

IGOR ARAUJO BARBOSA

**DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE
DESEMPENHO DE TRATORES DE RODAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Andre Luiz de Freitas Coelho

Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz
Geice Paula Villibor
Marconi R. Furtado Junior

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B238d
2024
Barbosa, Igor Araujo, 1995-
Desenvolvimento de programa computacional para análise
de desempenho de tratores de rodas / Igor Araujo Barbosa. –
Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (113 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: André Luiz de Freitas Coelho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.562>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Tratores agrícolas. 2. Simulação (Computadores).
3. Tração. 4. Tratores agrícolas - Consumo de combustível.
I. Coelho, André Luiz de Freitas, 1989-. II. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.372


IGOR ARAUJO BARBOSA

**DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE
DESEMPENHO DE TRATORES DE RODAS**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **IGOR ARAUJO BARBOSA**
Data: 10/09/2024 09:54:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Igor Araujo Barbosa
Autor

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE LUIZ DE FREITAS COELHO**
Data: 10/09/2024 18:08:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Andre Luiz de Freitas Coelho
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

BARBOSA, Igor Araujo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Desenvolvimento de programa computacional para análise de desempenho de tratores de rodas**. Orientador: Andre Luiz de Freitas Coelho. Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz, Geice Paula Villibor e Marconi R. Furtado Junior.

O setor do agronegócio representa uma significativa contribuição na composição do PIB brasileiro. Os índices de produtividade desse setor são impulsionados por meio do trabalho dos tratores agrícolas de rodas, visto a sua presença em grande parte dos estabelecimentos agrícolas do país. A utilização dos tratores também resulta em aumentos dos custos associados à operação devido à tendência de elevação dos custos dos combustíveis. Durante a operação, grande parte da energia produzida pelo trator é desperdiçada na interface pneu-solo. Para melhorar o desempenho dos tratores é necessário compreender como os parâmetros que influenciam a eficiência de produção de tração se relacionam. A aplicação de modelos matemáticos em programas de computador é uma alternativa eficiente para encontrar essas soluções. No entanto, o programa de computador deve ser validado, para verificar se as simplificações impostas ao modelo não comprometem sua precisão. Sendo assim, objetivou-se desenvolver um programa de computador para analisar o desempenho de tratores de rodas. A validação do programa ocorreu por meio da comparação entre resultados simulados e obtidos por meio de ensaios de tração. Para a coleta de dados nos ensaios, foram desenvolvidos um sistema embarcado e um aplicativo para dispositivos móveis. Os dados foram coletados pelo sistema embarcado, sendo posteriormente transmitidos para o aplicativo a fim de realizar o armazenamento. A análise estatística permitiu verificar a precisão do programa desenvolvido, assegurando a sua validação. O estudo foi dividido na avaliação do desempenho de tração e no desempenho com relação ao consumo de combustível. Posteriormente, o desempenho de forma global de um trator foi analisado por meio de simulações computacionais. A utilização do programa de computador permitiu avaliar as condições operacionais que maximizaram a eficiência tratorária. Por meio de ensaios de tração e simulações computacionais, constatou-se que a patinação das rodas motrizes aumentou proporcionalmente com a força de tração, até atingir um valor limite da força. Posteriormente, mesmo com pouca variação dessa força, a patinação continuou a aumentar. Além disso, o trator necessitou desenvolver maior patinação para tracionar cargas com magnitudes semelhantes, conforme o índice de cone do

solo diminuiu. Os resultados de ensaios de tração, destinados a avaliar a eficiência energética do trator indicaram que o consumo horário de combustível cresceu com o aumento da força de tração. Os menores valores para o consumo específico de combustível foram registrados nas situações em que a rotação do motor foi reduzida e o torque se elevou. O programa de computador identificou, em cada simulação, qual foi a força máxima de tração desenvolvida pelo trator e qual foi o fator que limitou essa força. No estudo que identificou o desempenho do trator com base no desempenho de tração e no consumo de combustível, revelou-se que em 91,38% das simulações essa força foi limitada pela patinação das rodas motrizes. Adicionalmente, identificou-se que a máxima eficiência de produção de tração foi 68,30%.

Palavras-chave: Simulação computacional; Eficiência de tração; Consumo de combustível; Eficiência energética.

ABSTRACT

BARBOSA, Igor Araujo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Development of a computer program for performance analysis of wheeled tractors**. Adviser: Andre Luiz de Freitas Coelho. Co-advisers: Daniel Marçal de Queiroz, Geice Paula Villibor and Marconi R. Furtado Junior.

The agribusiness sector makes a significant contribution to the composition of the Brazilian Gross Domestic Product (GDP). The productivity indices of this sector are driven by the use of wheeled agricultural tractors, given their presence in a large portion of the country's agricultural establishments. The use of tractors also leads to increased operational costs due to the tendency of rising fuel costs. During operation, a significant portion of the energy produced by the tractor is wasted at the tire-soil interface. To enhance tractor performance, it is essential to understand the relationships among the parameters that affect tractive efficiency. The application of mathematical models in computer programs is an efficient alternative for finding these solutions. However, the computer program must be validated to ensure that the simplifications made to the model do not compromise its accuracy. Therefore, the objective was to develop a computer program to analyze the performance of wheel tractors. The program validation occurred through the comparison between simulated results and those obtained through traction testing. For data collection in the tests, an embedded system and a mobile application were developed. The data were collected by the embedded system and subsequently transmitted to the application for storage. Statistical analysis allowed verifying the accuracy of the developed program, ensuring its validation. The study was divided into the evaluation of traction performance and performance concerning fuel consumption. Subsequently, the overall performance of a tractor was analyzed through computer simulations. The use of the computer program allowed for the assessment of operational conditions that maximized the efficiency of the tractor. Through traction tests and computer simulations, it was observed that the slippage of the drive wheels increased proportionally with the traction force, until reaching a maximum force limit. Subsequently, even with minimal variation in this force, the slippage continued to increase. Furthermore, the tractor needed to exhibit increased slippage to tow loads of similar magnitudes as the soil cone index decreased. The results from traction tests, aimed at assessing the energy efficiency of the tractor, indicated that the hourly fuel consumption increased with the rise in traction

force. The lowest values for specific fuel consumption were recorded in situations where the engine rotation was reduced, and the torque increased. The computer program identified, in each simulation, the maximum traction force developed by the tractor and the factor that limited this force. In the study that identified the tractor's performance based on traction and fuel consumption, it was revealed that in 91,38% of simulations, this force was limited by slippage of the drive wheels. Additionally, it was identified that the maximum traction production efficiency was 68,30%.

Keywords: Computer simulation. Traction Efficiency. Fuel consumption. Energy Efficiency.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL	10
1.1. Objetivos	11
1.2. Organização da dissertação.....	11
1.3. Referências	11
CAPÍTULO II - MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESEMPENHO DE TRAÇÃO DOS TRATORES DE RODA	13
2.1. RESUMO	13
2.2. ABSTRACT	14
2.3. INTRODUÇÃO	15
2.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
2.4.1. Modelo para predição da capacidade de tração e o desenvolvimento de programa de computador para análise da capacidade de tração de tratores de rodas.....	18
2.4.2. Desenvolvimento do sistema embarcado para a realização de testes experimentais utilizados para validar o modelo matemático	25
2.4.3. Ensaio de tração	31
2.4.4. Validação do programa de computador	33
2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
2.5.1. Validação do programa de computador	37
2.5.2. Avaliação do desempenho de tração	42
2.6. CONCLUSÃO	50
2.7. REFERÊNCIAS.....	52
CAPÍTULO III – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DE TRATORES DE RODA.....	56
3.1. RESUMO	56
3.2. ABSTRACT	57
3.3. INTRODUÇÃO	58
3.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	60
3.4.1. Simulação para predição do consumo de combustível e o desenvolvimento de programa de computador para estimativa do consumo de combustível de tratores.....	60
3.4.2. Desenvolvimento do sistema embarcado para a realização de testes experimentais utilizados para validar o programa de computador	62
3.4.3. Ensaio para validação	68
3.4.4. Análise dos resultados	69
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72

3.5.1. Validação do programa de computador	72
3.5.2. Desempenho do trator com relação ao consumo de combustível	76
3.6. CONCLUSÃO	81
3.7. REFERÊNCIAS.....	82
CAPÍTULO IV – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DE UM TRATOR AGRÍCOLA DE RODAS	84
4.1. RESUMO	84
4.2. ABSTRACT	85
4.3. INTRODUÇÃO	86
4.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	89
4.4.1. Desenvolvimento do programa de computador	89
4.4.2. Planejamento das simulações computacionais	91
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
4.5.1. Análise de desempenho do trator	94
4.6. CONCLUSÃO	104
4.7. REFERÊNCIAS.....	106
CAPÍTULO V – CONCLUSÃO GERAIS.....	108
APÊNDICE A – PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRAÇÃO E DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	110
APÊNDICE B – APLICATIVO PARA VISUALIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS DO SISTEMA EMBARCADO	113

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL

O setor do agronegócio é de fundamental importância na economia brasileira. O PIB (Produto Interno Bruto) do setor representou, aproximadamente, 24% do PIB do país em 2023 (CEPEA, 2023). Os tratores agrícolas de rodas são máquinas que desempenham um papel fundamental para impulsionar os índices de produtividade dos campos agrícolas. De acordo com dados do Censo Agropecuário de 2017, do total de estabelecimentos que possuíam máquinas, tratores ou demais equipamentos, 55,86% faziam o uso tratores (IBGE, 2017). A relevância dos tratores de rodas na produção agrícola brasileira é confirmada pelo número de 33.981 unidades fabricadas no ano de 2020, considerando as empresas associadas à Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2023).

À medida que a utilização de tratores na produção agrícola resulta em aumentos na produtividade, os custos de operação e manutenção também aumentam. Os custos associados às máquinas e aos combustíveis registraram significativos aumentos última década (SIDDIQUE et al., 2023). Grande parte da energia disponível no trator é desperdiçada na interface pneu-solo, devido à deflexão do pneu e à deformação do solo. A operação agrícola mecanizada é considerada energeticamente bem sucedida conforme a energia proveniente do combustível é disponibilizada de forma eficiente na barra de tração, não causando danos ao solo e assegurando uma produção sustentável (MOHIEDDINNE et al., 2023). A eficiência energética da operação pode ser ampliada quando a área de contato entre o pneu e o solo aumenta, uma vez que a pressão sobre o solo é diminuída e o afundamento do pneu é reduzido (YADAV; RAHEMAN, 2023). Com isso, o trator pode ter sua capacidade de tração elevada e seu consumo específico de combustível reduzido.

O entendimento dos parâmetros que influenciam a eficiência do trator pode ser alcançado com a realização de ensaios de tração. Entretanto, em muitos casos, tais ensaios demandam tempo e envolve custos elevados, sendo muitas vezes inviável. A análise de eficiência do trator pode ser simplificada com a aplicação da modelagem matemática. Assim, o desempenho dos tratores pode ser melhor avaliado por meio da aplicação desses modelos matemáticos em programas de computador. A modelagem matemática é frequentemente utilizada por pesquisadores para analisar o desempenho dos tratores (FARHADI et al., 2020; HAN; YAN; TANG, 2023; REGAZZI; MARALDI; MOLARI, 2019). Essa abordagem não apenas oferece suporte

a pesquisadores e fabricantes para encontrar soluções que melhorem o desempenho dos tratores, mas também auxilia os produtores em situações práticas para o funcionamento eficiente das máquinas da propriedade. A simulação de um determinado processo com base em modelos matemáticos pode requerer simplificações, a depender da sua complexidade. Em vista disso, é imprescindível que o modelo seja validado com o intuito de verificar se as simplificações o tornaram impreciso.

1.1. Objetivos

Esse trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver um programa de computador para analisar o desempenho de tratores de rodas. Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Desenvolver um programa de computador para analisar o desempenho de tração de tratores de rodas e validar o programa por meio de um sistema embarcado;
- Desenvolver e validar um programa de computador para estimar o consumo de combustível de tratores agrícolas de rodas em função das condições operacionais e validar o programa por meio de um sistema embarcado;
- Aplicar um programa que simula o desempenho dos tratores de rodas, verificando como a alteração de variáveis relacionadas à operação influenciam o desempenho de tração e o consumo de combustível de um trator.

1.2. Organização da dissertação

A dissertação foi organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo, foi apresentada uma introdução geral, justificando a importância da modelagem matemática na análise de desempenho dos tratores agrícolas e apresentando os objetivos do trabalho. Nos próximos três capítulos são apresentados os desenvolvimentos dos trabalhos referentes aos três objetivos específicos apresentados. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões gerais.

1.3. Referências

ANFAVEA. **Anuários**. Disponível em: <<https://anfavea.com.br/site/anuarios/>>. Acesso em: 26 jan. 2024.

CEPEA. **PIB DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em: 26 jan. 2024.

FARHADI, P. et al. Tire and soil effects on power loss: Measurement and comparison with finite element model results. **Journal of Terramechanics**, v. 92, p. 13–22, dez. 2020.

HAN, J.; YAN, X.; TANG, H. Method of controlling tillage depth for agricultural tractors considering engine load characteristics. **Biosystems Engineering**, v. 227, n. 1961, p. 95–106, 2023.

IBGE. **Censo Agro - Resultados definitivos**. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/estabelecimentos.html>. Acesso em: 26 jan. 2024.

MOHIEDDINNE, H. et al. Trade-off between agronomical and energetical performances during barley sowing varying adjustable parameters in a tractor-tire-tool system. **Soil and Tillage Research**, v. 226, n. November 2022, p. 105582, fev. 2023.

REGAZZI, N.; MARALDI, M.; MOLARI, G. A theoretical study of the parameters affecting the power delivery efficiency of an agricultural tractor. **Biosystems Engineering**, v. 186, p. 214–227, out. 2019.

SIDDIQUE, M. A. A. et al. Application of auto power shift (APS) controller for minimizing fuel consumption and performance evaluation of an agricultural tractor. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 214, n. May 2023, p. 108279, nov. 2023.

YADAV, R.; RAHEMAN, H. Development of an artificial neural network model with graphical user interface for predicting contact area of bias-ply tractor tyres on firm surface. **Journal of Terramechanics**, v. 107, p. 1–11, 2023.

CAPÍTULO II - MODELAGEM MATEMÁTICA DO DESEMPENHO DE TRAÇÃO

DOS TRATORES DE RODA

2.1. RESUMO

Os tratores agrícolas de rodas são máquinas indispensáveis na execução de trabalhos nos campos de produção agrícola. Muitas tarefas são realizadas por meio da potência disponível na barra de tração. No entanto, parte significativa dessa potência é desperdiçada na interface pneu-solo. Conhecer a influência das variáveis envolvidas no processo de tração do trator é essencial para que a máquina possa trabalhar com maior eficiência. Nesse sentido, o presente trabalho teve o objetivo de desenvolver um programa de computador para simular a capacidade de tração dos tratores de rodas, além de validar o programa com o auxílio de um sistema embarcado. Esse programa foi desenvolvido com base em um modelo matemático para predição da capacidade de tração. Foi desenvolvido um sistema embarcado para coleta de dados em ensaios de tração. A validação consistiu em realizar os ensaios de tração e as simulações computacionais nas mesmas condições, para que os resultados fossem comparados. Foram analisadas as variáveis patinagem do rodado dianteiro, patinagem do rodado traseiro, rotação do motor, velocidade deslocamento do trator e potência na barra de tração. Com exceção das patinagens dos rodados dianteiro e traseiro, o erro relativo médio foi menor ou igual a 6,05% para todas as outras variáveis. Foi comprovada a igualdade estatística entre o modelo e os resultados experimentais para todas as variáveis analisadas, assegurando a precisão do programa de computador. Comprovou-se, experimentalmente, e por meio das simulações, que a patinagem das rodas motrizes cresceu proporcionalmente com a força de tração. Após um determinado valor, essa força se estabilizou, enquanto a patinagem continuou a crescer. Ao considerar valores semelhantes de força de tração, observou-se que a patinagem aumentou à medida que o índice de cone do solo diminuiu. Constatou-se que a potência disponível na barra de tração aumentou proporcionalmente com a força de tração, atingiu um valor máximo e, posteriormente, apresentou uma tendência de queda.

Palavras-chave: Eficiência de tração; Sistema embarcado; Simulação computacional; Força de tração.

2.2. ABSTRACT

Wheeled agricultural tractors are indispensable machines for carrying out tasks in agricultural production fields. Many tasks are performed through the power available at the drawbar. However, a significant portion of this power is wasted at the tire-soil interface. Understanding the influence of variables involved in the tractor traction process is essential for the machine to operate with greater efficiency. In this context, the present work aimed to develop and validate a computer program to simulate the traction capacity of wheeled tractors. This program was developed based on a mathematical model for predicting the traction capacity. An embedded system was developed for data collection in traction tests. Validation involved conducting traction tests and computer simulations under same conditions for result comparison. The analyzed variables included front wheel slippage, rear wheel slippage, engine rotation, tractor displacement speed, and power at drawbar. With the exception of the slippages of the front and rear wheels, the mean relative error was less than or equal to 6,05% for all other variables. Statistical equality between the model and experimental results was confirmed for all analyzed variables, ensuring the accuracy of the computer program. It was experimentally verified and through simulations that the slippage of the drive wheels increased proportionally with the traction force. After a certain value, this force stabilized, while slippage continued to increase. When considering similar values of traction force, it was observed that slippage increased as the soil cone index decreased. It was observed that the power available at the drawbar increased proportionally with the traction force, reached a maximum value, and subsequently showed a declining trend.

Keywords: Traction Efficiency. Embedded system. Computer simulation. Traction force.

2.3. INTRODUÇÃO

A mecanização agrícola teve seu desenvolvimento pautado na necessidade de avanço dos sistemas de cultivo. Esse progresso tem a finalidade de produzir alimentos em quantidades necessárias para a população mundial, que cresce em um cenário de redução de disponibilidade de mão de obra no meio rural (MD-TAHIR et al., 2021). Os campos de produção agrícola têm potencial de serem aprimorados por meio da mecanização das diversas atividades, reduzindo o tempo de execução, a demanda de mão de obra e os custos operacionais. Além disso, a mecanização agrícola melhora a qualidade da execução das operações, impactando na produtividade dos alimentos produzidos. Diante deste cenário, o trator agrícola de rodas é uma máquina indispensável na execução das atividades na fazenda. Tal importância vem resultando no aumento de unidades de máquinas vendidas, indo de 2,1 milhões em 2015 para 2,9 milhões em 2022 (KIM et al., 2021).

O trator agrícola desempenha um papel fundamental ao fornecer a potência necessária para a execução das diversas operações de campo, sendo que a maior parte dessas tarefas utiliza a potência disponível na barra de tração. No entanto, é essencial que essa máquina seja eficiente no aproveitamento da energia contida no combustível. Estudos indicaram que cerca de 20 a 55% da energia disponível para a operação do trator é desperdiçada na interface pneu-solo (ASHOK KUMAR et al., 2017).

Para que o trator possa desempenhar o trabalho de forma eficiente é essencial conhecer como as variáveis envolvidas influenciam na sua capacidade de tração. Sendo assim, pesquisadores desenvolveram modelos para estudar tais influências (MASON et al., 2022; REGAZZI; MARALDI; MOLARI, 2019; TIWARI; PANDEY; PRANAV, 2010). A interação pneu-solo determina a potência na barra de tração que o trator pode desenvolver, sendo que as variáveis que governam essa interação podem ser divididas em três categorias. A primeira diz respeito às características do pneu, a segunda contempla as variáveis relacionadas às propriedades mecânicas do solo, enquanto que a terceira engloba variáveis do trator como distribuição de peso aos rodados, velocidade de deslocamento, características do motor e do sistema de transmissão de potência (MOINFAR et al., 2020).

A razão de redução de percurso, comumente denominada patinagem, é uma variável que afeta significativamente a capacidade de tração dos tratores agrícolas.

Esse fenômeno ocorre não apenas devido ao deslizamento entre o pneu e a superfície do solo, mas também devido à deformação do dispositivo de tração e ao cisalhamento interno do solo. A patinação causa uma redução na velocidade de deslocamento do trator e ocorre sempre que o dispositivo de tração desenvolve tração líquida (ZOZ; GRISSO, 2003). A eficiência de produção de tração é determinada pela razão entre a potência disponível na barra de tração e a potência produzida pelo motor (JANULEVIČIUS; DAMANAUSKAS, 2022). Para que o trator opere em máxima eficiência, é fundamental manter a patinação dentro da faixa de valores considerada ótima, geralmente entre 10% e 15%. Quando a patinação é inferior à faixa ótima, parte do torque transferido ao eixo da roda é utilizado para vencer a resistência ao rolamento ao invés de ser convertido em esforço de tração. Já para valores superiores à faixa ótima, parte do movimento angular das rodas não é convertida em velocidade de deslocamento, resultando em perda de potência de tração, uma vez que a potência de tração é o produto da força de tração pela velocidade de deslocamento (GUPTA et al., 2019).

