representem o comportamento real em ensaio de concreto, confirmam que o algoritmo segue coerentemente a lógica de solo e reforçam a limitação de aplicar o modelo diretamente a superfícies rígidas.

O consumo de combustível demonstrado na tabela 2 foi de 74,91 L/h em “Ensaio com 100% da potência aplicada à barra de tração” versus 64,71 L/h medidos, e 67,3 L/h em “Ensaio com 75% da potência aplicada à barra de tração” contra 54,37 L/h do relatório. Esse acréscimo resulta da combinação de patinação elevada e regime de motor ajustado para compensar perdas: mesmo com potência de barra subestimada, o motor simulado trabalha em condições menos eficientes para sustentar a tração sob escorregamento, elevando o consumo por unidade de força efetiva. Em pista de concreto, com patinação mínima e demanda energética real menor, o consumo se mostra mais baixo. Entretanto, em solo agrícola, essa previsão de maior gasto reflete a energia necessária para superar perdas por deformação do terreno, tornando a estimativa coerente para o propósito de simulação em campo. Nesse sentido, embora os valores de consumo não coincidam com o ensaio em concreto, eles demonstram a aplicação apropriada do modelo ao cenário de solo, reforçando a necessidade de interpretar com cautela resultados em superfície rígida.

3.1.3 Trator John Deere FENDT 726 VARIO Gen7

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de comparação das variáveis analisadas entre os valores dos testes de Nebraska e os valores obtidos pelo simulador, para o trator FENDT 726 VARIO Gen7.

Tabela 3 – Comparação dos resultados simulados e reais para o trator FENDT 726 VARIO Gen7

Variável	Ensaio com 100% da potência aplicada à barra de tração		Ensaio com 75% da potência aplicada à barra de tração	
	Resultados de Nebraska	Resultados do simulador	Resultados de Nebraska	Resultados do simulador
Potência do motor (kW)	148,1	101,8	115,2	98,9
Força de Tração (kN)	70,47	70,4	52,84	52,8
Velocidade (km/h)	7,56	5,2	7,85	6,74
Rotação (rpm)	1700	1225,9	1737	1623
Patinagem (%)	1,8	11,2	1,2	7,1
Consumo de combustível (L/h)	46,17	47,24	47,24	46,36

Fonte: Autores.

A Tabela 3 apresentou potência na barra de tração de 101,8 kW em “Ensaio com 100% da potência aplicada à barra de tração” contra 148,1 kW medidos no NTTL, e 98,9 kW em “Ensaio com 75% da potência aplicada à barra de tração” versus 115,2 kW reais. Essa subestimação significativa, especialmente sob carga plena, reflete a dinâmica interna do modelo ao assumir patinagem e perdas em solo deformável: como o *Traction* prevê derrapagem elevada, a velocidade simulada cai, reduzindo o produto força \times velocidade que define a potência de barra. Em pista concreto, onde a aderência é alta e a patinagem mínima, a potência efetiva entregue ao engate se mostra maior nos ensaios, enquanto o modelo de solo tende a superestimar perdas e, portanto, subestimar a potência (KLONOWSKI et al., 2024). Além disso, pressupostos conservadores de eficiência de transmissão (calibrados para trabalho em campo) podem diminuir ainda mais a potência estimada. Essa diferença indica que, embora o algoritmo reproduza coerentemente a lógica de solo, ele não reflete fielmente a potência real em ensaios de pista rígida.

A velocidade de avanço simulada foi de 5,2 km/h em plena potência, contra 7,56 km/h no relatório, e de 6,74 km/h em 75% de pull versus 7,85 km/h observados. A queda mais acentuada sob carga nominal resulta do modelo estimar patinagem maior: parte significativa da energia do motor é considerada dissipada em deslizamento, de modo que o avanço por rotação de roda é reduzido. Em cargas menores, embora o *Traction* ainda preveja derrapagem maior do que a realidade em concreto, o efeito sobre a velocidade se atenua, aproximando o valor

simulado daquele medido. Essa diferença de velocidade evidencia coerência interna do modelo para solo, mas também sua limitação ao reproduzir deslocamento em pista de concreto, ressaltando que, em aplicações práticas de campo, as estimativas serão mais apropriadas.