A análise das variáveis que descrevem o desempenho de tração dos tratores pode ser simplificada com a adoção de modelos matemáticos teóricos. O desempenho do trator agrícola pode ser melhor avaliado por projetistas e pesquisadores por meio da implementação desses modelos em programas de computador. Nesse sentido, muitos trabalhos são desenvolvidos com o auxílio desses programas, a fim de alcançar melhores condições de desempenho da máquina, minimizando o tempo necessário para a execução de ensaios e, conseqüentemente, os custos (AL-HAMED; AL-JANOBI, 2001; BATTIATO; DISERENS, 2017; KOLATOR; BIAŁOBRZEWSKI, 2011; ZHANG et al., 2022, 2023). Para desenvolver um modelo matemático que simula um determinado processo pode ser necessário realizar simplificações, a depender da sua complexidade. Por isso, é de fundamental importância que o modelo desenvolvido seja validado, para verificar se as simplificações realizadas não tornaram o modelo impreciso. Dentre os processos de validação, tem-se a comparação dos resultados obtidos a partir do modelo matemático com resultados obtidos por meio de testes experimentais.

Diante desse contexto, torna-se evidente que o trator agrícola tem um papel fundamental na produção agrícola, aliviando a jornada de trabalho e impulsionando a produtividade da mão de obra no campo. Nesse sentido, é fundamental destacar a

importância do desenvolvimento de trabalhos que abordem a temática do desempenho de tratores agrícolas de rodas. Com esse propósito, esforços devem ser direcionados no sentido de otimizar o desempenho da eficiência de tração das máquinas. Assim, o presente capítulo tem como objetivo desenvolver um programa de computador para análise do desempenho de tração para tratores agrícolas de rodas, bem como validar o programa com o auxílio de um sistema embarcado. Um programa que simula a capacidade de tração dos tratores de rodas, acompanhado por uma interface gráfica intuitiva, possui o potencial de facilitar os trabalhos de campo, orientando o usuário para condições de desempenho mais eficazes. Além disso, essa ferramenta pode contribuir para trabalhos de pesquisa, buscando soluções que aprimorem o desempenho dos tratores.

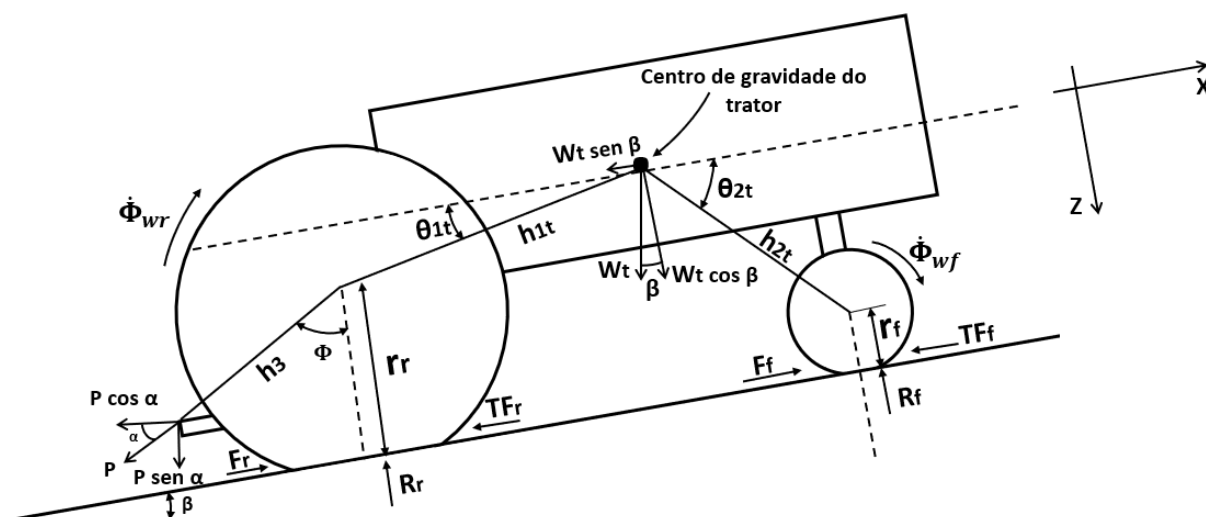
2.4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho desenvolvido no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizado em Viçosa/MG foi executado em quatro etapas. A primeira consistiu no desenvolvimento de programa de computador para análise do desempenho de tração de um trator agrícola com rodas. Já na segunda foi desenvolvido um sistema embarcado de baixo custo, com projeto e código aberto, para obter variáveis do funcionamento de um trator agrícola durante ensaio de tração. Na terceira foram realizados ensaios de tração em diferentes condições de solo utilizando um trator agrícola de rodas, assim como simulações computacionais contemplando as mesmas condições testadas. Na quarta etapa foi utilizado teste estatístico para validar o programa de computador desenvolvido utilizando os dados experimentais obtidos nos ensaios de tração.

2.4.1. Modelo para predição da capacidade de tração e o desenvolvimento de programa de computador para análise da capacidade de tração de tratores de rodas

O modelo matemático para analisar a capacidade de tração de um trator agrícola de rodas foi desenvolvido com base nos conceitos propostos por Goering et al. (2003). O modelo é referente à um trator agrícola com tração nas quatro rodas, na condição de equilíbrio estático, ou seja, o deslocamento do trator ocorre em velocidade constante e as velocidades angulares das rodas motrizes são constantes (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Diagrama de corpo livre de um trator com tração nas quatro rodas



Fonte: Adaptado de Goering et al., 2003.

Quando torque é transferido para a roda de tração, uma força de tração bruta (F) é desenvolvida. Essa força não pode ser medida diretamente, e é dependente do raio da roda. Nos casos em que a tração da roda dianteira estiver desligada, é importante observar que a força de tração bruta no rodado dianteiro é nula. A força de resistência ao rolamento (TF) está associada principalmente às perdas devido à deformação do solo e do rodado. A diferença entre a força de tração bruta e a força de resistência ao rolamento define a força de tração líquida, utilizada para tracionar as máquinas e implementos acoplados ao trator. A força de reação da roda perpendicular à superfície do solo (R) está relacionada à distribuição de peso no rodado do trator (ZOZ; GRISSO, 2003).

As forças de reação, perpendiculares ao solo, e que agem nas rodas dianteiras e traseiras foram calculadas por meio das Equações (2.1) e (2.2), respectivamente.

$$R_f = \frac{W_t \cos(\beta)x_1 - W_t \sin(\beta)z_1 - P \cos(\alpha)x_3 - P \sin(\alpha)z_3 - TF_r r_r - TF_f r_f}{x_1 + x_2} \quad (2.1)$$

$$R_r = W_t \cos(\beta) + P \sin(\alpha) - R_f \quad (2.2)$$

em que:

- R_f - reação do solo no rodado dianteiro, N;
- R_r - reação do solo no rodado traseiro, N;
- W_t - peso total do trator, N;
- P - força aplicada na barra de tração do trator, N;
- TF_f - força de resistência ao rolamento do rodado dianteiro, N;
- TF_r - força de resistência ao rolamento do rodado traseiro, N;
- x_1 - distância entre o eixo traseiro e o centro de gravidade do trator projetada no eixo x, m;
- z_1 - distância entre o piso e o centro de gravidade do trator projetada no eixo z, m;
- x_2 - distância entre o eixo dianteiro e o centro de gravidade do trator projetada no eixo x, m;
- x_3 - distância entre o eixo traseiro e o ponto de aplicação da força na barra de tração projetada no eixo x, m;
- z_3 - distância entre o piso e o ponto de aplicação da força na barra de tração projetada no eixo z, m;
- r_f - raio de rolamento dos pneus do rodado dianteiro, m;
- r_r - raio de rolamento dos pneus do rodado traseiro, m;
- β - declividade do piso, radianos;
- α - ângulo de aplicação da força P em relação ao eixo x, m.

As distâncias x_1 , z_1 , x_2 , x_3 , z_3 , apresentadas na Figura 2.1, foram calculadas, respectivamente, pelas Equações (2.3) a (2.7).

$$x_1 = h_{1t} \cdot \cos(\theta_{1t}) \quad (2.3)$$

$$z_1 = r_r + h_{1t} \cdot \sin(\theta_{1t}) \quad (2.4)$$

$$x_2 = h_{2t} \cdot \cos(\theta_{2t}) \quad (2.5)$$

$$x_3 = r_r - h_3 \cdot \cos(\phi) \quad (2.6)$$

$$z_3 = h_3 \cdot \sin(\phi) \quad (2.7)$$

em que:

- h_{1t} - Distância entre o centro de gravidade do trator e o centro do rodado traseiro, m;
- θ_{1t} - Ângulo entre o eixo x e a linha que une o centro do rodado traseiro e o centro de gravidade do trator, radianos;
- h_{2t} - Distância entre o centro de gravidade do trator e o centro do rodado dianteiro, m;
- θ_{2t} - Ângulo entre o eixo x e o segmento de reta que une o centro do rodado dianteiro e o centro de gravidade do trator, radianos;
- h_3 - Distância entre o centro do rodado traseiro e o ponto de aplicação da força P, m;
- ϕ - Ângulo entre o eixo z e o segmento de reta que une o centro da roda traseira e o ponto de aplicação da força P, radianos.

O número de mobilidade, um parâmetro incorporado nas equações utilizadas para calcular a capacidade de tração de uma roda, considerou a resistência à penetração do solo, a razão entre a largura e o diâmetro da roda e a razão de deflexão do pneu (GOERING et al., 2003). O número de mobilidade foi obtido a partir da Equação (2.8).

$$B_n = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W} \left(\frac{1 + 5 \frac{\delta}{h}}{1 + 3 \frac{b}{d}} \right) \quad (2.8)$$

em que:

- B_n - número de mobilidade, adimensional;
- CI - índice de cone médio do solo na camada 0 a 15 cm, Pa;
- b - largura nominal do pneu, m;
- d - diâmetro global do pneu, m;
- h - altura da banda de rodagem nominal do pneu, m;

- δ - deflexão na direção z do pneu, m;
 W - carga dinâmica agindo sobre o pneu, N.

O cálculo das deflexões e das alturas da banda de rodagem foi realizado por meio das Equações (2.9) e (2.10).

$$\delta = \frac{d}{2} - r \quad (2.9)$$

$$h = \frac{d}{2} - \frac{1}{2}(d_a + 0,05) \quad (2.10)$$

em que:

- d_a - diâmetro nominal do aro da roda, m.

A força de resistência ao rolamento do rodado dianteiro foi calculada pela Equação (2.11). A Equação (2.12) foi usada para determinar a força de resistência ao rolamento para o rodado traseiro. Os valores dos parâmetros a_i utilizados nessas equações foram obtidos de estudos experimentais e apresentados em GOERING et al., 2003 (Tabela 2.1).

$$TF_f = R_f \left(\frac{a_1}{B_{nf}} + a_2 + \frac{a_3 s_f}{\sqrt{B_{nf}}} \right) \quad (2.11)$$

$$TF_r = R_r \left(\frac{a_1}{B_{nr}} + a_2 + \frac{a_3 s_r}{\sqrt{B_{nr}}} \right) \quad (2.12)$$

em que:

- B_{nf} - número de mobilidade para o rodado dianteiro, adimensional;
 B_{nr} - número de mobilidade para o rodado traseiro, adimensional;
 s_f - patinação das rodas dianteiras, adimensional;
 s_r - patinação das rodas traseiras, adimensional;
 $a_1, a_2, e a_3$ - parâmetros das equações, determinados em função do tipo de pneu (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Parâmetros das equações de tração em função do tipo de pneu utilizado no trator

Parâmetros das equações de tração	Pneu diagonal	Pneu radial
a_1	1,00	0,90
a_2	0,04	3,25E-2
a_3	0,50	0,50
a_4	0,88	0,88
a_5	0,10	0,10
a_6	7,50	9,50

A força de tração bruta para os rodados dianteiro e traseiro, que também utilizou os parâmetros a_i da Tabela 1, foi calculada pelas Equações (2.13) e (2.14), respectivamente.

$$F_r = R_r[a_4(1 - e^{-a_5 B n r})(1 - e^{-a_6 S r}) + a_2] \quad (2.13)$$

$$F_f = R_f[a_4(1 - e^{-a_5 B n f})(1 - e^{-a_6 S f}) + a_2] \quad (2.14)$$

em que:

- F_f - força de tração bruta para o rodado dianteiro, N;
- F_r - força de tração bruta para o rodado traseiro, N;
- $a_4, a_5, e a_6$ - parâmetros das equações, determinados em função do tipo de pneu (Tabela 2.1).

A velocidade de translação das rodas motrizes dianteiras e traseiras precisam ser idênticas. Sendo assim, a Equação (2.15) foi utilizada para calcular a patinagem do rodado dianteiro. Ademais, os valores de patinagem encontrados para os rodados dianteiro e traseiro foram tais que satisfaziam o equilíbrio de forças na direção x, conforme a Equação (2.16).

$$s_f = 1 - \frac{r_r \cdot G_f}{r_f \cdot G_r} (1 - s_r) \quad (2.15)$$

$$F_r + F_f - T F_r - T F_f - W_t \text{sen}(\beta) = 0 \quad (2.16)$$

em que:

- G_f - relação de transmissão entre o motor e o rodado dianteiro, adimensional;
- G_r - relação de transmissão entre o motor e o rodado traseiro, adimensional.

As Equações (2.17) e (2.18) foram utilizadas para calcular a carga dinâmica em cada pneu dos rodados dianteiro e traseiro, respectivamente, considerando que a reação nos eixos foi igualmente distribuída entre os pneus contidos naquele eixo.

$$W_f = \frac{R_f}{n_f} \quad (2.17)$$

$$W_r = \frac{R_r}{n_r} \quad (2.18)$$

em que:

- n_f - número de pneus no eixo dianteiro;
- n_r - número de pneus no eixo traseiro.

Os valores do torque requerido para acionar os eixos dianteiro e traseiro foram calculados com base nas Equações (2.19) e (2.20), respectivamente. O raio de

rolamento de cada pneu foi estimado por ensaios experimentais, obtido por meio da distância percorrida em dez revoluções completas para os pneus dianteiro e traseiro.

$$T_{wf} = F_f \cdot r_f \quad (2.19)$$

$$T_{wr} = F_r \cdot r_r \quad (2.20)$$

em que:

- T_{wf} - somatório dos torques agindo no eixo das rodas dianteiras, Nm;
 T_{wr} - somatório dos torques agindo no eixo das rodas traseiras, Nm;

O torque produzido pelo motor de combustão interna para tracionar a força P aplicada na barra de tração foi calculado conforme a Equação (2.21). Foi adotada a hipótese de que as eficiências de transmissão entre o eixo dianteiro e o motor e entre o eixo traseiro e o motor eram iguais.

$$T_e = \frac{T_{wr}}{\eta \cdot G_r} + \frac{T_{wf}}{\eta \cdot G_f} \quad (2.21)$$

em que:

- T_e - torque produzido pelo motor para gerar a força de tração P, Nm;
 η - eficiência de transmissão de torque entre o eixo e o motor, adimensional.

A velocidade angular de trabalho do motor (rotação do motor) foi obtida por interpolação linear a partir da curva que descreve o torque produzido pelo motor em função da rotação. Com isso, as Equações (2.22) e (2.23) foram utilizadas para determinar a velocidade angular dos eixos dianteiro e traseiro, respectivamente.

$$\dot{\phi}_{wf} = \frac{N_e}{G_f} \quad (2.22)$$

$$\dot{\phi}_{wr} = \frac{N_e}{G_r} \quad (2.23)$$

em que:

- $\dot{\phi}_{wf}$ - velocidade angular do rodado dianteiro, rad/s;
 $\dot{\phi}_{wr}$ - velocidade angular rodado traseiro, rad/s.

A potência produzida pelo motor de combustão interna foi calculada pela Equação (2.24).

$$P_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot T_e \cdot N_e}{60000} \quad (2.24)$$

em que:

N_e - velocidade angular (rotação) do motor, rpm;

P_e - potência produzida pelo motor do trator, kW.

A Equação (2.25) foi utilizada para calcular a velocidade de deslocamento do trator. A partir dessa velocidade, obteve-se a potência disponível na barra de tração, conforme a Equação (2.26).

$$v_a = \frac{(1 - s_r) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_r \cdot 3,6 \cdot N_e}{60 \cdot G_r} \quad (2.25)$$

$$P_{bt} = \frac{P \cdot v_a}{1000} \quad (2.26)$$

em que:

v_a - velocidade de deslocamento do trator, m/s;

P_{bt} - potência que o trator produz na barra de tração, kW.

Fundamentando-se em toda essa abordagem, foi calculada, com base na Equação (2.27), a eficiência de produção de tração, definida pela razão entre a potência disponível na barra de tração e a potência produzida no motor de combustão interna. Já na Equação (2.28) foi utilizada para calcular a razão entre a força de tração e o peso do trator.

$$E_{pt} = \frac{P_{bt}}{P_e} \quad (2.27)$$

$$r_{WP} = \frac{P}{W_t} \quad (2.28)$$

em que:

E_{pt} - eficiência de produção de tração do trator;

r_{WP} - razão entre a força de tração e o peso do trator.

As equações apresentadas, que compõem o modelo matemático para análise da capacidade de tração de tratores agrícolas, foram implementadas em um programa de computador com interface gráfica do usuário, desenvolvido utilizando linguagem Python versão 3.9 e a biblioteca *PyQt5*. O programa de computador foi desenvolvido para realização dos cálculos por método iterativo. A cada iteração, o valor da força P na barra de tração foi progressivamente incrementado em um valor pré-estabelecido. Para cada valor da força de tração, foram calculadas as variáveis reação no eixo dianteiro, patinagens das rodas dianteiras e traseiras, torque do motor, rotação do

motor, potência do motor, velocidade do trator, potência na barra de tração, eficiência de produção de tração e relação entre força de tração e peso do trator.

Definiu-se que o incremento no valor de P seria encerrado, resultando na finalização do processo iterativo, quando uma das três condições que limitam a capacidade de tração ocorresse. A primeira condição era quando a força de reação do solo no rodado dianteiro tornava-se nula, indicando perda de estabilidade longitudinal do trator (empinamento). A segunda era quando a patinagem de algum dos rodados atingia o valor de 100%. A terceira era quando o torque para produzir a força de tração requerida superava o torque máximo produzido pelo motor.

O programa de computador requereu a entrada de dados referentes às características dos eixos dianteiro e traseiro do trator, incluindo informações como tipo de pneu, números de pneu no eixo, diâmetro nominal do aro, diâmetro do pneu indeformado, raio de rolamento da roda e lastragem do eixo. Também precisou ser informado o peso do trator sem lastros, as coordenadas horizontal e vertical do centro de gravidade do trator com relação ao centro do rodado traseiro, a distância entre centros dos rodados, as distâncias horizontal e vertical entre a barra de tração e o centro do eixo traseiro, o índice de cone do solo, os ângulos de inclinação da superfície do solo e da força aplicada na barra de tração e o incremento dessa força.

Além desses parâmetros, foi necessário informar a curva de torque e a respectiva rotação produzidos no motor, obtida com base em pontos de operação do motor. Esses pontos são referentes às condições de rotação máxima, rotação nominal, potência máxima e torque máximo. Adicionalmente, especificou-se o valor da eficiência do sistema de transmissão de potência, as relações de transmissão entre o motor e os dois eixos, se a tração dianteira estará ligada ou desligada e a posição percentual da alavanca do acelerador. Ao finalizar a simulação da capacidade de tração, o programa de computador informou qual dos três fatores limitou e a tração e disponibilizou as variáveis calculadas na simulação na forma de tabela e gráficos.

2.4.2. Desenvolvimento do sistema embarcado para a realização de testes experimentais utilizados para validar o modelo matemático

Um sistema embarcado para aquisição de dados durante os ensaios de tração foi desenvolvido e instalado em um trator agrícola de rodas. Esse desenvolvimento não apenas reduziu os custos associados à execução do trabalho, mas também

facilitou a aquisição e processamento dos dados, conforme demonstrado em trabalhos anteriores que implementaram esse tipo de sistema (ASHOK KUMAR et al., 2017; GUPTA et al., 2019; NATARAJ et al., 2021; SHRIVASTAVA et al., 2023).