A rotação do motor indicada pela simulação ficou bastante inferior ao valor experimental: cerca de 1.225,9 rpm em plena potência, comparado a 1.700 rpm medidos, e 1.623 rpm em 75% de pull versus 1.737 rpm do ensaio. Esse ponto de operação deslocado para baixo é consequência das curvas de torque-calibradas para solo: ao pressupor maior resistência e patinagem, o modelo posiciona o regime de motor em faixa que maximize torque para compensar perdas, o que leva a rotações menores do que as observadas em concreto, onde menor derrapagem permite operação em regimes mais altos. A diferença é especialmente pronunciada sob carga plena, em que o modelo presume necessidade de torque elevado em rotação reduzida para vencer grandes perdas. Em campo, essa lógica pode refletir cenários de solo pesado, mas em pista rígida resulta em subestimação de rotação em relação aos testes NTTL.

A patinagem simulada alcançou cerca de 11,2% em plena potência e 7,1% em 75% de pull, enquanto os relatórios indicam apenas 1,8% e 1,2%, respectivamente. Esse desvio expressivo é esperado, já que o modelo foi projetado para solo deformável, onde o escorregamento do pneu é relevante (MELIYEV, 2022). Ao estimar patinagem elevada, o *Traction* ajusta outros parâmetros (potência de barra menor, velocidade reduzida, rotação inferior) para refletir a lógica de perdas em terra. Em ensaios de concreto, a alta aderência assegura patinagens muito baixas, de modo que os valores simulados não representam o comportamento real em pista rígida, mas confirmam que o algoritmo segue coerentemente o pressuposto de solo.

O consumo de combustível simulado ficou em 47,24 L/h na condição plena e 46,36 L/h em 75% de potência, comparado a 46,17 L/h e 37,43 L/h medidos. Em plena potência, o consumo simulado aproxima-se levemente do valor real, mas em carga reduzida permanece acima do observado em concreto, o que resulta de o motor trabalhar em regime ajustado para compensar derrapagem prevista. Mesmo com potência de barra subestimada, a necessidade de manter tração sob escorregamento elevado faz com que o consumo específico seja maior. Em concreto, a menor patinagem e maior eficiência de transmissão resultam em consumo efetivo mais baixo, especialmente em 75% de potência. Contudo, no contexto de solo agrícola, essas estimativas de consumo são apropriadas, pois refletem a energia necessária para superar perdas por deformação do terreno (SANTOS; QUEIROZ, 2016). A comparação reforça que

interpretações de consumo devem levar em conta o propósito do modelo: embora não reproduza fielmente valores de ensaio em concreto, fornece previsões realistas para operação em campo.

3.2 Discussão das discrepâncias e fatores influenciadores

De modo geral, a validação frente aos testes do NTTL para os três tratores revelou um padrão consistente: embora o *Traction* reproduza com precisão a força aplicada na barra de tração, graças à definição de incrementos de 100 N que permitem “alinhar” diretamente o valor de esforço, as demais variáveis apresentam vieses sistemáticos decorrentes do fato de o modelo ser concebido para interação solo-pneu e não para pista de concreto. Em todos os casos, observa-se patinagem simulada muito superior à medida em ensaio, resultando em velocidades de avanço e rotações de motor inferiores às registradas no NTTL, bem como em potenciais de barra subestimados e consumo de combustível superestimado quando comparados aos valores reais em concreto. Esse comportamento unívoco em diferentes modelos reforça que as discrepâncias não se devem a falhas pontuais de parametrização individual de cada trator, mas sim à natureza do modelo, que incorpora perdas significativas de tração típicas de solo deformável.

A superestimação da patinagem pelo *Traction* deriva de pressupostos de deformação do solo e coeficientes de interação concebidos para simular condições agrícolas, onde o pneu de fato desliza e afunda, gerando perdas de energia que o software precisa “compensar” com maior torque ou potência. Quando aplicado a ensaios em pista de concreto, essa lógica faz com que o modelo estime um deslizamento que não ocorre no ensaio em pista, elevando artificialmente a necessidade de ajuste de regime do motor para manter a força fixa na barra. Como resultado, a velocidade de avanço diminui em relação ao teste real, o que, multiplicado pela força, reduz a potência na barra calculada. A rotação de motor ajustada para suprir o torque extra também tende a ficar abaixo do observado experimentalmente. Consequentemente, a potência de barra simulada aparece consistentemente inferior ao valor medido no NTTL, e o consumo de combustível calculado aumenta, pois o motor trabalha em um regime menos eficiente para compensar o deslizamento suposto.