Sensores para medir a força aplicada na barra de tração, a velocidade de deslocamento do trator, a velocidade angular das rodas motrizes, a velocidade angular do eixo da TDP (tomada de potência), as condições meteorológicas do ar atmosférico (temperatura, umidade e pressão) e as coordenadas geográficas do trator foram utilizados no sistema embarcado. A Tabela 2.2 traz as especificações dos componentes do sistema embarcado, assim como suas respectivas finalidades.

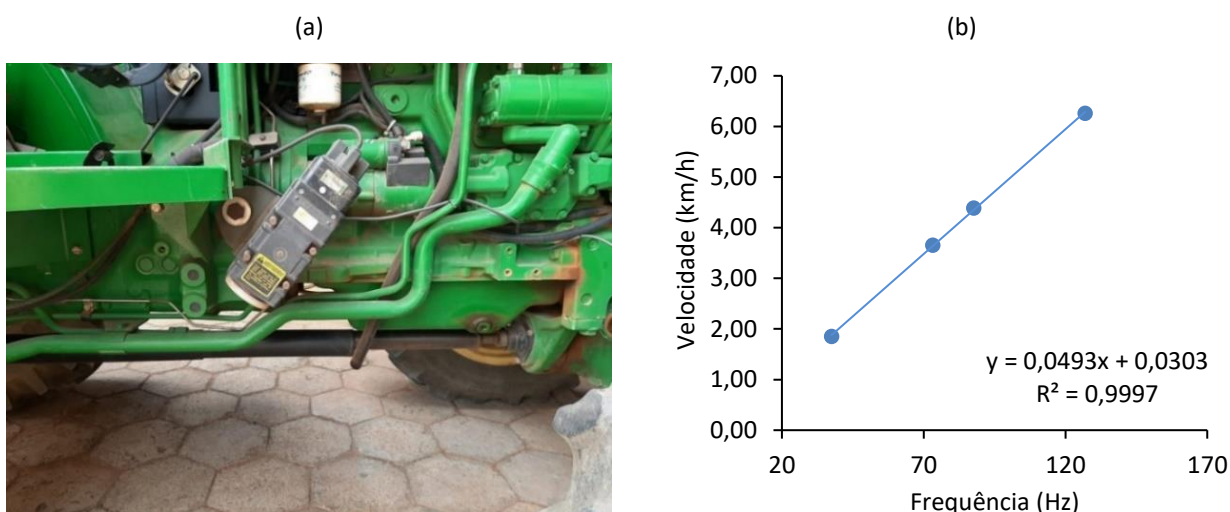
Tabela 2.2 – Especificações dos componentes utilizados no sistema embarcado para aquisição de dados do trator agrícola durante ensaio de tração

Componente	Quantidade	Fabricante	Aplicação
Placa ESP32	1	Espressif Systems, Xangai, China	Placa de desenvolvimento microcontrolada
Conversor ADC ADS1015	1	Texas Instruments, Dallas, EUA	Conversor de sinal analógico em digital
Célula de carga	1	Alfa Instrumentos, São Paulo-SP, Brasil	Medir a força de tração
Sensor indutivo de proximidade	5	Sense, São Paulo-SP, Brasil	Medir a velocidade teórica das rodas motrizes e a velocidade angular da TDP
Radar	1	Dickey-John, Alburn-IL, EUA	Medir a velocidade do trator
Módulo GNSS	1	U-Blox, Zurique, Suíça	Obter as coordenadas geográficas
Sensor combinado de temperatura, umidade e pressão	1	Bosch, Reutlingen, Alemanha	Medir temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica

Fonte: O autor (2024)

A velocidade de deslocamento do trator foi obtida por meio do radar da marca Dickey-John, modelo RVS II (Figura 2.2a). Este sensor foi calibrado relacionando a velocidade média de deslocamento com a frequência do sinal elétrico gerado pelo radar (Figura 2.2b). A calibração procedeu-se com o trator percorrendo uma distância de 28 metros. A velocidade média foi calculada com base no tempo gasto no percurso, considerando três repetições. Esse procedimento foi repetido para quatro valores de velocidade.

Figura 2.2 – Radar usado para medir a velocidade de deslocamento do trator: (a) posição de instalação do radar no trator, (b) curva de calibração do radar



Fonte: O Autor.

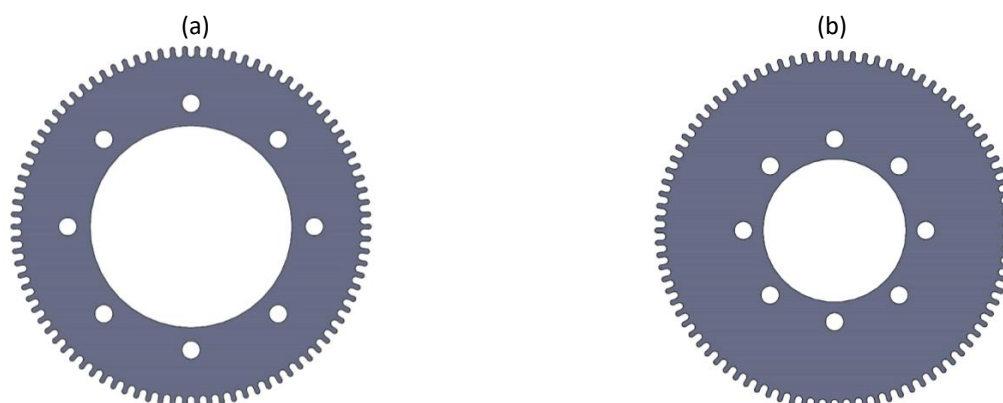
A patinagem das rodas motrizes foi medida nos eixos traseiro e dianteiro. Para isso, a patinagem foi obtida a partir da relação entre a velocidade de deslocamento do trator, denominada velocidade real, e a velocidade desenvolvida pelo movimento angular das rodas, denominada velocidade teórica (Equação 2.29). A velocidade teórica foi obtida multiplicando a velocidade angular das rodas pelos respectivos raios de rolamento. Para medir a velocidade angular das rodas, foram utilizados sensores indutivos de proximidade e discos metálicos dentados (Figura 2.3).

$$s = 1 - \frac{v_a}{v_t} \quad (2.29)$$

em que:

- s - Patinagem da roda, decimal;
- V_t = velocidade de deslocamento do trator, m/s.

Figura 2.3 – Discos metálicos dentados dos eixos (a) dianteiro, (b) traseiro, utilizados para medição da velocidade angular das rodas



Fonte: O Autor.

Os discos metálicos dentados foram instalados na parte interna de cada roda em conjunto com o sensor indutivo. O sensor indutivo gerou sinal elétrico pulsado à medida que detectou os dentes metálicos do disco durante a revolução da roda. A contagem desses pulsos em um intervalo de tempo de 3 segundos foi utilizada para o cálculo da velocidade angular da roda (MOINFAR et al., 2020). Tanto o disco das rodas dianteiras como os discos das rodas traseiras foram projetados com 90 dentes.

O mesmo princípio adotado para medir a velocidade angular da roda motriz também foi aplicado para medir a velocidade angular do eixo da TDP. Neste caso o sensor indutivo gerou os pulsos a partir da detecção das estrias do eixo da TDP (Figura 2.4). Adicionalmente, foi obtida a relação de transmissão entre a TDP e o motor, permitindo o cálculo da velocidade angular de trabalho (rotação) do motor.

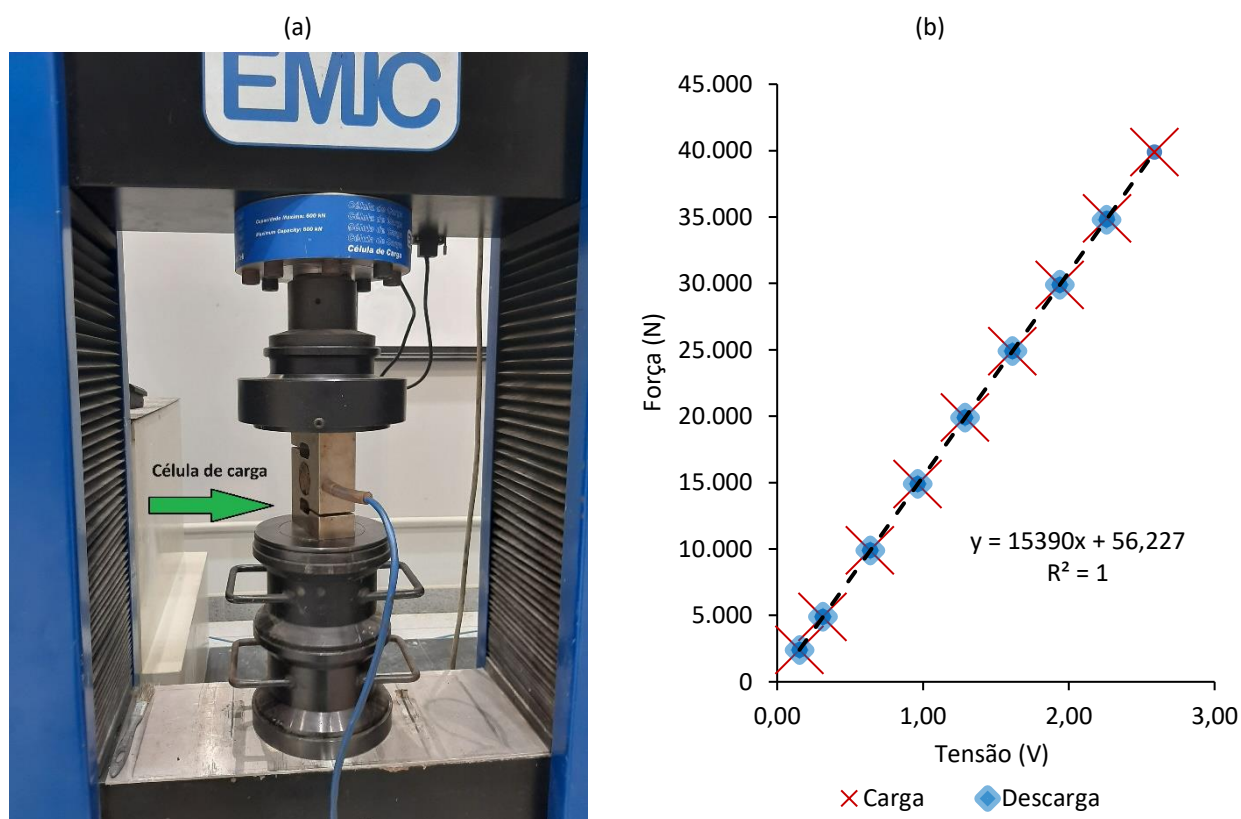
Figura 2.4 – Sensor de proximidade indutivo utilizado para medir a velocidade angular da TDP



Fonte: O Autor.

Para medir a força aplicada na barra de tração do trator utilizou-se uma célula de carga. A célula de carga, ao ser energizada, produziu um sinal elétrico com amplitude na ordem de mV. Foi utilizado o amplificador operacional INA 128, da fabricante Texas Instruments para amplificar a amplitude do sinal elétrico. O sinal elétrico amplificado foi lido pela placa ESP32 com o auxílio do conversor analógico-digital ADS 1115, que também é fabricado pela Texas Instruments e oferece uma resolução de 16 *bits*. A célula de carga foi calibrada usando uma máquina universal de ensaios (Emic, São José dos Pinhais, PR, Brasil) (Figura 2.5a). O processo de calibração abrangeu ciclos de carga e descarga, relacionando a amplitude do sinal elétrico amplificado com a carga aplicada sobre a célula de carga (KUMAR; TEWARI; NARE, 2016). A carga máxima aplicada na calibração foi de 40.000 N (Figura 2.5b).

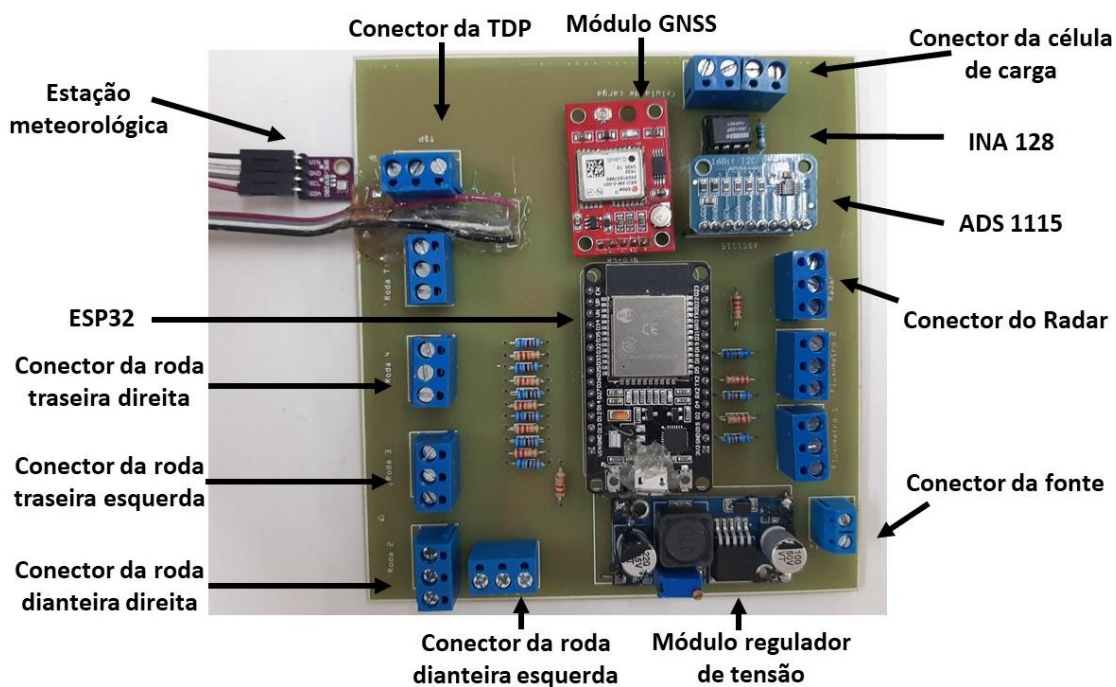
Figura 2.5 – Célula de carga utilizada para medir a força na barra de tração: (a) ensaio de calibração, (b) curva de calibração



Fonte: O Autor.

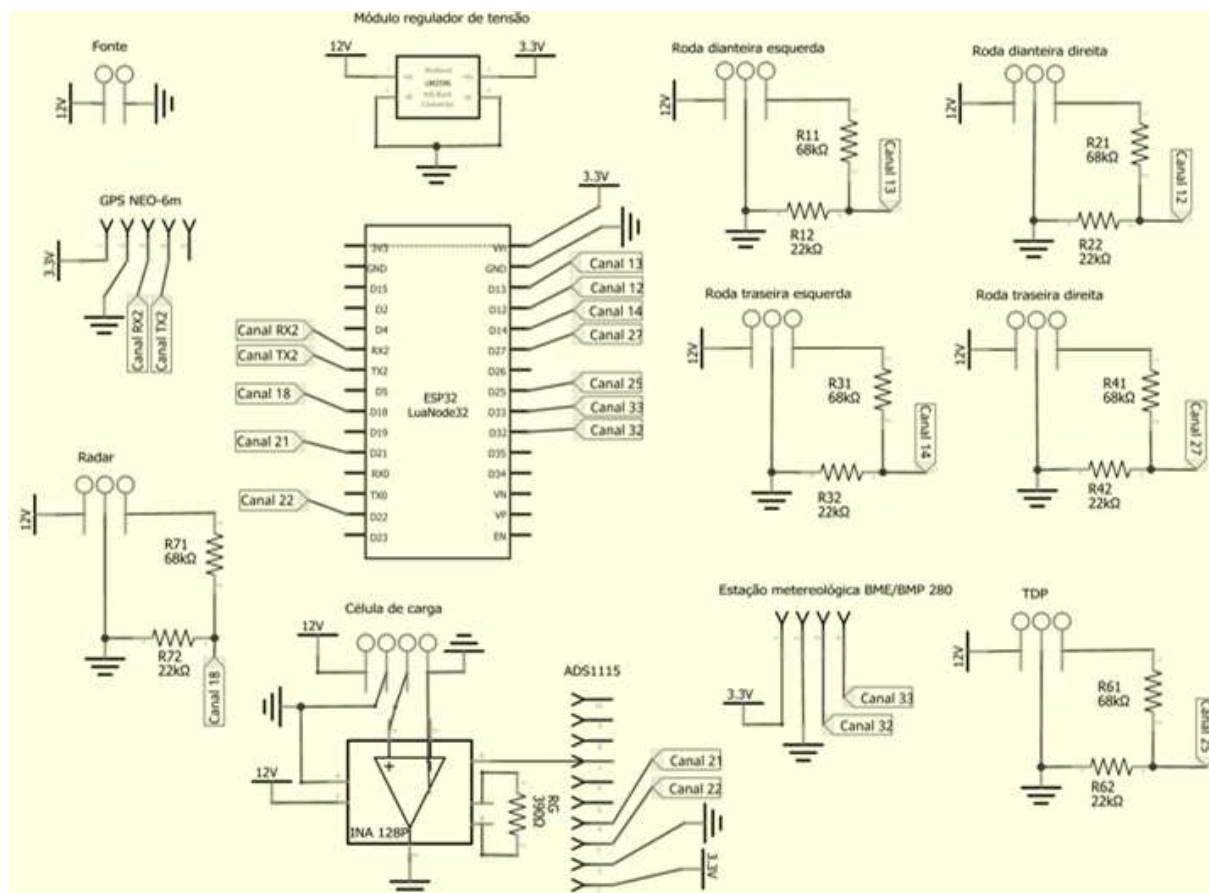
O sistema embarcado desenvolvido (Figuras 2.6 e 2.7) foi alimentado pela bateria do trator, com intermédio de um regulador de tensão tipo *step-down* ajustável.

Figura 2.6 – Sistema embarcado desenvolvido para aquisição de dados do trator durante ensaio de tração



Fonte: O Autor.

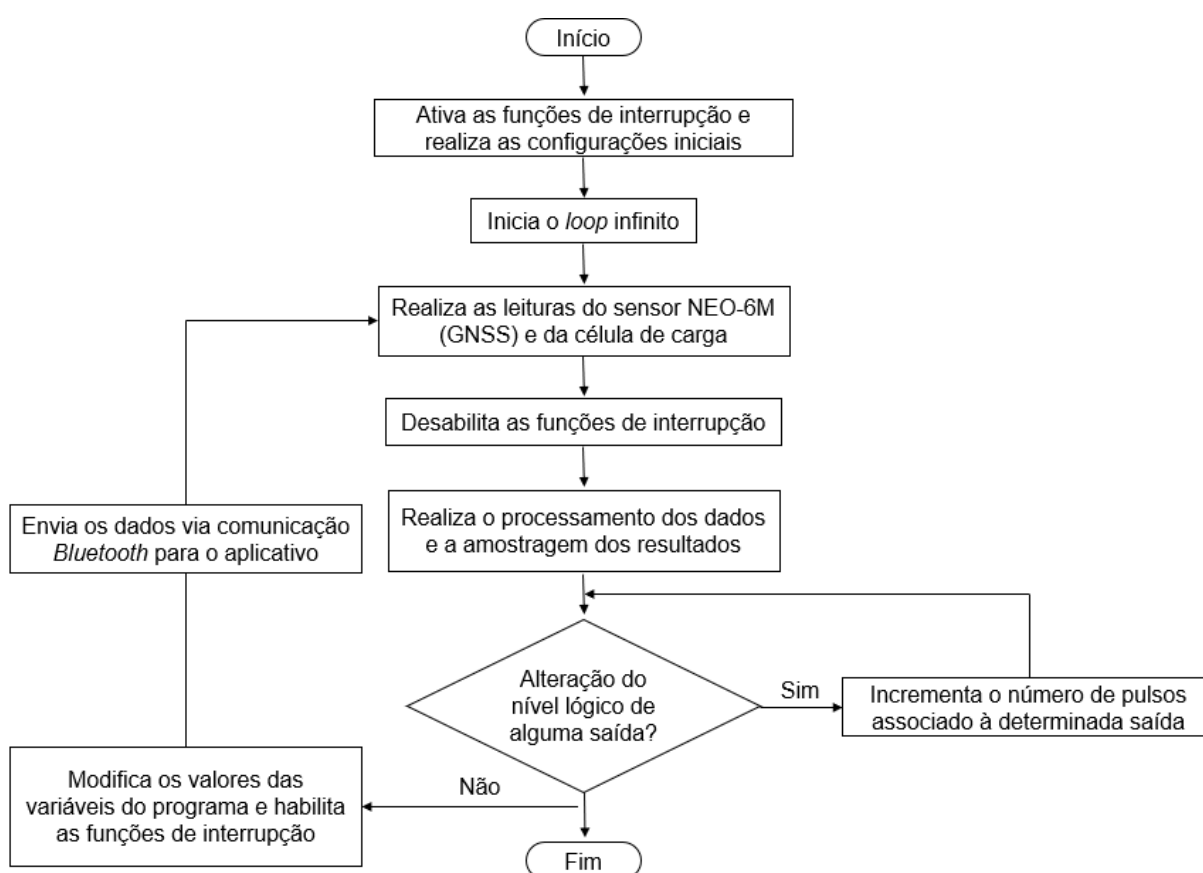
Figura 2.7 – Diagrama do circuito elétrico do sistema embarcado



Fonte: O Autor.