Apesar dessas discrepâncias em potência, velocidade, rotação, patinagem e consumo, a capacidade de reproduzir fielmente a força de tração confirma que o algoritmo central de equilíbrio de forças e transmissão do *Traction* está bem calibrado. Essa concordância assegura que o modelo seja confiável para estimar a capacidade de tração máxima e submáxima em solo, seu propósito principal. As diferenças observadas nas variáveis dependentes da dinâmica de

patinagem realçam a necessidade de cautela ao interpretar resultados de simulações projetadas para ensaios em concreto, mas não invalidam a modelagem e simulação em solos agrícolas, onde os pressupostos de interação são adequados. Em outras palavras, o modelo se mostra robusto para prever o esforço de tração, mas sensível ao contexto de aplicação; quando se usa em ambiente diferente daquele para o qual foi calibrado, surgem vieses esperados.

Por fim, cabe destacar principalmente o papel do índice de cone do solo e dos coeficientes de tração e de resistência ao rolamento previstos pelo software, a maneira como a patinagem impacta as variáveis derivadas (velocidade, rotação, potência de barra e consumo) e as suposições de eficiência de transmissão típicas de cenários de campo. Esses fatores influenciadores são responsáveis pelos desvios em relação aos valores medidos em concreto e devem ser enfatizados. O modelo não falhou em reproduzir a lógica de tração, mas aplicou conceitos de solo a uma realidade de pista de concreto, gerando resultados sistematicamente distintos. Reconhecer essa limitação contextual permite, por um lado, justificar as discrepâncias e, por outro, reforçar a confiança na aplicação do *Traction* para simulações em solo agrícola na fase subsequente do estudo.

3.3 Impacto da tropicalização do projeto na capacidade de tração e consumo de combustível

As Tabelas 4 a 6 apresentam a comparação dos resultados simulados para os tratores em suas configurações de Nebraska e Brasil, destacando as diferenças percentuais nas variáveis de desempenho.

3.3.1 Trator John Deere 9R 490

Na Tabela 4 são apresentadas as comparação dos resultados de desempenho para o trator John Deere 9R 490.

Tabela 4 – Comparação dos resultados simulados e reais para o trator John Deere 9R 490

Variável	Dados Simulados (Nebraska)	Dados Simulados (Brasil)
Potência do motor (kW)	218,5	220,4
Força de Tração (kN)	105,8	106,4
Velocidade (km/h)	7,43	7,46
Rotação (rpm)	2100	2100
Patinagem (%)	10,3	10,1
Consumo de combustível (L/h)	94,15	94,15

Fonte: Autores.

As principais mudanças na Tropicalização para o John Deere 9R 490 são:

- Rodado: de 650/85R38 para 800/70R38
- Torque Máximo: de 2078 Nm para 2262 Nm
- Rotação no Torque Máximo: de 1500 rpm para 1600 rpm

Ao comparar os resultados em solo ($IC = 700 \text{ kN/m}^2$) nas condições de rotação nominal (2100 rpm) para o John Deere 9R490, observa-se que a configuração tropicalizada apresenta ligeira melhoria em relação à simulação baseada em dados Nebraska. A potência na barra aumenta de 218,5 kW para 220,4 kW, refletindo que as adaptações, especialmente o aumento de torque máximo de 2078 Nm para 2262 Nm e o rodado maior (de 650/85R38 para 800/70R38), permitem ao motor entregar um esforço útil marginalmente superior, mesmo com rotação fixa. Esse acréscimo na potência de barra, embora modesto, indica que a curva de torque ajustada para a versão tropicalizada fornece mais torque disponível a 2100 rpm, contribuindo para um leve ganho de desempenho prático na tração.

A força aplicada na barra também sobe de 105,8 kN para 106,4 kN sob a mesma rotação, confirmando que o aumento de torque e a maior área de contato do novo rodado colaboram para sustentar um esforço de tração um pouco maior. Em termos de interação pneu-solo, o pneu mais largo e de maior diâmetro tende a distribuir a carga em área maior, reduzindo a densidade de pressão sobre o solo e, conseqüentemente, a patinagem. De fato, nota-se uma pequena redução na derrapagem, de 10,3% para 10,1%, indicando que o trator tropicalizado consegue aproveitar melhor a tração disponível no solo sem aumentar o escorregamento, mesmo em condições de resistência ($IC = 700 \text{ kN/m}^2$) que simulam terreno arável.