O *software* do sistema embarcado foi desenvolvido em linguagem de programação C++, no Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE), da plataforma Arduino. A placa de desenvolvimento ESP32-WROOM-32 foi utilizada para execução do programa. O tempo de amostragem dos dados foi definido em 3 s. Durante os ensaios, os dados eram transmitidos via comunicação *Bluetooth* para um aplicativo de celular, desenvolvido na plataforma MIT App Inventor. Posteriormente, os dados eram então armazenados no dispositivo móvel. O fluxograma apresentado na Figura 2.8 ilustra o funcionamento do *software* desenvolvido.

Figura 2.8 – Fluxograma de execução do programa de computador do sistema embarcado



Fonte: O Autor.

2.4.3. Ensaios de tração

Os ensaios de tração para aquisição de dados que permitiram validar o programa de computador foram realizados na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão em Produção de Grandes Culturas e Bioenergia da Universidade Federal de Viçosa. Foi utilizado o trator agrícola John Deere, modelo 5705, equipado com

pneus dianteiros e traseiros diagonais e com tração dianteira auxiliar (TDA). Esse trator possui motor turboalimentado com 4 cilindros, cilindrada total de 4.500 cm³, torque máximo de 330 Nm a 1.600 rpm, potência de 62 kW, permanecendo constante na faixa de rotação compreendida entre 2.000 e 2.400 rpm.

Para a inserção das características desse trator no programa de computador, obteve-se as coordenadas do centro de gravidade, a massa total do trator, bem como a massa de cada eixo utilizando-se uma balança rodoviária com capacidade de 20.000 kg (Figura 2.9). Esse procedimento foi necessário, uma vez que, tanto a massa total do trator quanto a distribuição dessa massa entre os eixos exercem um papel fundamental no desempenho do trator (KUMAR et al., 2018). O centro de gravidade foi determinado pelo método das pesagens. Desse modo, foi aferida a massa total do trator, bem como das massas isoladas do eixo dianteiro ao nível da superfície e do eixo dianteiro com elevação, conforme ilustrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Ensaio de determinação das coordenadas do centro de gravidade pelo método das pesagens



Fonte: O Autor.

O índice de cone do solo representou a força necessária por unidade de área para uma ponta cônica para penetrar no solo a uma velocidade constante (KUMAR;

NOORI; PANDEY, 2019). Essa variável, empregada para avaliar a resistência à penetração do solo, foi obtida experimentalmente utilizando o penetrômetro de cone Falker PLG 1020 (Falker, Porto Alegre, RS, Brasil). Os ensaios de tração foram realizados em três condições de solo: estrada de terra, solo compactado e solo gradado. Nas condições de solo compactado e gradado, os índices de cone do solo foram medidos na camada com profundidade entre 0 e 0,15 m. Para cada uma das duas condições de solo, a medição foi feita em pontos aleatórios a fim de se obter o valor médio do índice de cone do solo. Cada medição foi feita a uma velocidade aproximadamente constante de 30 mm/s, conforme recomendado por normas (ASAE, 2009; ASAE STANDARDS, 1999), sendo que as medições foram realizadas antes da execução dos ensaios. Para a condição de estrada de terra batida adotou-se o valor do índice de cone de 5.000 kPa, conforme determinado por Mills et. al (2021).

Além das três condições de solo, foram consideradas duas condições distintas de lastragem, uma com o trator desprovido de lastros e a outra com lastros sólidos, sendo 70 kg em cada um dos eixos e 180 kg na parte frontal. Adicionalmente, considerou-se duas variações da relação de transmissão (duas marchas), denominadas 2A e 2B, bem como as duas condições da tração dianteira (ligada ou desligada). A carga aplicada na barra de tração foi obtida utilizando um segundo trator como freio, sendo a magnitude da carga da ajustada conforme a escolha da relação de transmissão desse segundo trator. As combinações das condições de solo, lastragem, relação de transmissão e tração dianteira resultaram em 24 condições experimentais, sendo que em cada uma delas utilizou-se três cargas de tração, totalizando 72 ensaios de tração. Cada ensaio foi executado em pistas planas individuais com comprimento de 100 m. Em todos os ensaios, o acelerador do trator ensaiado foi mantido na posição de aceleração máxima.

2.4.4. Validação do programa de computador

As simulações utilizando o programa de computador desenvolvido foram executadas em conformidade com os ensaios de tração, visando a validação do programa. Foram executadas 24 simulações, abrangendo todas as condições dos ensaios de tração. Em todas as simulações foi adotado 0,85 para a eficiência de transmissão de potência do trator, já que perdas de potência estão associadas ao sistema de transmissão. Adicionalmente, foi efetuada uma análise comparativa,

confrontando os resultados simulados com os dados dos ensaios, com o propósito de melhorar a compreensão dos resultados.

2.4.4.1. Análise estatística para validação do modelo

Para a validação do programa de computador, foi realizada a comparação entre os dados experimentais e os dados obtidos em simulação para as variáveis patinagem do rodado dianteiro, patinagem do rodado traseiro, rotação do motor, velocidade do trator e potência na barra de tração. Destaca-se que a potência na barra de tração foi calculada efetuando o produto entre a velocidade de deslocamento do trator e a força aplicada na barra de tração. Para validação do programa de computador analisou-se a concordância, a igualdade e os desvios entre os dados gerados pelas simulações e os dados experimentais.

A concordância dos dados foi analisada por meio do índice de concordância de Willmott (WILLMOTT et al., 1985), calculado utilizando a Equação (2.30). Os valores do índice variam de 0, situação em que não existe concordância, até 1, caso no qual a concordância é perfeita (OLIVEIRA et al., 2008). Também foi avaliado o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, 1997). O cálculo desse índice considera o coeficiente de correlação de Pearson e o índice de concordância de Willmott, conforme apresentado na Equação (2.31). A partir do índice de desempenho, gerou-se classes para o desempenho do programa de computador (Tabela 2.3).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|M_i - E_{med}|) + (|E_i - E_{med}|)]^2} \quad (2.30)$$

$$c = r \cdot d \quad (2.31)$$

em que:

- d - índice de concordância de Willmott;
- M_i - resultado da variável considerada pelo modelo;
- E_i - resultado da variável considerada pelo teste experimental;
- E_{med} - média dos resultados da variável considerada pelo teste experimental;
- n - número de observações;
- c - índice de desempenho de Camargo e Sentelhas;
- r - coeficiente de correlação de Pearson.

Tabela 2.3 – Classificação do índice de desempenho de Camargo e Sentelhas

Valor do índice	Desempenho
$c > 0,85$	Ótimo
$0,75 < c \leq 0,85$	Muito bom
$0,65 < c \leq 0,75$	Bom
$0,60 < c \leq 0,65$	Mediano
$0,50 < c \leq 0,60$	Sufrível
$0,40 < c \leq 0,50$	Mau
$c \leq 0,40$	Péssimo

Fonte: Camargo, A., P.; Sentelhas, 1997

A avaliação da igualdade entre os dados obtidos com o programa de computador e os dados ensaios de tração foi verificada por meio da aplicação da ANOVA (Análise de Variância). Para isso, foi ajustado um modelo de regressão linear simples sem intercepto, conforme a Equação (2.32). Nesse modelo de análise, a reta de regressão passa obrigatoriamente pela origem, para avaliar a igualdade das variáveis que compõem os dois eixos. A avaliação consistiu em verificar se o coeficiente angular da reta foi igual a 1. Desse modo, o teste t de Student foi aplicado, considerando um nível de significância de 5%. Foi estabelecida a hipótese nula, na qual o coeficiente angular é igual a 1, e a hipótese alternativa que considera esse parâmetro diferente de 1. Um programa de computador em linguagem Python versão 3.9 foi desenvolvido para efetuar os cálculos necessários.

$$Y_i = \beta_1 \cdot X_i + e_i \quad (2.32)$$

em que:

- Y_i - valor da variável considerada de acordo com o teste experimental;
- X_i - valor da variável considerada de acordo com o modelo;
- β_1 - Coeficiente angular da reta;
- e_i - erro experimental.

Adicionalmente, foram avaliados os desvios entre os valores obtidos com programa de computador e nos ensaios de tração. Foi efetuada a análise da dispersão dos pontos em torno da reta de regressão mediante o cálculo do erro quadrático médio para cada variável, conforme expresso pela Equação (2.33). A magnitude da diferença entre os valores obtidos nos ensaios de tração e nas simulações também foi avaliada, considerando o desvio relativo, conforme indicado na Equação (2.34).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2.33)$$

$$DR (\%) = \left| \frac{X_i - Y_i}{Y_i} \right| \times 100 \quad (2.34)$$

em que:

- RMSE - erro quadrático médio;
- Y_i - valor da variável considerada de acordo com o teste experimental;
- X_i - valor da variável considerada de acordo com o modelo;
- n - número de observações;
- DR - desvio relativo.

2.4.4.2. Análise do desempenho de tração do trator

Os dados resultantes das simulações computacionais foram confrontados com os resultados dos ensaios de tração, considerando as condições semelhantes. Essa análise não apenas permitiu comparar as informações derivadas do modelo e dos ensaios, mas também possibilitou realizar uma avaliação acerca do desempenho de trator rodas que foi modelado.

2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

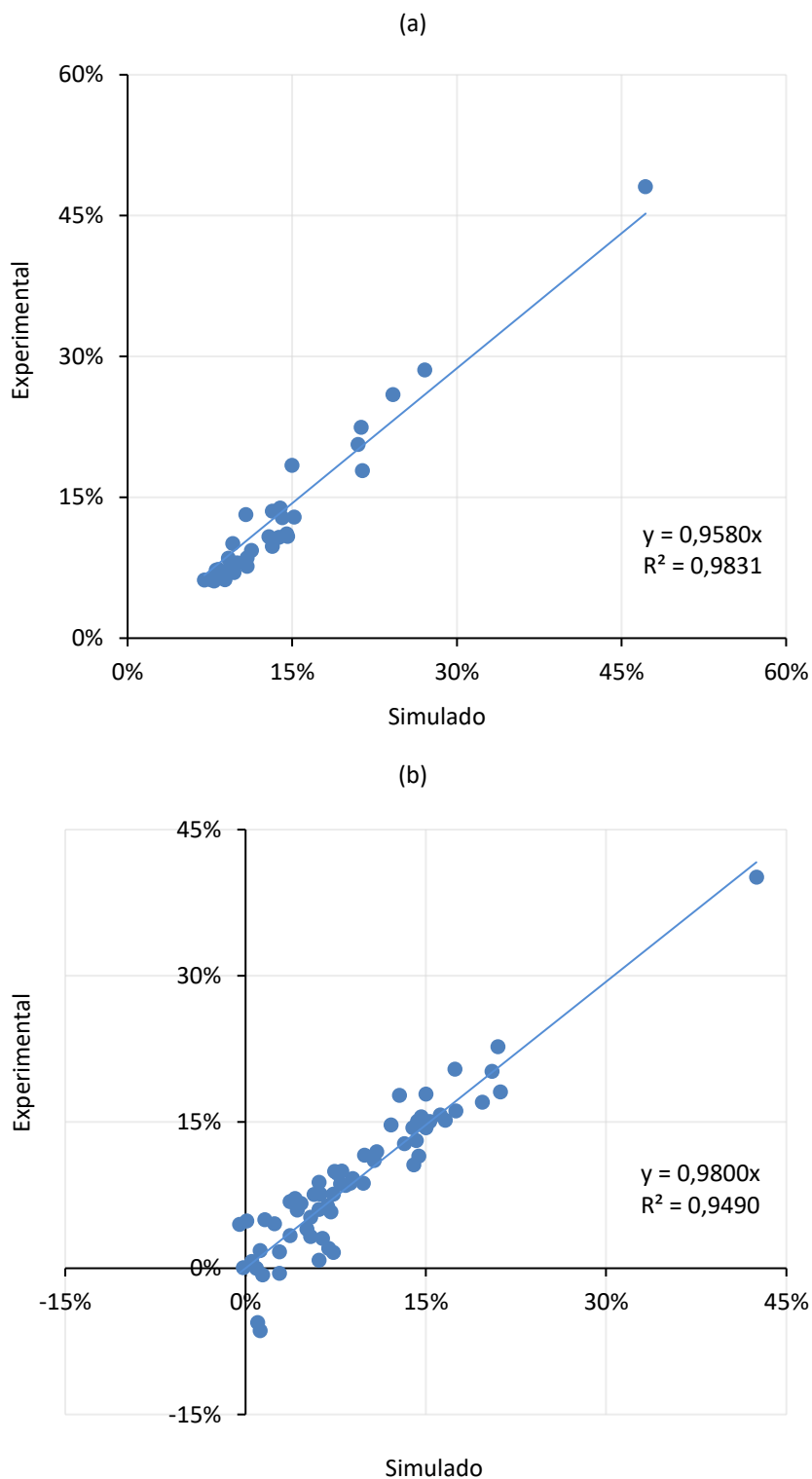
O programa de computador para simulação do desempenho de tração, o programa do sistema embarcado e o aplicativo foram nomeados “Traction”, “Ensaio de Tratores Agrícolas - Sistema Embarcado”, “Ensaio de Tratores Agrícolas – Aplicativo” e registrados no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob os números BR512023002647-6, BR512023002646-8 e BR512023002644-1, respectivamente. No Apêndice A são apresentadas as telas da interface gráfica do usuário do programa de computador para simulação do desempenho de tração. A tela do aplicativo, relacionada à visualização e armazenamento de dados do sistema embarcado, é apresentada no Apêndice B.

Nos ensaios de tração, observou-se que os valores de patinagem atingiram 48% e 62%, para os rodados dianteiro e traseiro, respectivamente. A rotação do motor variou na faixa de 2.500 rpm a 2.650 rpm. Na marcha 2A, o trator registrou valores de velocidade variando de 2,69 km/h a 3,31 km/h, enquanto na marcha 2B, o deslocamento ocorreu em velocidades que oscilaram de 2,65 km/h a 7,62 km/h, com base nas medidas obtidas por meio do radar. A força de tração variou dentro da faixa de 3.800 N a 20.400 N, enquanto a potência na barra de tração variou de 3,5 kW a 36,0 kW.

2.5.1. Validação do programa de computador

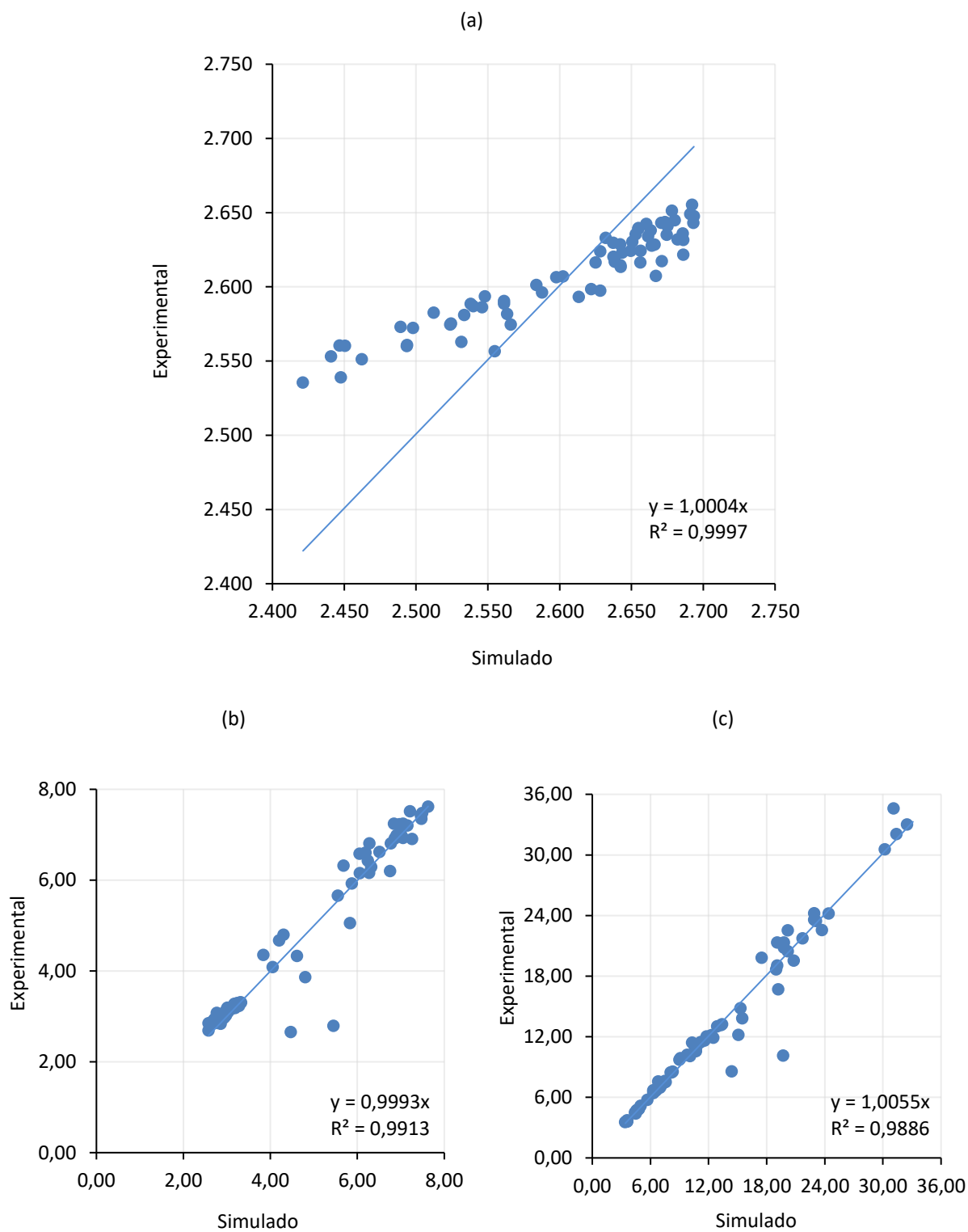
Na Figura 2.10 são apresentados gráficos de dispersão, além da reta de regressão ajustada, dos resultados simulados pelo programa de computador e dados obtidos nos ensaios de tração (experimental), para a patinagem do rodado dianteiro e para a patinagem do rodado traseiro. De forma similar, foram elaborados gráficos de dispersão para a rotação do motor, velocidade deslocamento do trator e potência na barra de tração (Figura 2.11). O modelo de regressão linear ajustado foi um com o intercepto nulo, para facilitar a comparação entre os resultados experimentais e os simulados. Observou-se uma dispersão relativamente baixa dos dados para todas as variáveis, assegurando um ajuste preciso dos pontos junto a reta de regressão. Em relação à rotação do motor, observou-se que as maiores diferenças entre os resultados experimentais e simulados ocorreram para os menores valores da rotação.

Figura 2.10 – Gráficos de dispersão entre os resultados simulados e experimentais considerando as variáveis: (a) patinagem do rodado dianteiro, (b) patinagem do rodado traseiro



Fonte: O Autor.

Figura 2.11 – Gráficos de dispersão entre os resultados simulados e experimentais considerando as variáveis: (a) rotação do motor, (b) velocidade do trator, (c) potência na barra de tração



Fonte: O Autor.

Os valores do índice de concordância de Willmott (d), do coeficiente de correlação de Pearson (r), do índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (c) e da classe de acordo com esse índice, para cada variável analisada, são apresentados na Tabela 2.4. Observou-se que menor valor de concordância e desempenho ocorreu para a rotação do motor. Entretanto, essa variável ainda teve um valor elevado para o índice de concordância de Willmott e foi classificada como “Muito bom” de acordo com o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas. As outras variáveis obtiveram a classificação “Ótimo” para esse índice. Tais resultados comprovam a concordância dos dados gerados pelo programa de computador com os resultados experimentais.