A velocidade de avanço sofre leve incremento, passando de 7,43 km/h para 7,46 km/h, coerente com o pequeno aumento de potência de barra e a redução de patinagem. Essa diferença sugere que, para a mesma rotação, o trator tropicalizado mantém um deslocamento ligeiramente maior, pois a energia dissipada em deslizamento é um pouco menor. Embora a variação seja

pequena, ela demonstra que as modificações de rodado e torque produzem efeito prático em condições de campo, permitindo manter ou elevar levemente a produtividade (distância percorrida por minuto de rotação) sem alterar a rotação nominal.

O consumo de combustível permanece inalterado em 94,15 L/h, o que indica que o leve ganho em potência disponível e redução de derrapagem compensam possíveis acréscimos de gasto energético derivados do aumento de torque ou de eventuais mudanças no lastro. Em outras palavras, a eficiência específica se mantém próxima à original: o motor, ajustado à curva de torque tropicalizada, consegue entregar a potência extra sem exigir consumo adicional, pois a menor patinagem reduz perdas. Esse comportamento reforça que a tropicalização, ao calibrar torque e adotar rodado maior, melhora a eficiência de transferência de potência ao solo, aumentando o trabalho útil por litro de combustível em condições reais de uso, mesmo que o consumo horário aparente não sofra alteração.

Em síntese, para rotação nominal de 2100 rpm em solo representativo, as adaptações no John Deere 9R490 resultam em aumento discreto, porém consistente, de potência na barra e força de tração, redução de patinagem e leve melhora na velocidade de avanço, sem penalizar o consumo de combustível. Esses resultados corroboram a eficácia das mudanças de tropicalização (rodado maior e torque elevado) em aprimorar o desempenho prático do trator em campo brasileiro, mantendo a confiabilidade do modelo *Traction* para simulações em solo e fornecendo subsídio quantitativo para decisões de projeto e operação.

3.3.2 Trator John Deere 8R370

Na Tabela 5 são apresentadas as comparação dos resultados de desempenho para o trator John Deere 8R370.

Tabela 5 – Comparação dos resultados simulados e reais para o trator John Deere 8R370

Variável	Dados Simulados (Nebraska)	Dados Simulados (Brasil)
Potência do motor (kW)	163,1	165,1
Força de Tração (kN)	66,4	63,4
Velocidade (km/h)	8,84	9,38
Rotação (rpm)	2100	2100
Patinagem (%)	11,6	7,6
Consumo de combustível (L/h)	71,15	71,16

Fonte: Autores.

As principais mudanças na Tropicalização para o John Deere 8R370 são:

- Rodado: de simples dianteiro (420/85R34) e duplo traseiro (480/80R50) para duplo em ambos os eixos (dianteiro 600/70R30 R1W e traseiro 710/70R42 R1W)
- Peso total: de 13233 Kg para 17567 Kg (aumento de 32.7%)
- Distância entre eixos: de 3.05m para 3.02m (pequena redução)

Ao comparar os pontos de operação fixos na rotação nominal de 2100 rpm para o John Deere 8R370 em solo representativo ($IC = 700 \text{ kN/m}^2$), observa-se que a versão tropicalizada exibe um perfil claramente mais eficiente, ainda que com pequena redução na força de tração. Na simulação “Nebraska” a potência na barra ficou em torno de 163,1 kW, correspondendo a 66,4 kN de força aplicada, velocidade de avanço de 8,84 km/h, patinagem de 11,6% e consumo de 71,15 L/h. Na condição “Brasil” (tropicalizado), a potência na barra elevou-se ligeiramente a 165,1 kW, mas a força de tração simulada fixada em 2100 rpm caiu para 63,4 kN; ao mesmo tempo, a velocidade subiu para 9,38 km/h, a patinagem reduziu-se a 7,6% e o consumo manteve praticamente o mesmo valor (71,16 L/h).

Essa combinação de resultados pode ser entendida considerando as modificações de tropicalização: o rodado duplo em ambos os eixos e o aumento de peso total em cerca de 32,7% alteram a interação pneu-solo de forma a diminuir significativamente a patinagem, já evidenciado pela queda de patinagem de 11,6% para 7,6%. A menor patinagem faz com que, em cada rotação do conjunto motriz, o avanço real seja maior, explicando o salto de velocidade de 8,84 para 9,38 km/h a mesma rotação de 2100 rpm. Simultaneamente, embora o aumento de peso normalmente favoreça maior aderência e potencialmente maior força de tração, o emprego de pneus maiores em configuração dupla amplia a área de contato de modo que a pressão específica sobre o solo talvez fique em uma faixa inferior àquela que maximiza a tração em determinadas condições de resistência ($IC 700 \text{ kN/m}^2$). Isso pode justificar a ligeira redução de força de tração de 66,4 kN para 63,4 kN: o trator, embora mais pesado, opera com pressão de solo ajustada pela área ampliada, deslocando o ponto de máxima aderência para um valor um pouco abaixo do anterior, mas em troca obtém ganhos claros de eficiência, pois o menor escorregamento reduz perdas energéticas.

O fato de a potência na barra aumentar modestamente de 163,1 para 165,1 kW, apesar da força nominal ligeiramente inferior, decorre justamente do maior avanço proporcionado pela redução de patinagem: potência de barra é o produto de força pela velocidade de avanço, de modo que uma força um pouco menor, quando combinada com velocidade significativamente maior, resulta em potência ligeiramente superior disponível para o trabalho. Esse incremento na potência útil, obtido sem elevação no consumo horário, evidencia que o motor operando na

rotação nominal, calibrado com maior torque máximo (em regime tropicalizado), consegue entregar energia de forma mais eficaz ao solo, direcionando menos energia para vencer o escorregamento e mais para movimentar o trator e o implemento.

O consumo praticamente inalterado (71,15 vs. 71,16 L/h) revela que o acréscimo de torque e o peso extra não penalizam o gasto de combustível quando contrapostos à economia gerada pela menor patinagem. Em outras palavras, a energia adicional exigida para arrastar maior incremento de massa e acionar pneus duplos é compensada pela economia obtida ao reduzir perdas por escorregamento, mantendo o consumo horário em níveis equivalentes. Essa manutenção do gasto energético junto a ganhos em velocidade e potência útil reforça a eficiência da tropicalização em campo: o trator conclui tarefas de tração com menor dissipação de energia em forma de derrapagem, sem aumentar a demanda de combustível, o que se traduz em produtividade maior por litro consumido.

A pequena redução na distância entre eixos (de 3,05 m para 3,02 m) tem impacto secundário, mas pode contribuir para melhor distribuição de carga entre eixos e estabilidade em solo irregular, auxiliando no aproveitamento da tração ao minimizar variações de carga que poderiam induzir escorregamentos localizados. Em conjunto, o aumento de peso, o rodado duplo e a leve alteração geométrica tornam o trator tropicalizado mais robusto em campo, resultando na condição simulada em solo de $IC = 700 \text{ kN/m}^2$ em menor patinagem, maior avanço e potência útil, com consumo mantido.

Em suma, embora a força de tração nominal a 2100 rpm apresente ligeiro decréscimo na versão tropicalizada, a eficiência de conversão de potência em deslocamento melhora sensivelmente: a velocidade maior e a menor patinagem geram maior trabalho útil sem penalizar o consumo. Esses achados demonstram que as principais alterações de tropicalização no John Deere 8R370 (rodado duplo, maior peso e ajustes de torque) são eficazes para maximizar a performance em solo agrícola brasileiro quando simuladas com $IC = 700 \text{ kN/m}^2$ e rotação nominal fixa, fornecendo subsídios sólidos para recomendar tais adaptações em projetos e práticas de operação.

3.3.3 Trator FENDT 726 VARIO Gen7

Na Tabela 6 são apresentadas as comparação dos resultados de desempenho para o trator FENDT 726 VARIO Gen7.

Tabela 6 – Comparação dos resultados simulados e reais para o trator FENDT 726 VARIO Gen7

Variável	Dados Simulados (Nebraska)	Dados Simulados (Brasil)
Potência do motor (kW)	96,5	104,1
Força de Tração (kN)	48,8	57,4
Velocidade (km/h)	7,12	6,53
Rotação (rpm)	1700	1700
Patinagem (%)	6,3	12,7
Consumo de combustível (L/h)	45,83	45,85

Fonte: Autores.