Tabela 2.4 – Resultados dos índices de concordância entre os resultados experimentais e simulados

Parâmetro	Patinagem do rodado dianteiro	Patinagem do rodado traseiro	Rotação do motor	Velocidade real	Potência na barra de tração
d	0,97	0,94	0,80	0,98	0,99
r	0,96	0,92	0,95	0,97	0,98
c	0,93	0,86	0,76	0,95	0,97
Classe	Ótimo	Ótimo	Muito bom	Ótimo	Ótimo

d: Índice de concordância de Willmott; r: Coeficiente de correlação de Pearson; c: Índice de desempenho de Camargo e Sentelhas.

Na análise da igualdade entre os dados simulados e experimentais, com a avaliação da ANOVA seguida da aplicação do teste t de Student, o p-valor associado à patinagem do rodado dianteiro foi o mais baixo, com 0,0718 (Tabela 2.5). Ainda assim, o resultado do teste de hipóteses foi de não rejeitar a hipótese nula para essa variável, bem como para todas as outras. Sendo assim, foi possível concluir que o parâmetro β_1 é estatisticamente igual a 1 ao nível de significância de 5%. Essa

constatação estabelece que os resultados obtidos com o programa de computador foram estatisticamente iguais aos resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 2.5 – Resultados do teste t de Student e das métricas dos desvios entre os resultados experimentais e simulados

Parâmetro	Patinagem do rodado dianteiro	Patinagem do rodado traseiro	Rotação do motor	Velocidade real	Potência na barra de tração
β_1	0,9580	0,9800	1,0004	0,9994	1,0055
p-valor	0,0718	0,4870	0,8691	0,9547	0,6689
Desvio relativo médio (%)	18,43%	126,32%	1,50%	5,99%	6,05%
Desvio relativo máximo (%)	42,82%	3801,06%	4,51%	95,13%	94,58%
RMSE	2,13%	2,64%	47,39 rpm	0,46 km/h	1,64 kW

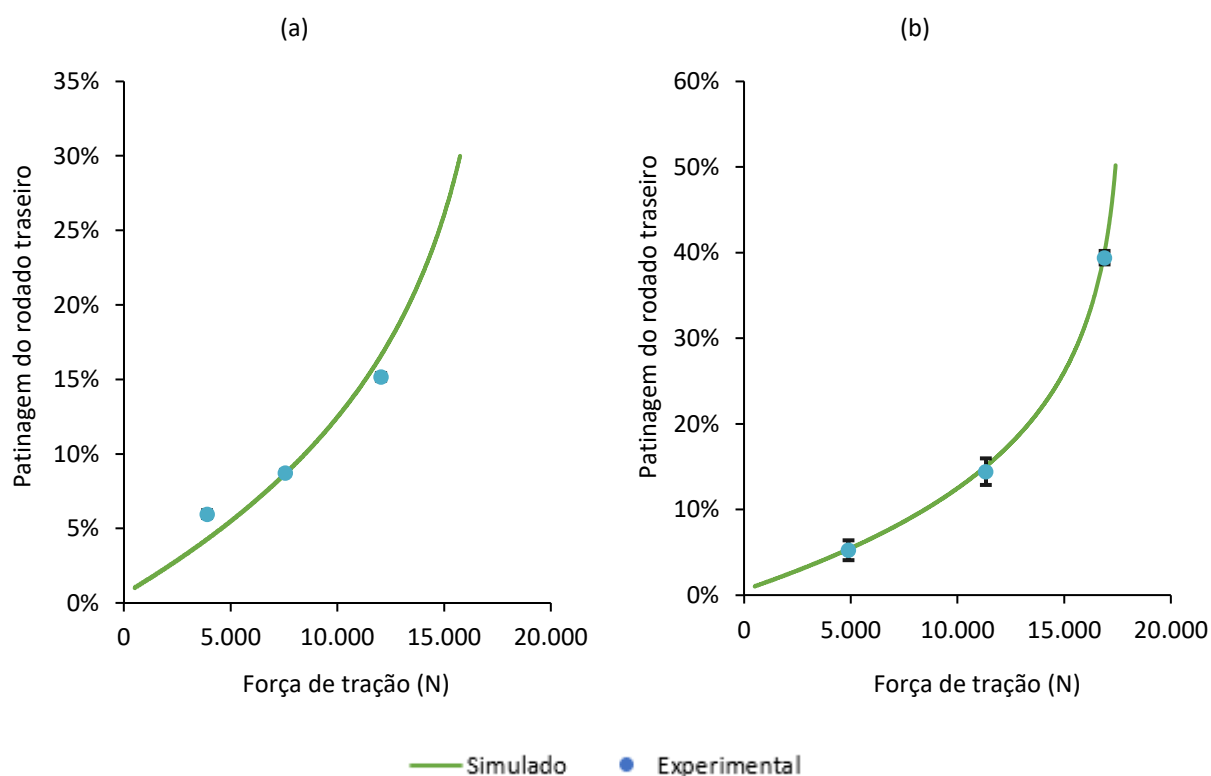
Observou-se, ainda, que o erro relativo médio foi menor ou igual a 6,05%, com exceção das patinagens dianteira e traseira (Tabela 2.5). O valor do desvio associado à patinagem foi mais elevado, tanto para o rodado traseiro quanto para o rodado dianteiro. Esse desvio foi ainda maior nos ensaios que a medida da patinagem do rodado traseiro foi inferior a 7% (Figura 2.10b). Tal comportamento demonstrou uma limitação do programa de computador em calcular, com precisão, condições de operação do trator que resultam em pouca patinagem dos rodados. Ainda assim, deve-se ressaltar que em situação de campo é recomendado manter a patinagem dentro da faixa próxima de 10 a 15%, para um melhor desempenho de tração do trator (GUPTA et al., 2019), e para essa faixa, o modelo apresentou precisão em prever a patinagem das rodas dentro da faixa de interesse em situações de campo. Adicionalmente, foi constatado que os valores calculados do erro quadrático médio

indicaram uma baixa dispersão dos dados para todas as variáveis, conforme observado nos gráficos de dispersão.

2.5.2. Avaliação do desempenho de tração

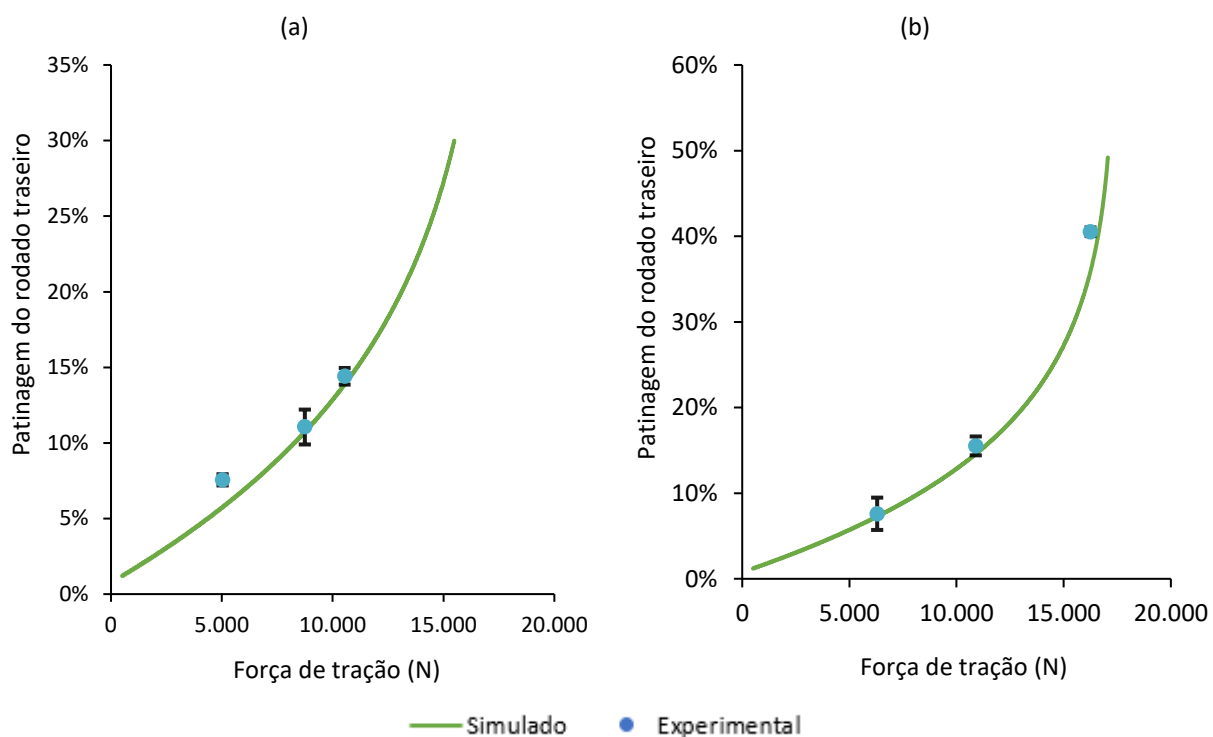
Nas Figuras 2.12, 2.13 e 2.14 são apresentados gráficos que ilustram a variação da patinagem do rodado traseiro do trator conforme o aumento da força desenvolvida na barra de tração, considerando as condições de estrada de terra, solo compactado e solo gradado, respectivamente. Nos gráficos são apresentados os resultados das simulações e dos dados experimentais para duas relações de transmissão (2A e 2B), para condição de trator com lastro com tração dianteira desligada. Os desvios dos resultados experimentais indicam o erro padrão da média, demonstrando a precisão das medidas de patinagem coletadas.

Figura 2.12 – Variação da patinagem do rodado traseiro em função da força de tração na condição estrada de terra para as marchas (a) 2A, (b) 2B



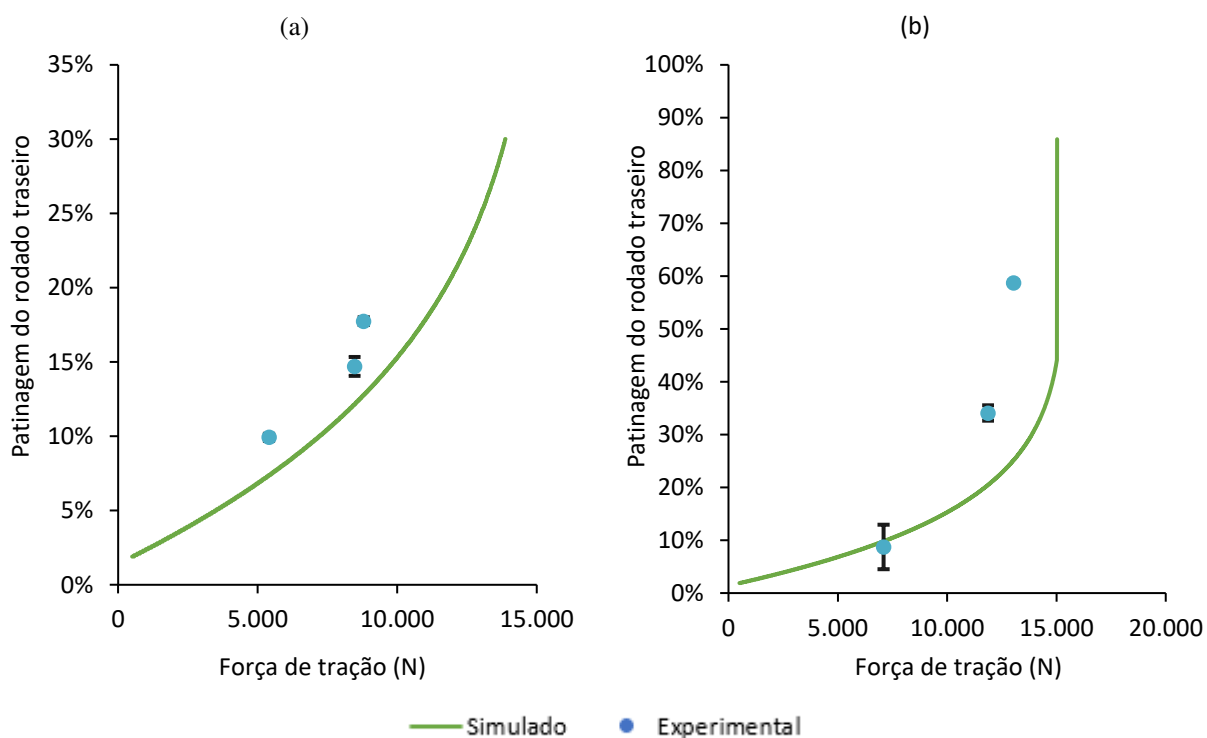
Fonte: O Autor.

Figura 2.13 Variação da patinagem do rodado traseiro em função da força de tração na condição solo compactado para as marchas (a) 2A, (b) 2B



Fonte: O Autor.

Figura 2.14 - Variação da patinagem do rodado traseiro em função da força de tração na condição de solo gradado para as marchas (a) 2A, (b) 2B



Fonte: O Autor.

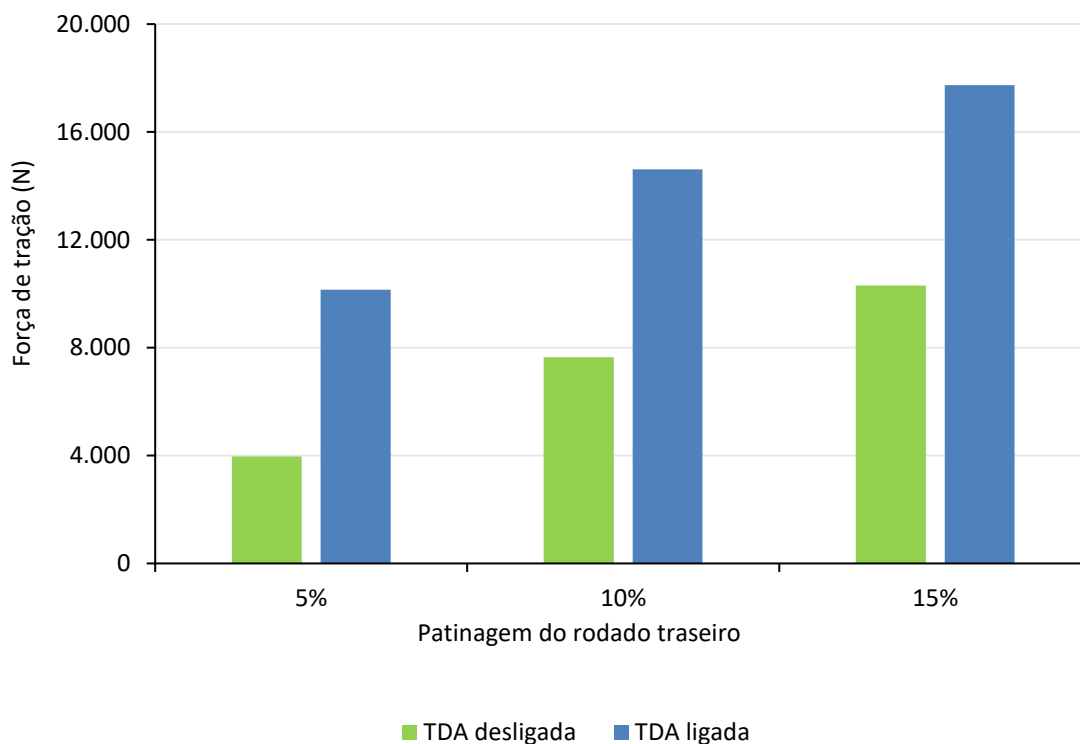
Observou-se que a patinagem do rodado traseiro aumentou de forma não linear com o aumento da força de tração, para as diversas condições de solo e relação de transmissão. Valores menores de patinagem foram registrados em situações que exigiram menores forças de tração. A patinagem aumentou continuamente com o incremento da força de tração até atingir um valor limite. A partir desse ponto, a força tendeu a se estabilizar, enquanto a patinagem continuou aumentando. Resultados similares foram encontrados por Sahay e Tewari (2004), empregando um modelo de simulação de tração, e por Moinfar et al. (2020) por meio de ensaios de tração. Esse fenômeno é atribuído ao aumento das forças atuantes na interface pneu-solo, que causam o cisalhamento das camadas de solo. Essas forças atuantes entre a superfície e o pneu definem a força de tração bruta da roda (BULGAKOV et al., 2021). Ademais, observou-se que o aumento da velocidade do trator, mudando da marcha 2A para 2B, resultou no aumento da força de tração limite alcançada e no aumento da patinagem.

O trator necessitou desenvolver maior patinagem no rodado traseiro para tracionar cargas com magnitudes semelhantes, à medida que o índice de cone do solo diminuiu. Essa tendência foi mais evidente na situação de solo gradado. Nessa condição, os níveis de patinagem observados foram superiores em comparação com as situações de estrada de terra e solo compactado, para um mesmo nível de carga aplicada na barra de tração. Isso está em concordância com testes realizados por Serrano (2009), que demonstraram a tendência de aumento da patinagem com o decréscimo do índice de cone. Isso é atribuído principalmente pela menor resistência ao rolamento existente em superfícies que são mais compactadas (KUMAR; NOORI; PANDEY, 2019).

A ação de acionar a TDA permitiu que o trator pudesse desenvolver maior força de tração, conforme ilustrado na Figura 2.15. No gráfico é apresentado as médias das forças de tração responsáveis por desenvolver patinagens com valores de 5%, 10% e 15% no rodado traseiro do trator, contemplando ambas as condições da TDA. Esses valores foram obtidos por meio dos resultados da simulação, considerando as três condições de solo analisadas. Testes experimentais realizados por Moinfar et al. (2020) também apontaram que a utilização da tração dianteira permitiu que o trator pudesse desenvolver um maior esforço sem que a patinagem aumentasse excessivamente. Além disso, a compactação do solo promovida pelas

rodas motrizes dianteiras aumenta capacidade de tração do rodado traseiro (SHAFAEI; LOGHAVI; KAMGAR, 2018).

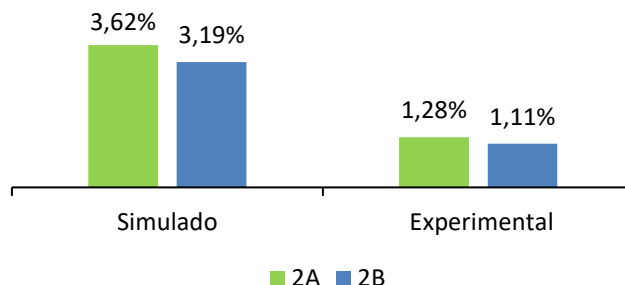
Figura 2.15 – Força de tração desenvolvida pelo trator de acordo com o estado da tração dianteira, para três níveis de patinagem do rodado traseiro



Fonte: O Autor.

O aumento da força na barra de tração resultou em uma maior demanda de torque do motor, o que ocasionou em decréscimo na sua rotação. Esse cenário foi comprovado por Han et al. (2023) por meio de simulação computacional. A representação desse fenômeno é ilustrada na Figura 2.16, que apresenta a média da redução percentual da velocidade de rotação do motor quando a carga aplicada na barra de tração aumentou do nível mínimo para o máximo, considerando resultados das simulações e dos ensaios. Observou-se que o programa de computador superestimou essa redução de velocidade com o incremento da força. Além disso, foi constatado que essa redução foi mais elevada na maior relação de transmissão, já que a marcha 2A demandou maior torque do motor.

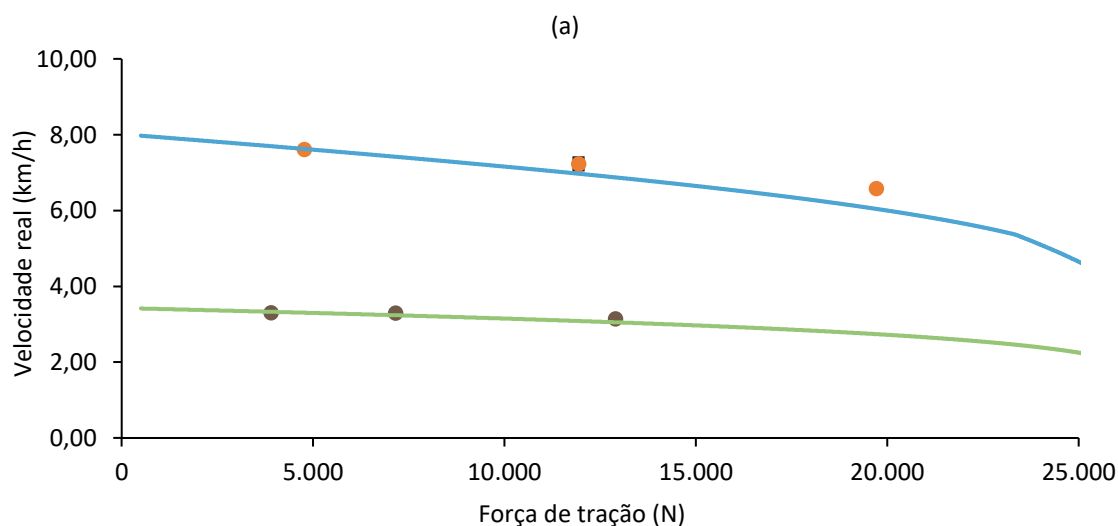
Figura 2.16 – Percentual de redução na rotação do motor por meio das simulações e dos ensaios para as marchas 2A e 2B, para aumento da força de tração do nível mínimo para o máximo

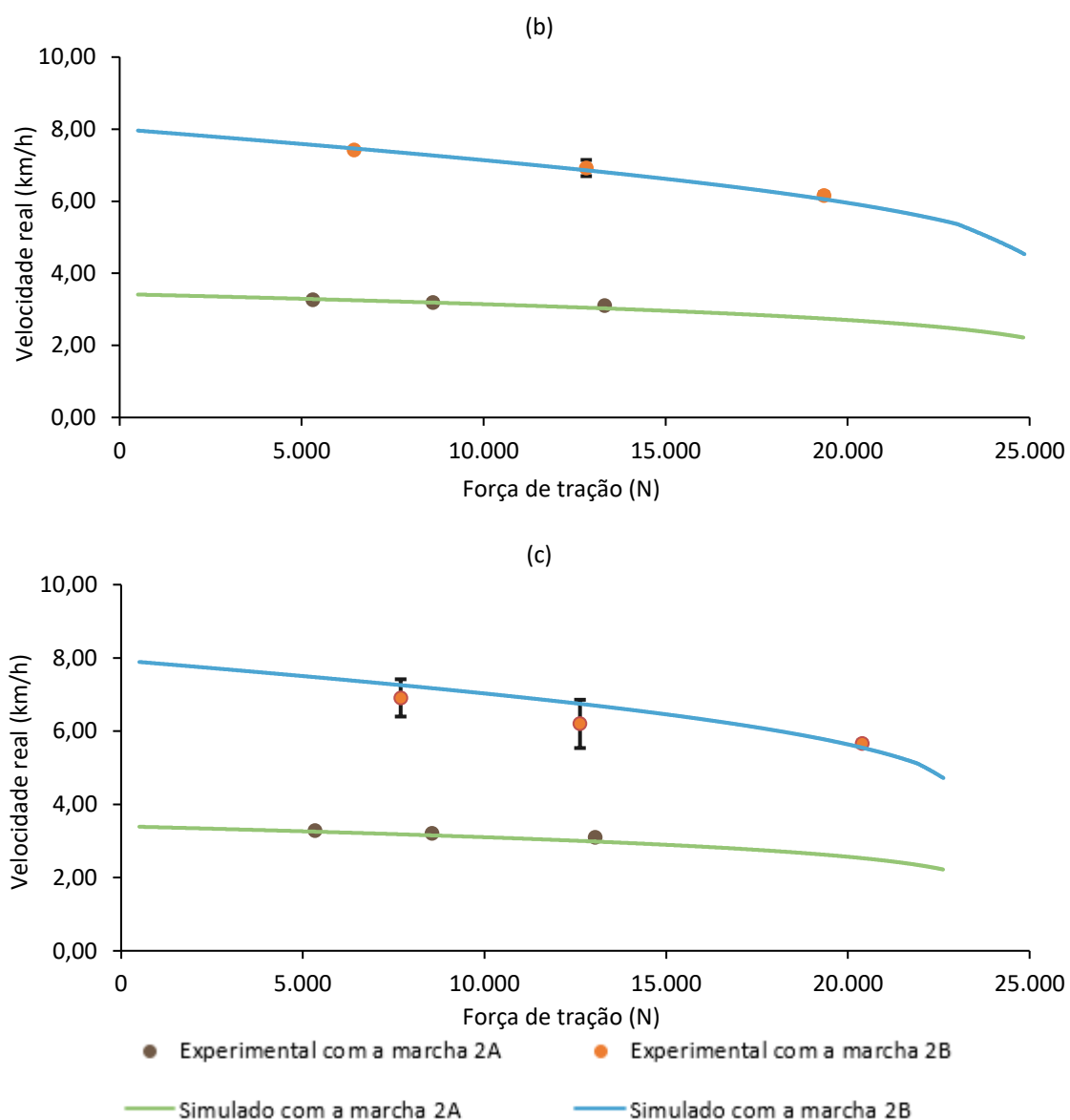


Fonte: O Autor.

Na Figura 2.17 é ilustrado a variação da velocidade do trator com o aumento da carga de tração para as duas relações de transmissão e para as três condições de solo, considerando as situações em que o trator estava lastrado e a TDA estava acionada. Essa avaliação foi feita com base nos resultados simulados e experimentais. Os desvios dos dados experimentais são referentes ao erro padrão da média. À medida que a força aplicada na barra de tração aumentou, a demanda de torque no motor também aumentou. Isso ocasionou em uma redução da velocidade de rotação do motor e, conseqüentemente, no decréscimo da velocidade de deslocamento.

Figura 2.17 – Variação da velocidade de deslocamento do trator em função do aumento da força de tração nas marchas 2A e 2B para as condições de solo de (a) estrada de terra, (b) solo compactado, (c) solo gradado



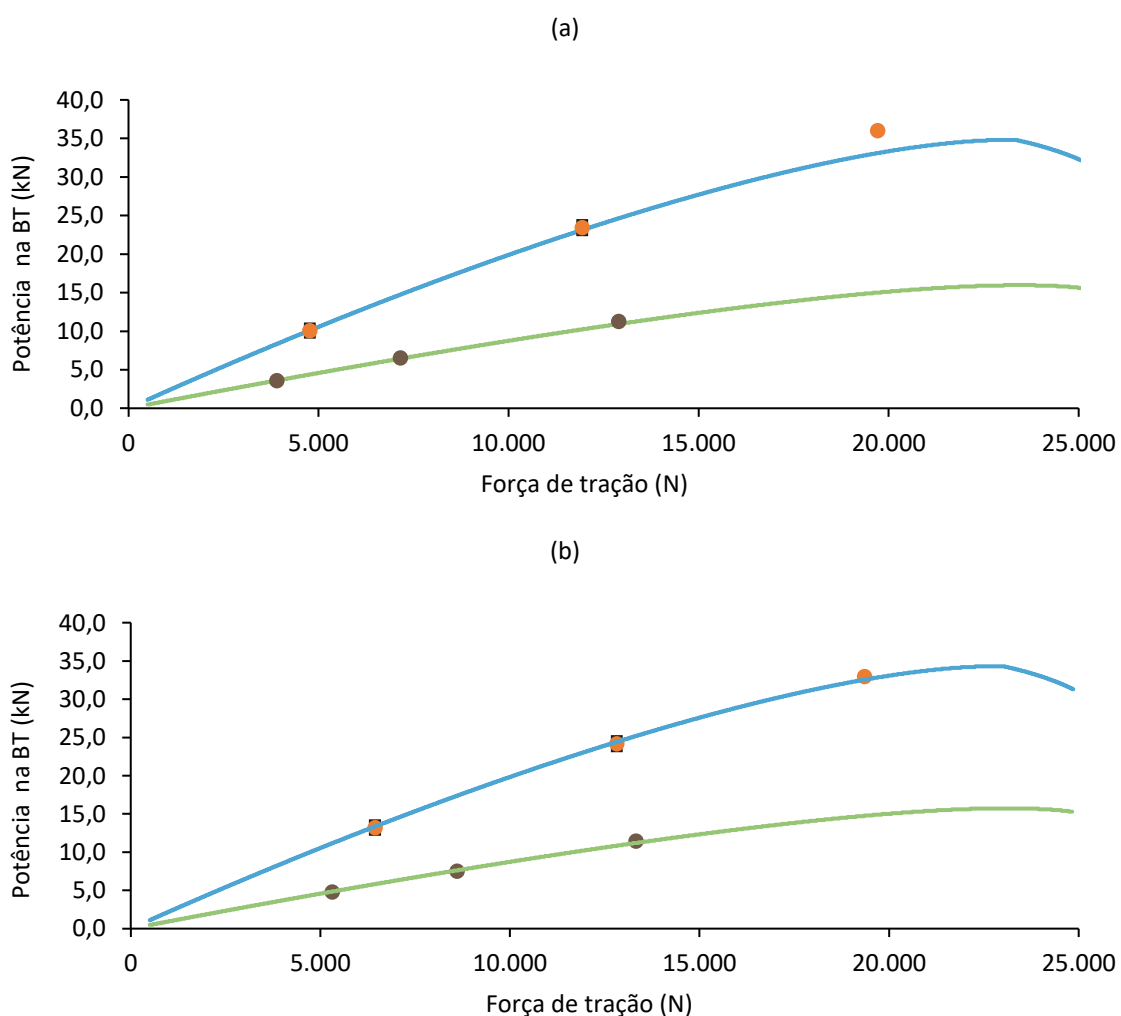


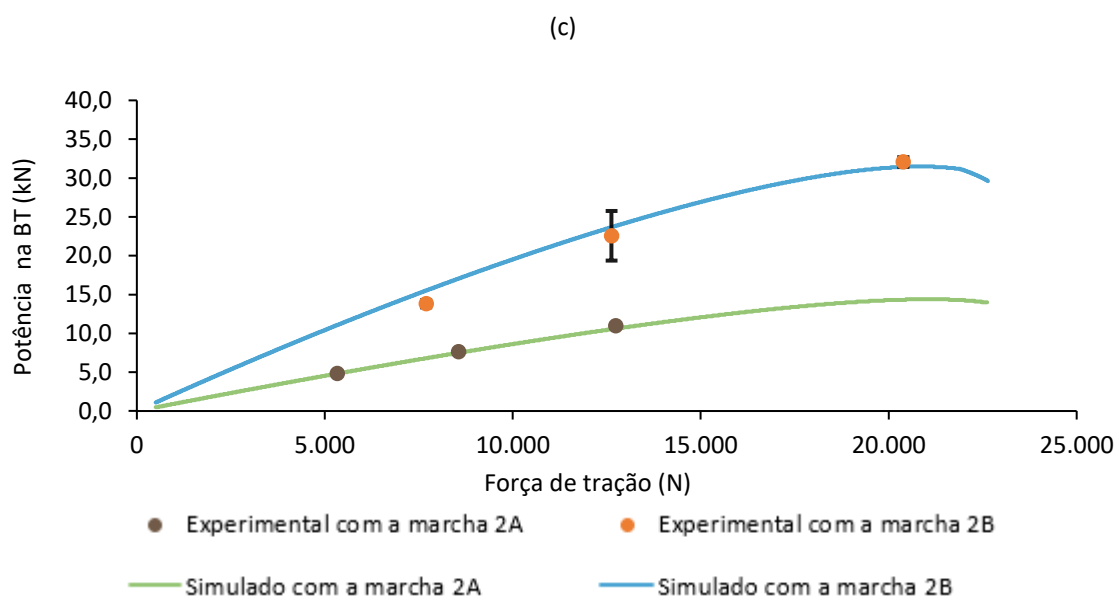
Fonte: O Autor.

A redução de velocidade de deslocamento foi evidenciada à medida que o índice de cone diminuiu, uma vez que alterações nas características do solo podem afetar a capacidade do trator de fornecer a potência necessária para que a operação possa ser realizada nas mesmas condições (SHAFAEI; LOGHAVI; KAMGAR, 2021). A queda de velocidade também foi evidenciada quando a relação de transmissão diminuiu. Considerando a marcha 2B, a velocidade na estrada de terra teve um decréscimo de 13,59% com um aumento de 313,41% da força de tração. Já em solo gradado, nas mesmas condições, a velocidade caiu 18,08% com um aumento de 165,00% da força de tração. Em vista disso é fundamental selecionar uma velocidade de deslocamento que seja compatível com o requisito de tração e as características do solo.

A variação da potência na barra de tração em função da força de tração é apresentada na Figura 2.18. A análise foi realizada para as três condições de solo e para as duas marchas, considerando as situações em que o trator estava com lastros e com a TDA acionada. Essa avaliação foi realizada por meio dos resultados simulados e experimentais. Os desvios dos dados experimentais dizem respeito ao erro padrão da média. Mesmo com a queda na velocidade observada com o aumento da força, a potência na barra de tração aumentou, uma vez que o aumento da força foi mais significativo do que a redução na velocidade. Entretanto, a partir de um determinado valor limite da força de tração a potência atingiu um valor máximo e começou a diminuir, à medida que a força continuava a aumentar.

Figura 18 – Variação da potência na barra de tração em função do aumento da força de tração nas marchas 2A e 2B para as condições de solo de (a) estrada de terra, (b) solo compactado, (c) solo gradado





Fonte: O Autor.

2.6. CONCLUSÃO

O programa de computador foi capaz de simular a capacidade tração de um trator de rodas, levando em conta as condições operacionais testadas. O sistema embarcado desenvolvido realizou com êxito a coleta de dados em ensaios de tração, simplificando e automatizando essa atividade. Os valores dos desvios e dos índices indicaram precisão e concordância entre os resultados simulados e dos ensaios. A análise estatística, conduzida por meio de teste de hipóteses, evidenciou a equivalência entre o que os resultados obtidos com o programa de computador e os resultados obtidos experimentalmente. Houve proximidade entre os dados coletados nos ensaios de tração e as curvas obtidas pelas simulações, conforme a força aplicada na barra de tração era incrementada.

Constatou-se que a patinagem aumentou de forma não linear com o incremento da força de tração até atingir um patamar. A partir disso, mesmo diante de uma baixa variação na força de tração, a patinagem continuou a aumentar. Foi verificado também que a patinagem das rodas motrizes aumentou conforme o índice de cone do solo diminuiu, mesmo que as cargas tivessem valores próximos. O acionamento da TDA permitiu ao trator realizar maiores forças na barra de tração. O aumento da força de tração ocasionou em uma redução da rotação do motor. No entanto, o modelo de simulação superestimou essa redução com relação aos resultados experimentais.

A potência na barra de tração aumentou até um valor limite com o incremento da força de tração, depois disso o valor da potência começou a cair. Observou-se também que, conforme a força de tração aumentou, a velocidade do trator sofreu um decréscimo. Essa redução na velocidade foi mais pronunciada conforme o índice de cone diminuiu. Para a marcha 2B, a velocidade na estrada de terra teve um decréscimo de 13,59% para um aumento de 313,41% da força de tração. Sob as mesmas condições, em solo gradado, a velocidade diminuiu 18,08% com um aumento de 165,00% na força de tração.

O programa de computador para previsão da capacidade de tração de tratores agrícolas de rodas tem potencial para ser usado por projetistas de novas máquinas, bem como para fins de pesquisa acerca do desempenho desses tratores. Além disso, o programa de computador pode oferecer valiosas contribuições para a operação de

tratores em trabalhos de campo. Isso pode ser alcançado por meio da orientação sobre como ajustar as variáveis envolvidas no processo de tração para serem compatíveis com as condições de solo que serão trabalhadas, assim como com os requisitos de força de tração necessários para realizar o trabalho.

2.7. REFERÊNCIAS

AL-HAMED, S. A.; AL-JANOBI, A. A. A program for predicting tractor performance in Visual C++. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 31, n. 2, p. 137–149, abr. 2001.

ASAE. Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer. **Test**, v. 1999, p. 4, 2009.

ASAE STANDARDS. Soil cone penetrometer S 313.3. **American Society of Agricultural Engineering**, p. 3–5, 1999.

ASHOK KUMAR, A. et al. A device to measure wheel slip to improve the fuel efficiency of off road vehicles. **Journal of Terramechanics**, v. 70, p. 1–11, abr. 2017.

BATTIATO, A.; DISERENS, E. Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: A basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 18–32, mar. 2017.

BULGAKOV, V. et al. Maximum admissible slip of tractor wheels without disturbing the soil structure. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 15, 2021.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

GOERING et al. **Off-Road Vehicle Engineering Principles**. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2003.

GUPTA, C. et al. Automatic tractor slip-draft embedded control system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 165, p. 104947, 1 out. 2019.

HAN, J.; YAN, X.; TANG, H. Method of controlling tillage depth for agricultural tractors considering engine load characteristics. **Biosystems Engineering**, v. 227, n. 1961, p. 95–106, 2023.

JANULEVIČIUS, A.; DAMANAUSKAS, V. Prediction of tractor drive tire slippage under different inflation pressures. **Journal of Terramechanics**, v. 101, p. 23–31, 2022.

KIM, W.-S. et al. Influence of soil moisture content on the traction performance of a 78-kW agricultural tractor during plow tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 207, n. July 2020, p. 104851, mar. 2021.

KOLATOR, B.; BIAŁOBRZEWSKI, I. A simulation model of 2WD tractor performance. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 76, n. 2, p. 231–239, maio 2011.

KUMAR, A. A.; TEWARI, V. K.; NARE, B. Embedded digital draft force and wheel slip indicator for tillage research. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, p. 38–49, set. 2016.

KUMAR, S. et al. Effect of ballasting on performance characteristics of bias and radial ply tyres with zero sinkage. **Measurement**, v. 121, p. 218–224, jun. 2018.

KUMAR, S.; NOORI, M. T.; PANDEY, K. P. Performance characteristics of mode of ballast on energy efficiency indices of agricultural tyre in different terrain condition in controlled soil bin environment. **Energy**, v. 182, p. 48–56, set. 2019.

MASON, G. L. et al. A unified equation for predicting gross traction for wheels on clay over a range of braked, towed, and powered operations. **Journal of Terramechanics**, v. 104, p. 1–13, 2022.

MD-TAHIR, H. et al. Experimental investigation of traction power transfer indices of farm-tractors for efficient energy utilization in soil tillage and cultivation operations. **Agronomy**, v. 11, n. 1, 2021.

MILLS, S. D. et al. Soil properties limiting vegetation establishment along roadsides. **Journal of Environmental Quality**, v. 50, n. 1, p. 110–121, 25 jan. 2021.

MOINFAR, A. et al. The effect of the tractor driving system on its performance and fuel consumption. **Energy**, v. 202, p. 117803, jul. 2020.

NATARAJ, E. et al. Embedded digital display and warning system of velocity ratio and wheel slip for tractor operated active tillage implements. **Journal of Terramechanics**, v. 97, p. 35–43, 2021.

OLIVEIRA, R. A. et al. Desempenho do irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e**

Ambiental, v. 12, n. 2, p. 166–173, 2008.

REGAZZI, N.; MARALDI, M.; MOLARI, G. A theoretical study of the parameters affecting the power delivery efficiency of an agricultural tractor. **Biosystems Engineering**, v. 186, p. 214–227, out. 2019.

SAHAY, C. S.; TEWARI, V. K. Computer simulation of tractor single-point drawbar performance. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 4, p. 419–428, 2004.

SERRANO, J. M. et al. The effect of liquid ballast and tyre inflation pressure on tractor performance. **Biosystems Engineering**, v. 102, n. 1, p. 51–62, jan. 2009.

SHAFAEI, S. M.; LOGHAVI, M.; KAMGAR, S. An extensive validation of computer simulation frameworks for neural prognostication of tractor tractive efficiency. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, n. August, p. 283–297, dez. 2018.

SHAFAEI, S. M.; LOGHAVI, M.; KAMGAR, S. Fundamental realization of longitudinal slip efficiency of tractor wheels in a tillage practice. **Soil and Tillage Research**, v. 205, n. July 2020, p. 104765, jan. 2021.

SHRIVASTAVA, P. et al. HMI-assisted visual interface-cum-embedded system for measurement of tractor–implement performance parameters. **Journal of Field Robotics**, June, p. 0–22, 2023.

TIWARI, V. K.; PANDEY, K. P.; PRANAV, P. K. A review on traction prediction equations. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 3, p. 191–199, jun. 2010.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.

ZHANG, S. et al. Intelligent ballast control system with active load-transfer for electric tractors. **Biosystems Engineering**, v. 215, p. 143–155, mar. 2022.

ZHANG, S. 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, PD, p. 126008, 2023.