As principais mudanças na Tropicalização para o FENDT 726 VARIO Gen7 são:

- Rodado Traseiro: de simples (710/70R42) para duplo (800/70R38)
- Torque Máximo: de 1237 Nm para 1318 Nm
- Rotação no Torque Máximo: manteve 1300 rpm

Na comparação dos resultados a 1700 rpm para o Fendt 726 Vario Gen 7, observa-se que a versão tropicalizada apresenta um desempenho sensivelmente modificado pelas alterações nas configurações de rodado e pelo acréscimo de torque máximo, enquanto mantém o consumo de combustível praticamente inalterado. Na simulação “Nebraska”, a potência na barra ficou em 96,5 kW, a força de tração chegou a 48,8 kN, a velocidade de avanço atingiu 7,12 km/h, a patinagem ficou em 6,3% e o consumo de combustível foi de 45,83 L/h. Na condição “Brasil” (tropicalizado), a potência na barra aumentou para 104,1 kW, enquanto a força de tração se elevou para 57,4 kN; a velocidade caiu para 6,53 km/h, a patinagem subiu para 12,7% e o consumo de combustível ficou quase inalterado, em 45,85 L/h.

Esses resultados estão em consonância com as alterações na especificação do trator. A adoção de um rodado duplo na traseira proporciona maior área de contato, aumentando o grip junto ao solo. Isso se traduz em maior força de tração, enquanto o escorregamento também se eleva, fruto tanto do maior torque (que passa de 1.237 Nm para 1.318 Nm) quanto dessa maior superfície de contato que, embora ajude na tração, eleva a resistência ao rolamento. Como resultado, a velocidade de avanço caiu de 7,12 km/h para 6,53 km/h, enquanto a patinagem aumentou de 6,3% para 12,7%. A elevação na patinagem revela que o modelo, calibrado para solo, passou a apresentar maior deslizamento na nova condição, enquanto na realidade de um ensaio em concreto essa patinagem seria menor, sendo fruto do modelo considerar um solo deformável.

Ainda assim, o Fendt 726 Vario Gen 7 tropicalizado consegue transferir maior potência para a barra, aumentando a eficácia na tração, enquanto mantém o consumo de combustível quase inalterado. Isso significa que o modelo revela um melhor aproveitamento da potência do motor, sendo capaz de aplicar um maior esforço na barra para vencer a resistência do solo, aumentando o trabalho realizado pelo trator nas mesmas condições de rotação. A patinação maior é fruto dessa maior exigência de tração, enquanto o consumo se mantém relativamente constante, mostrando que o conjunto é capaz de trabalhar de forma mais robusta, aumentando a eficácia na execução de suas atividades.

Em suma, o Fendt 726 Vario Gen 7 na versão tropicalizada revela uma elevação tanto na potência na barra quanto na força de tração, enquanto mantém o consumo de combustível, aumentando a patinação nas condições de solo. Isso revela que o modelo é capaz de atender às exigências do trabalho de campo, aumentando a eficácia na transferência de potência, embora às custas de maior escorregamento das rodas motrizes.

4 CONCLUSÃO

O modelo computacional *Traction* validado com os dados do NTTL mostrou-se capaz de reproduzir com precisão a força de tração dos tratores testados. As simulações previram valores de tração próximos aos obtidos nos ensaios oficiais, confirmando a confiabilidade do modelo para o objetivo do estudo. As discrepâncias observadas em patinagem e potência foram atribuídas à diferença de ambiente de teste: enquanto os ensaios do NTTL são feitos em pista de concreto, o modelo *Traction* opera sob parâmetros de solo agrícola. Essa limitação gera patinagem menor e potência ligeiramente superior nas simulações de solo. Em suma, o modelo *Traction* se mostrou adequado para comparar desempenho trativo entre configurações de tratores em condições de solo, desde que tais diferenças de superfície sejam consideradas.

As análises comparativas apontaram que a tropicalização do projeto resultou em ganhos claros de desempenho trativo nas condições brasileiras simuladas. As modificações-chave (rodas de maior diâmetro, torque do motor aumentado e maior massa) reduziram a patinagem prevista em todos os tratores, sem incremento relevante no consumo de combustível. Isso indica que as alterações fizeram melhor uso da potência disponível, melhorando a eficiência trativa. Os resultados demonstraram que o 9R490, o 8R370 e o Fendt Gen7 tropicalizados mantiveram ou aumentaram sua eficiência de tração e eficiência energética em solo, em consonância com estudos que correlacionam peso e configurações de roda a melhor tração.

A tropicalização atingiu seu propósito: adaptou os tratores às condições brasileiras, validando o modelo *Traction* com base no NTTL e confirmando ganhos de tração e eficiência energética esperados. Em suma, a tropicalização de tratores agrícolas para o mercado brasileiro é uma estratégia eficaz para otimizar o desempenho em condições de campo específicas. As modificações no rodado, motor e peso contribuem para uma maior capacidade de tração, redução da patinagem e melhor eficiência no consumo de combustível, adaptando o equipamento às demandas da agricultura em larga escala e aos desafios do solo brasileiro. Este estudo demonstra a importância de tais adaptações para maximizar a produtividade e a sustentabilidade das operações agrícolas no Brasil.

Como perspectiva para futuros estudos, revela-se relevante o desenvolvimento de um modelo de simulação que seja capaz de se adaptar automaticamente às condições do solo nas quais o trator é utilizado, seja ele uma pista de concreto ou um solo arado ou gradeado. Um *software* dessa natureza permitirá uma avaliação ainda mais fiel do desempenho trativo, considerando tanto as variações nas características do terreno quanto nas configurações do trator. Dessa forma, será possível apoiar o dimensionamento, a seleção de configurações e o

manejo da maquinaria para atender às demandas específicas de cada situação, aumentando a eficácia, a eficiência e a sustentabilidade na produção agrícola.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, Igor Araujo. **Desenvolvimento de programa computacional para análise de desempenho de tratores de rodas**. 2024. 113 f. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2024. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/handle/123456789/33097>>.
- EUROSTAT. **Farm Structure Survey 2016**. . Luxembourg: [s.n.], 28 jun. 2018. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/9028470/5-28062018-AP-EN.pdf>>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- GABRIEL FILHO, Antonio et al. Desempenho de trator agrícola em três superfícies de solo e quatro velocidades de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 333–339, mar. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000300015&lng=pt&tlng=pt>.
- HOY, Roger M; KOCHER, Michael F. **The Nebraska Tractor Test Laboratory: 100 Years of Service**. . Louisville,: [s.n.], 10 fev. 2020. Disponível em: <www.asabe.org>.
- IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. . Rio de Janeiro: [s.n.], ago. 2019. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/d37d30efd337a9b66852d60148695df1.pdf>.
- _____. **ESTRUTURA FUNDIÁRIA**. . Rio de Janeiro: [s.n.], 15 dez. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/atlasrural/pdfs/02_00_Texto.pdf>.
- KLONOWSKI, Jacek et al. The Usefulness of Soil Penetration Resistance Measurements for Improving the Efficiency of Cultivation Technologies. **Sustainability**, v. 16, n. 16, p. 6962, 14 ago. 2024.
- LANÇAS, Kléber Pereira et al. Agricultural Tractor Test. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 51, n. 5, 2020.
- MARASCA, Indiamara et al. Soil Compaction Curve of an Oxisol Under Sugarcane Planted After In-row Deep Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1490–1497, out. 2015.
- MARCOS NUNES COSMO, Bruno et al. Breve revisão sobre ensaios com tratores agrícolas. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 4, n. 1, 2020.
- MELIYEV, H.O. INFLUENCE OF SOIL AND CLIMATIC CONDITIONS ON THE OPERATION OF UNIVERSAL PLOUGHING TRACTORS IN AGRICULTURE. **International Journal of Advance Scientific Research**, v. 02, n. 12, p. 166–174, 1 dez. 2022. Disponível em: <<https://sciencebring.com/index.php/ijasr/article/view/157/139>>.

NEBRASKA TRACTOR TEST LABORATORY. **Nebraska OECD Tractor Test 2260 for John Deere 9R 490 Diesel**. . Lincoln: [s.n.], 2023.

SANTOS, Fábio Lúcio; QUEIROZ, Daniel Marçal de. Simtrac – an application for simulation of traction efficiency of agricultural tractors with front wheel assist. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 4, p. 423, 26 ago. 2016.

SILVEIRA, Gastão M. da; SIERRA, Jacinto G. Eficiência energética de tratores agrícolas fabricados no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 418–424, abr. 2010. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000400011&lng=pt&tlng=pt>.

VALDES, Constanza; HJORT, Kim; SEELEY, Ralph. **United States Department of Agriculture Brazil's Agricultural Land Use and Trade: Effects of Changes in Oil Prices and Ethanol Demand**. . Washington, D.C.: [s.n.], jun. 2016. Disponível em:
<www.ers.usda.gov>.