ZOZ, F. M.; GRISSE, R. **Traction and Tractor Performance**. Agricultural Equipment Technology Conference. **Anais...ASAE**, 2003

CAPÍTULO III – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DE TRATORES DE RODA

3.1. RESUMO

A eficiência energética é um fator crucial na operação dos tratores agrícolas. Parte dos motores de combustão interna é alimentada por combustíveis fósseis, sendo que a queima desses combustíveis contribui significativamente para a emissão de poluentes para a atmosfera. Nesse contexto, a simulação computacional é uma ferramenta que oferece suporte para encontrar soluções que otimizem o desempenho dos tratores e melhorem sua eficiência. O processo de simulação pode ser conduzido de forma a minimizar tempo e custos. Em vista disso, o presente trabalho teve o objetivo de desenvolver um programa de computador para estimar o consumo de combustível de tratores agrícolas de rodas, bem como validar o programa por meio de um sistema embarcado. O programa foi desenvolvido em linguagem Python versão 3.9., utilizando equações da norma ASAE D497.7. Essa norma estabeleceu equações para calcular o consumo de combustível para motores com ignição por compressão, alimentados por diesel. Os cálculos foram realizados em regime de aceleração máxima do motor, assim como em regime de acelerações parciais. Para validação do programa, foram realizados ensaios de tração em conformidade com simulações computacionais. Um sistema embarcado foi desenvolvido para coleta de dados nos ensaios. Adicionalmente, foi desenvolvido um aplicativo móvel para realizar o armazenamento dos dados coletados, estabelecendo uma conexão com o sistema embarcado. O processo de validação foi conduzido por meio da comparação entre os resultados simulados e experimentais, aplicando testes estatísticos. A análise foi realizada considerando níveis mínimo, médio e máximo de aceleração do motor. A igualdade entre os dados obtidos por meio do programa e os resultados experimentais foi comprovada quando o motor estava totalmente acelerado. Observou-se o comportamento de superestimação do consumo horário de combustível pelo programa de computador, com desvio relativo 14,68%; 9,21% e 5,56% para os níveis de mínimo, médio e máximo de aceleração do motor, respectivamente.

Palavras-chave: Sistema embarcado; Eficiência energética; Força de tração; Desempenho do motor.

3.2. ABSTRACT

Energy efficiency is a crucial factor in the operation of agricultural tractors. Part of internal combustion engines is fueled by fossil fuels, and the combustion of these fuels significantly contributes to the emission of pollutants into the atmosphere. In this context, computer simulation is a tool that provides support to find solutions that optimize the performance of tractors and enhance their efficiency. The simulation process can be conducted in a way to minimize time and costs. In light of this, the present work aimed to develop and validate a computer program to estimate the fuel consumption of wheeled agricultural tractors. The program was developed in Python version 3.9, using equations from the ASAE D497.7 standard. These standard established equations to calculate fuel consumption for compression-ignition engines powered by diesel. The calculations were performed at maximum engine acceleration as well as at partial acceleration regimes. To validate the program, traction tests were conducted in accordance with computer simulations. An embedded system was developed for data collection during the tests. Additionally, a mobile application was developed to store the collected data, establishing a connection with the embedded system. The validation process was conducted through the comparison between simulated and experimental results, applying statistical tests. The analysis was conducted considering minimum, medium, and maximum levels of engine acceleration. Equality between the data obtained through the program and the experimental results was proven when the engine was fully accelerated. The behavior of overestimating hourly fuel consumption by the computer program was observed, with a relative deviation of 14.68%; 9.21% and 5.56% for minimum, medium and levels of engine acceleration, respectively.

Keywords: Embedded system. Energy efficiency. Traction force. Engine performance.

3.3. INTRODUÇÃO

Com a população mundial em rápido crescimento e uma baixa disponibilidade de mão de obra no meio rural, está sendo necessário aprimorar cada vez mais os sistemas de cultivo. Dentre esses avanços tem-se a mecanização agrícola das diversas operações, viabilizada a partir do uso dos tratores. O trator agrícola de rodas desempenha um papel fundamental no setor agrícola, impulsionando os avanços produtivos. O funcionamento dessa máquina ocorre por meio da conversão da energia química do combustível em energia mecânica, realizada no motor de combustão interna (MD-TAHIR et al., 2021).

A análise da eficiência energética é um fator crítico nas operações que envolvem o trator. Além de estarem presentes em maior quantidade nas propriedades, as novas máquinas tendem a gerar uma maior potência mecânica e devem atender os requisitos de legislação com relação a emissão de poluentes (LEE; KIM; KIM, 2016). Os motores de combustão interna são alimentados em grande parte por combustíveis fósseis, sendo responsáveis pelo aumento da emissão de gases poluentes, devido à sua ampla aplicação no setor agrícola (MANSIR et al., 2024). Nesse cenário, é fundamental que haja esforços no sentido de melhorar a eficiência energética do trator agrícola.

Para melhorar o desempenho do trator com relação ao consumo de combustível é imprescindível conhecer a influência das variáveis envolvidas no processo. Nesse contexto, pesquisadores desenvolveram modelos para estudar essa temática. Kolator (2021) desenvolveu um modelo para simular o consumo de combustível de tratores, considerando a área trabalhada em uma determinada operação agrícola. Siddique et al. (2021) utilizaram um conjunto de equações para elaborar um programa de computador com o propósito de simular o consumo de combustível de um trator com transmissão *Power-shift*, considerando vários níveis de carga do motor. Lee et al. (2016) usaram um modelo matemático para avaliar a eficiência energética de tratores. A razão de redução de percurso, comumente denominada de patinagem, é uma variável que afeta significativamente o consumo de combustível dos tratores agrícolas. Pranav et al.(2012) avaliaram que limitar a patinagem das rodas motrizes em uma faixa específica possibilitou uma economia de combustível de até 33% durante operações de campo, em comparação com a situação que a patinagem não foi controlada. Adicionalmente, Kim et al. (2023)

identificaram uma tendência de maior eficiência de uso do combustível enquanto o motor estava operando em regime próximo ao seu torque máximo .

O estudo das variáveis que governam o desempenho do trator agrícola com relação ao consumo de combustível pode ser realizado com a aplicação de modelos matemáticos. Essa abordagem pode ser facilitada com a implementação desses modelos em programas de computador, desenvolvendo os simuladores computacionais. Essa ferramenta oferece suporte a fabricantes e pesquisadores para estudar o impacto de diversos fatores na operação do trator, bem como na busca por soluções para melhorar o desempenho dessa máquina, tudo isso poupando tempo e custos (KUMAR; PANDEY, 2009). No entanto, ocorre que, normalmente, os modelos matemáticos apresentam simplificações em relação ao processo real. Essa simplificação pode ser necessária para tornar a modelagem viável. Por isso, é fundamental que a ferramenta de simulação computacional que utilizam modelos matemáticos seja validada, verificando sua precisão mesmo com as simplificações realizadas. O processo de validação envolve a comparação dos resultados simulados com os resultados obtidos por meio de testes experimentais.

Fatores como o custo dos combustíveis fósseis e a poluição induzem o uso do trator de modo a priorizar a eficiência energética no uso do combustível. Nesse contexto, é imprescindível que sejam desenvolvidos trabalhos com a finalidade de encontrar soluções que melhorem a eficiência na operação dos tratores. Nesse trabalho, objetivou-se desenvolver um programa de computador para estimar o consumo de combustível de tratores agrícolas de rodas em função das suas condições de operação, além de validar o programa por meio de um sistema embarcado.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho desenvolvido no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizado em Viçosa/MG, foi executado em quatro etapas. A primeira consistiu no desenvolvimento do programa de computador para estimar o consumo de combustível de um trator agrícola com rodas. Já na segunda foi desenvolvido um sistema embarcado de baixo custo, com projeto e código aberto, para obter variáveis do funcionamento de um trator agrícola durante ensaio de tração. Na terceira foram realizados ensaios de tração em diferentes condições de solo e aceleração utilizando um trator agrícola de rodas, bem como simulações computacionais em conformidade com as condições ensaiadas. Na quarta etapa foi utilizado teste estatístico para validar o programa de computador desenvolvido utilizando os dados experimentais obtidos nos ensaios de tração.

3.4.1. Simulação para predição do consumo de combustível e o desenvolvimento de programa de computador para estimativa do consumo de combustível de tratores

O programa de computador para simulação do consumo de combustível em tratores agrícolas contendo motor com ignição por compressão foi desenvolvido com base na norma ASAE D497.7 (ASAE, 2011). As equações empregadas nessa norma utilizaram os resultados do Laboratório de Testes de Trator da Universidade de Nebraska, realizado entre os anos de 1980 e 2005. Com esse modelo foi possível determinar o consumo de combustível em aceleração plena, bem como o consumo quando o motor estava parcialmente acelerado. A norma apresentou o cálculo do consumo específico volumétrico de combustível nos motores alimentados por diesel. Esse cálculo considerou a razão entre a potência equivalente na TDP (tomada de potência) e a potência nominal na TDP, assim como a posição da alavanca do acelerador, conforme especificado na Equação (3.1).

$$SFC_v = \left(0,22 + \frac{0,096}{X} \right) PTM \quad (3.1)$$

em que:

- SFC_v - consumo específico volumétrico de combustível, L/(kW·h);
- X - razão entre a potência equivalente na TDP e a potência nominal na TDP, adimensional;
- PTM - multiplicador associado à posição da alavanca do acelerador, adimensional.

O parâmetro associado à razão entre a potência equivalente na TDP e a potência nominal na TDP foi calculado com o auxílio da Equação (3.2). A potência equivalente na TDP representa a potência disponível em uma determinada condição de operação. O fator multiplicador referente à posição da alavanca do acelerador do motor foi obtido com base na Equação (3.3), sendo essa variável a responsável por determinar o consumo de combustível de acordo com a velocidade angular de trabalho (rotação) do motor.

$$X = \frac{P_{eTDP}}{P_{NTDP}} \quad (3.2)$$

em que:

- P_{eTDP} - potência equivalente na TDP, kW;
- P_{NTDP} - potência nominal na TDP, kW.

$$PTM = 1 - (N - 1)(0,45 X - 0,877) \quad (3.3)$$

em que:

- N - relação entre a rotação do motor em aceleração parcial e a rotação obtida em aceleração máxima para a mesma carga, adimensional.

O consumo volumétrico de combustível foi então calculado por meio da Equação (3.4).

$$c_c = SFC_v \cdot P_{eTDP} \quad (3.4)$$

em que:

- c_c - consumo volumétrico de combustível, L/h.

As equações descritas foram implementadas em um programa de computador desenvolvido em linguagem Python versão 3.9. Para facilitar a entrada dos dados, foi desenvolvida uma interface gráfica do usuário, utilizando a biblioteca *PyQt5*. Esse programa de computador foi desenvolvido para calcular o consumo de combustível em função do valor da força aplicada na barra de tração. Antes de iniciar uma simulação, o usuário informou o valor de incremento dessa força. Adicionalmente, precisou-se informar a curva de torque e a respectiva rotação produzidos no motor, com base em pontos de operação do motor. Esses pontos são referentes às condições de rotação máxima, rotação nominal, potência máxima e torque máximo, referentes à potência líquida do trator.

3.4.2. Desenvolvimento do sistema embarcado para a realização de testes experimentais utilizados para validar o programa de computador

Para a aquisição de dados nos testes experimentais foi desenvolvido um sistema embarcado. A confecção desse sistema não apenas reduziu custos associados à realização dos ensaios de consumo de combustível, mas também desempenhou com êxito a função de coletar o processar os dados, conforme evidenciado também em trabalhos anteriores que utilizaram esse tipo de sistema para a realização de ensaios com tratores agrícolas (ASHOK KUMAR et al., 2017; GUPTA et al., 2019; NATARAJ et al., 2021; SHRIVASTAVA et al., 2023).

Esse sistema embarcado foi constituído por sensores para medir a força aplicada na barra de tração, a velocidade de deslocamento do trator, a velocidade teórica das rodas motrizes, a velocidade angular da TDP e o fluxo de combustível. A Tabela 3.1 traz as especificações dos componentes do sistema embarcado, assim como suas respectivas finalidades.

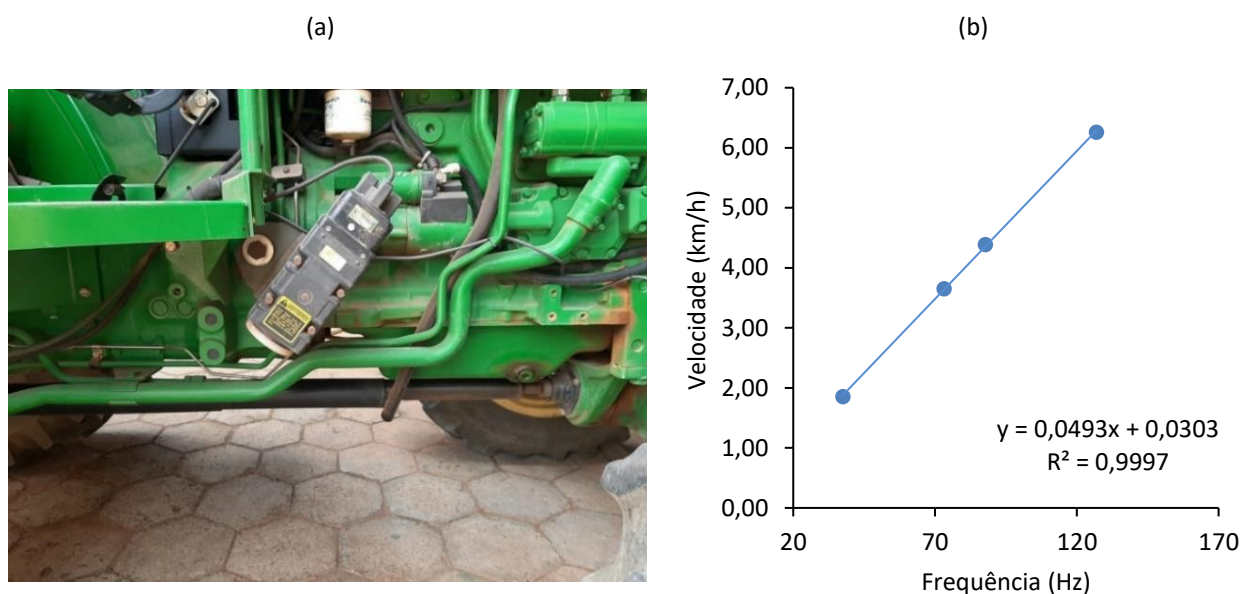
Tabela 3.1 – Especificações dos componentes do sistema embarcado

Sensor	Quantidade	Fabricante	Aplicação
Placa ESP32	1	Espressif Systems, Xangai, China	Placa de desenvolvimento microcontrolada
Conversor ADC ADS1015	1	Texas Instruments, Dallas, EUA	Conversor de sinal analógico em digital
Célula de carga	1	Alfa Instrumentos, São Paulo-SP, Brasil	Medir a força de tração
Sensor indutivo de proximidade	5	Sense, São Paulo-SP, Brasil	Medir a velocidade teórica das rodas motrizes e a velocidade angular da TDP
Radar	1	Dickey-John, Alburn-IL, EUA	Medir a velocidade do trator
Fluxômetro	2	FOLWMATE (OVAL M-III), Tóquio, Japão	Medir o consumo volumétrico de combustível

Foi empregado o radar da marca Dickey-John, modelo RVS II (Figura 3.1a) para medir a velocidade do trator. Este sensor foi calibrado por meio da relação entre

a frequência gerada pelo radar com a velocidade média desenvolvida pelo trator em um ensaio de calibração. O ensaio consistiu em fazer o trator percorrer uma distância de 28 metros. A velocidade média foi medida com base no tempo gasto no percurso, considerando três repetições. Esse processo foi repetido para quatro valores de velocidade (Figura 3.1b).

Figura 3.1 – Radar usado para medir a velocidade real do trator: (a) posição do radar no trator, (b) curva de calibração do radar



Fonte: O Autor.

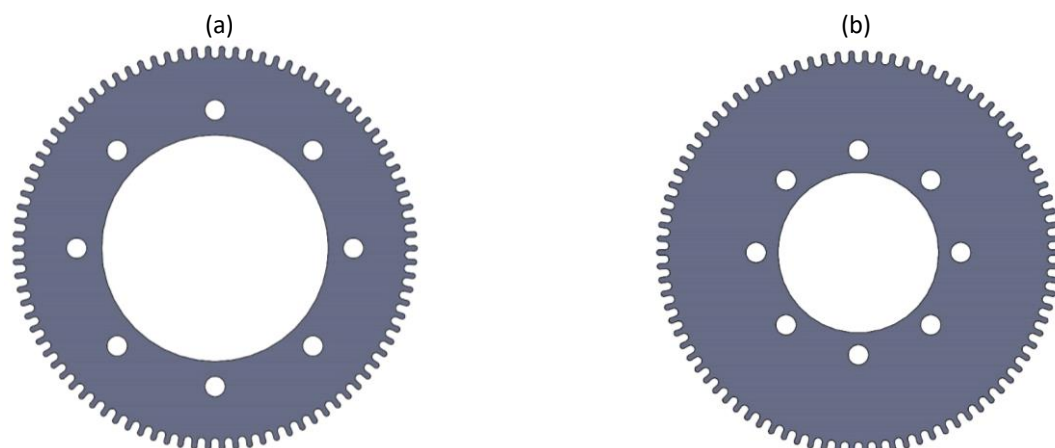
Com o intuito de verificar a relação do consumo de combustível com a patinagem das rodas motrizes, essa grandeza também foi mensurada. A patinagem foi calculada por meio da relação entre a velocidade real, ou seja, a velocidade deslocamento do trator, e a velocidade tangencial desenvolvida de acordo com o movimento angular das rodas motrizes, denominada velocidade teórica (Equação 3.5). A velocidade teórica foi calculada multiplicando a velocidade angular de cada roda pelo seu respectivo raio de rolamento. Quatro sensores indutivos de proximidade foram anexados ao sistema embarcado em conjunto com discos metálicos dentados (Figura 3.2) para medir a velocidade angular das rodas.

$$s = 1 - \frac{v_a}{v_t} \quad (3.5)$$

em que:

- s - Patinagem da roda, decimal;
- V_t - velocidade de deslocamento do trator, m/s.

Figura 3.2 – Discos metálicos dentados dos eixos (a) dianteiro, (b) traseiro



Fonte: O Autor.

Foram instalados, na parte interna de cada roda, os discos em conjunto com o sensor indutivo. Desse modo, à medida que o disco girava o sensor emitia pulsos elétricos quando detectava um dente metálico. A velocidade angular foi determinada então de acordo com o número de pulsos detectados em um intervalo de tempo de 3 segundos. (MOINFAR et al., 2020). Tanto o disco das rodas dianteiras como os discos das rodas traseiras foram projetados com 90 dentes.

O procedimento empregado para medir a velocidade angular da roda motriz também foi aplicado para medir a velocidade angular da do eixo da TDP. Neste caso, o sensor indutivo gerava pulsos à medida que detectava as estrias da TDP (Figura 2.4). Ademais, foi medida a relação de transmissão entre a TDP e o motor, possibilitando o cálculo da rotação do motor.

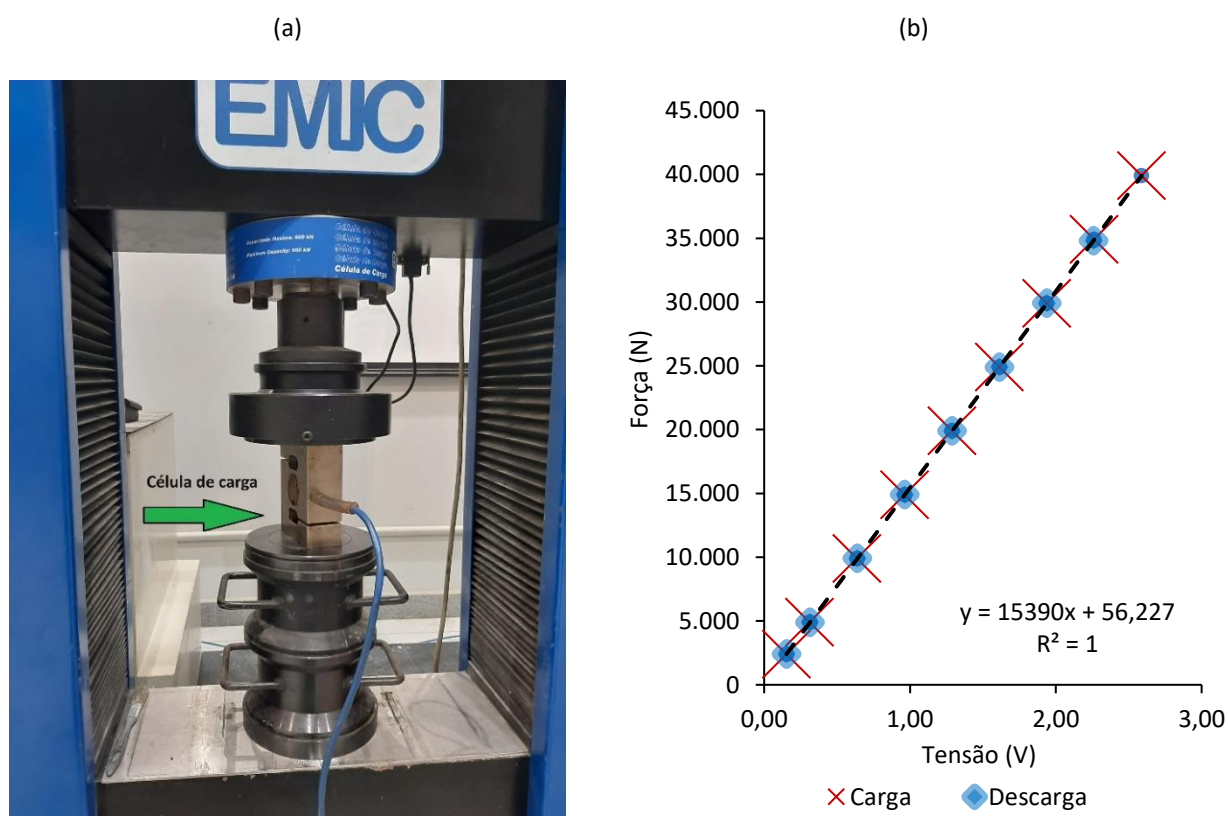
Figura 3.3 – Sensor de proximidade indutivo utilizado para medir a velocidade angular da TDP



Fonte: O Autor.

A força aplicada na barra de tração foi medida com o uso da célula de carga da fabricante Alfa Instrumentos. Este sensor, ao ser energizado, produziu um sinal de tensão de baixa amplitude na ordem de mV. O sinal elétrico foi amplificado com o uso do amplificador operacional INA 128, da fabricante Texas Instruments. O microcontrolador ESP32 realizou a leitura do sinal amplificado com o auxílio do conversor analógico-digital ADS 1115, também fabricado pela Texas Instruments e que oferece uma resolução de 16 *bits*. A célula de carga foi então calibrada usando uma máquina universal de ensaios (Emic, São José dos Pinhais, PR, Brasil), conforme a Figura 3.4a. O processo de calibração abrangeu ciclos de carga e descarga (KUMAR; TEWARI; NARE, 2016). A carga máxima aplicada na calibração foi de 40.000 N, conforme apresentado na Figura 3.4b.

Figura 3.4 – Célula de carga utilizada para medir a força na barra de tração: (a) ensaio de calibração, (b) curva de calibração

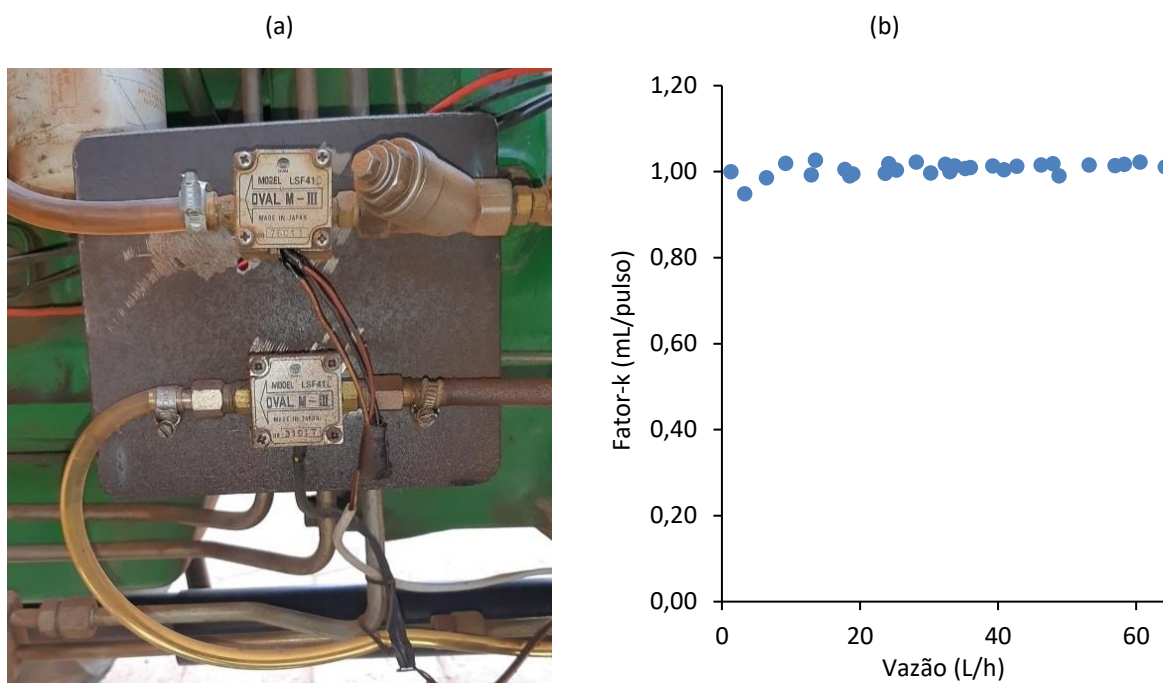


Fonte: O Autor.

O consumo de combustível do trator foi medido utilizando fluxômetros da fabricante Oval, modelo Flowmate LSF41C (Figura 3.5a). Foram utilizados dois sensores, sendo um instalado na linha de alimentação e o outro na linha de retorno,

para medir o fluxo de excesso que retornava para o tanque (SHRIVASTAVA et al., 2023). A calibração desse sensor foi realizada mediante o cálculo do fator k, conforme realizado por Lee et al. (2021). Esse parâmetro foi determinado de acordo com a razão entre o volume combustível e o número de pulsos elétricos gerados. O processo de calibração foi realizado para vazões volumétricas entre 1,35 L/h e 64,26 L/h. O sensor foi testado em valores de temperatura ambiente entre 17,2 °C e 38,3 °C. A vazão volumétrica e variações de temperatura a não afetaram a resposta do fluxômetro. O valor médio do fator k foi igual a 1,00 ml/pulso, conforme apresentando na Figura 3.5b.

Figura 3.5 – Determinação do consumo de combustível: (a) fluxômetros utilizados no sistema embarcado, (b) curva de calibração do fluxômetro



Fonte: O Autor.

Conhecendo-se o valor da potência disponível na barra de tração, foi possível estimar a potência do motor de acordo com a norma ASAE D497.7 (ASAE, 2011). O torque do motor foi calculado com base na Equação (3.6). Já o consumo específico de combustível foi calculado de acordo com Equação (3.7).

$$T_e = \frac{P_e \cdot 60000}{2 \cdot \pi \cdot N_e} \quad (3.6)$$

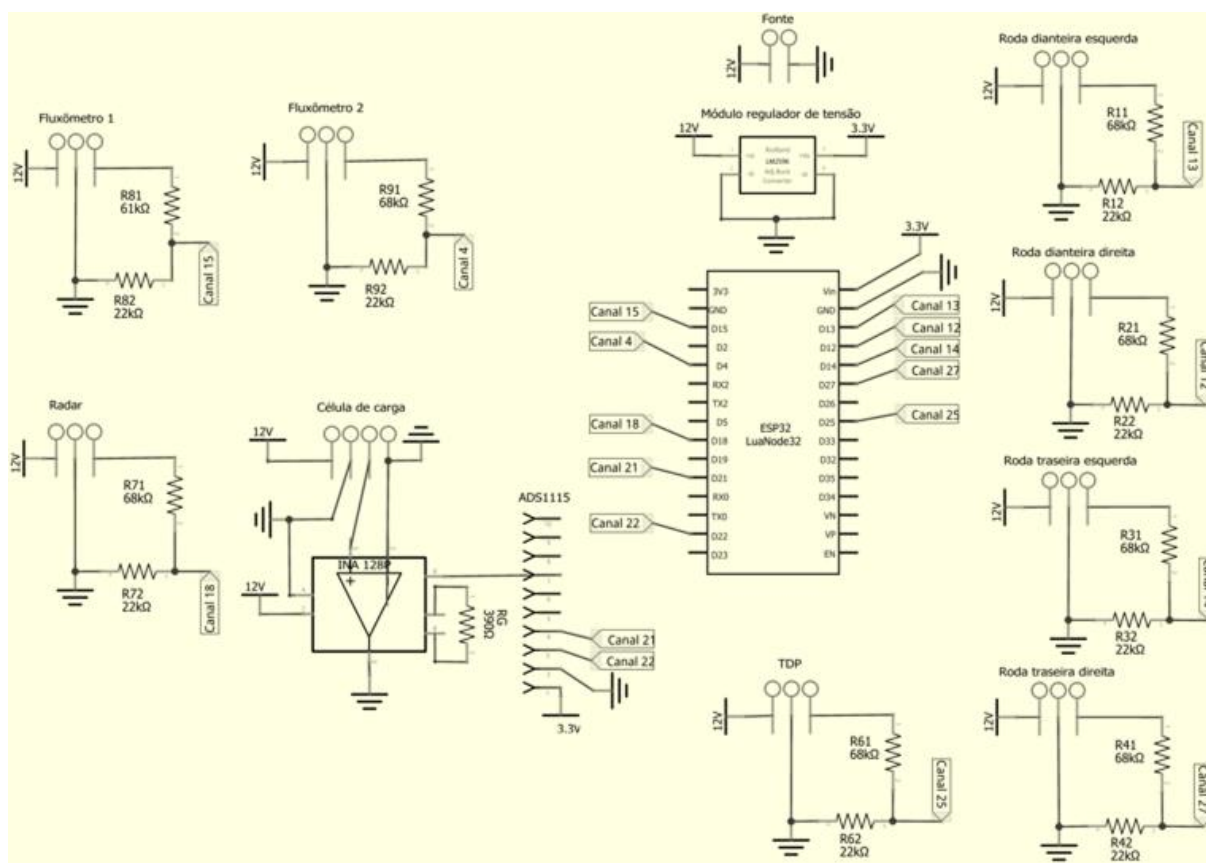
$$SFC_v = \frac{c_c}{P_e \cdot 0,9} \quad (3.7)$$

em que:

- T_e - torque do motor, Nm;
- N_e - rotação do motor, rpm;
- P_e - potência produzida pelo motor do trator, kW.

Todos os sensores do sistema embarcado foram conectados à placa de desenvolvimento ESP32-WROOM-32, responsável por executar um programa de computador. O circuito foi alimentado pela bateria do trator com o auxílio de um módulo regulador de tensão. Na Figura 3.6 é apresentado o diagrama do circuito elétrico do sistema embarcado.

Figura 3.6 – Diagrama do circuito elétrico do sistema embarcado

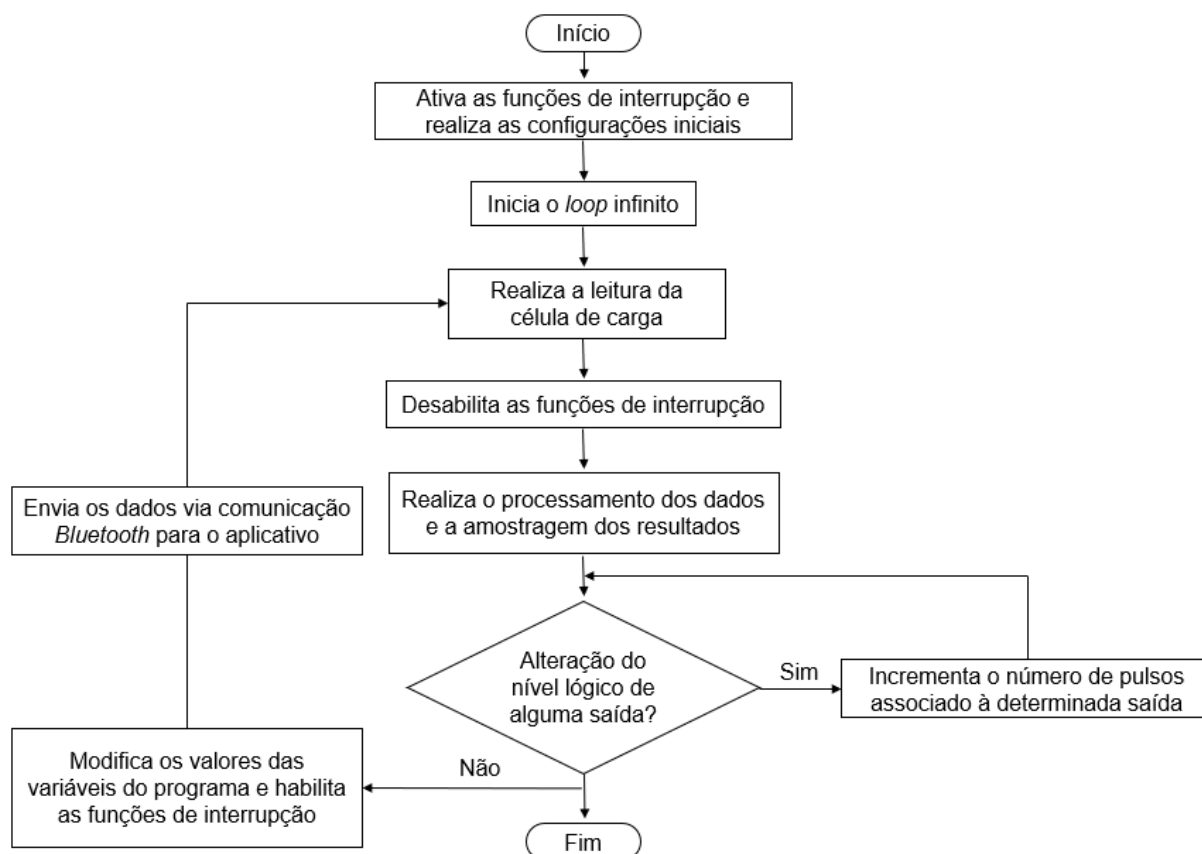


Fonte: O Autor.

O programa de computador do sistema embarcado foi desenvolvido em linguagem de programação C++, no Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE), da plataforma Arduino. O tempo de amostragem dos dados foi definido em 3 s. Os dados coletados nos ensaios foram compartilhados via comunicação *Bluetooth* para um aplicativo de celular, desenvolvido na plataforma MIT App Inventor. Com isso, as

informações foram armazenadas no dispositivo móvel. O fluxograma do programa de computador do sistema embarcado é apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Fluxograma de execução do programa de computador do sistema embarcado



Fonte: O Autor.

3.4.3. Ensaios para validação

Os ensaios de tração para determinar o consumo de combustível e validar o programa de computador foram realizados na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão em Produção de Grandes Culturas e Bioenergia da Universidade Federal de Viçosa. Foi utilizado o trator da marca John Deere, modelo 5705, equipado com pneus dianteiros e traseiros diagonais e que apresenta tração dianteira auxiliar. Esse trator possui motor turboalimentado com 4 cilindros, cilindrada total de 4.500 cm³, potência de 62 kW, a qual é constante na faixa de rotação compreendida entre 2.000 e 2.400 rpm. O torque máximo desse trator é 330 Nm na rotação de 1.600 rpm.

Os ensaios foram realizados em três condições de solo, compreendendo estrada de terra, solo compactado e solo gradado. Em todos os ensaios a TDA foi

acionada e o trator foi equipado com lastros sólidos, correspondendo a 70 kg em cada um dos eixos e 180 kg na parte frontal. A carga na barra de tração foi alterada com a utilização de um segundo trator como freio, sendo a magnitude dessa carga variada conforme a escolha da relação de transmissão desse segundo trator. Adicionalmente, foram considerados os níveis mínimo, médio e máximo de aceleração do motor, os quais correspondiam a valores de rotação do motor sem carga de aproximadamente 2.100 rpm, 2.400 rpm e 2.722 rpm, respectivamente. Foram consideradas ainda duas relações de transmissão (duas marchas), denominadas 2A e 2B. As combinações das condições de solo, aceleração do motor e relação de transmissão resultaram em um total de 18 condições experimentais, em que cada delas considerou três cargas de tração, totalizando assim 54 ensaios para determinação do consumo de combustível. Cada ensaio foi executado em pista plana de 100 m de comprimento.

3.4.4. Análise dos resultados

As simulações, utilizando o programa de computador desenvolvido, foram executadas em conformidade com os testes experimentais. Foi realizada uma análise comparativa que confrontou os resultados da simulação com os dados obtidos nos testes experimentais. Adicionalmente, uma avaliação acerca do consumo de combustível do trator foi realizada, considerando os resultados dos ensaios experimentais.

3.4.4.1. Análise estatística e validação do programa de computador

Para a validação estatística do programa de computador, foi realizada a comparação entre os resultados obtidos por meio das simulações e dos testes experimentais. Essa análise foi dividida para os níveis de rotação do motor mínimo, médio e máximo. A metodologia de validação do modelo foi pautada na verificação da concordância, da igualdade e nos desvios entre os resultados do modelo desenvolvido e os respectivos resultados experimentais.

Os desvios entre valores obtidos nos testes experimentais e nas simulações foram avaliados com base no erro quadrático médio e do desvio relativo. O erro quadrático médio foi calculado para avaliar a dispersão dos pontos em torno da reta de regressão linear ajustada entre os resultados do modelo e os resultados dos testes experimentais, conforme a Equação (3.8). O desvio relativo foi calculado para avaliar

a magnitude da diferença entre os valores obtidos nos testes experimentais e nas simulações, conforme indicado na Equação (3.9).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (3.8)$$

$$DR (\%) = \left| \frac{X_i - Y_i}{Y_i} \right| \times 100 \quad (3.9)$$

em que:

- RMSE - erro quadrático médio;
- Y_i - valor da variável considerada de acordo com o teste experimental;
- X_i - valor da variável considerada de acordo com o modelo;
- n - número de observações;
- DR - desvio relativo.

A avaliação da concordância foi conduzida por meio do cálculo do índice de concordância de Willmott (WILLMOTT et al., 1985), conforme a Equação (3.10). Esse índice apresenta valores que variam de 0, situação na qual não há concordância, até 1, caso em que a concordância é perfeita (OLIVEIRA et al., 2008). Além disso, foi calculado também o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, 1997). Esse parâmetro, que também avalia a concordância, leva em consideração o coeficiente de correlação de Pearson e o índice de concordância de Willmott, seu cálculo é efetuado com base na Equação (3.11). A classificação desse índice com relação ao desempenho do modelo é descrita na Tabela 3.2.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|M_i - E_{med}|) + (|E_i - E_{med}|)]^2} \quad (3.10)$$

$$c = r \cdot d \quad (3.11)$$

em que:

- d - índice de concordância de Willmott;
- M_i - resultado da variável considerada pelo modelo;
- E_i - resultado da variável considerada pelo teste experimental;
- E_{med} - média dos resultados da variável considerada pelo teste experimental;
- n - número de observações;
- c - índice de desempenho de Camargo e Sentelhas;
- r - coeficiente de correlação de Pearson.

Tabela 3.2 – Classificação do índice de desempenho de Camargo e Sentelhas

Valor do índice	Desempenho
$c > 0,85$	Ótimo
$0,75 < c \leq 0,85$	Muito bom
$0,65 < c \leq 0,75$	Bom
$0,60 < c \leq 0,65$	Mediano
$0,50 < c \leq 0,60$	Sufrível
$0,40 < c \leq 0,50$	Mau
$c \leq 0,40$	Péssimo

Fonte: Camargo, A., P.; Sentelhas, 1997

A igualdade entre o modelo matemático e os resultados obtidos nos ensaios de consumo de combustível foi verificada por meio da aplicação da ANOVA (Análise de Variância). Com esse propósito, um modelo de regressão linear simples com intercepto nulo foi desenvolvido, conforme a Equação (3.12). Nessa metodologia, a reta de regressão deve passar obrigatoriamente pela origem, com o intuito de analisar a igualdade entre as variáveis de ambos os eixos. A avaliação consistiu em verificar se o coeficiente angular da reta era equivalente a 1. Para tanto, o teste t de Student foi aplicado, considerando um nível de significância de 5%. A hipótese nula estabeleceu que o coeficiente angular seria igual a 1, enquanto a hipótese alternativa considerava esse parâmetro diferente de 1. Foi desenvolvido um programa de computador em linguagem Python versão 3.9 para efetuar os cálculos do teste de hipótese.

$$Y_i = \beta_1 \cdot X_i + e_i \quad (3.12)$$

em que:

- Y_i - valor da variável considerada de acordo com o teste experimental;
- X_i - valor da variável considerada de acordo com o modelo;
- β_1 - Coeficiente angular da reta;
- e_i - erro experimental.

3.4.4.2. Análise do desempenho do trator com relação ao consumo de combustível

Os resultados obtidos dos testes experimentais e das simulações computacionais foram confrontados, permitindo uma comparação de ambos os conjuntos de dados. Além disso, foi realizada uma análise acerca do desempenho do trator com base no consumo de combustível, considerando os resultados obtidos nos testes experimentais.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

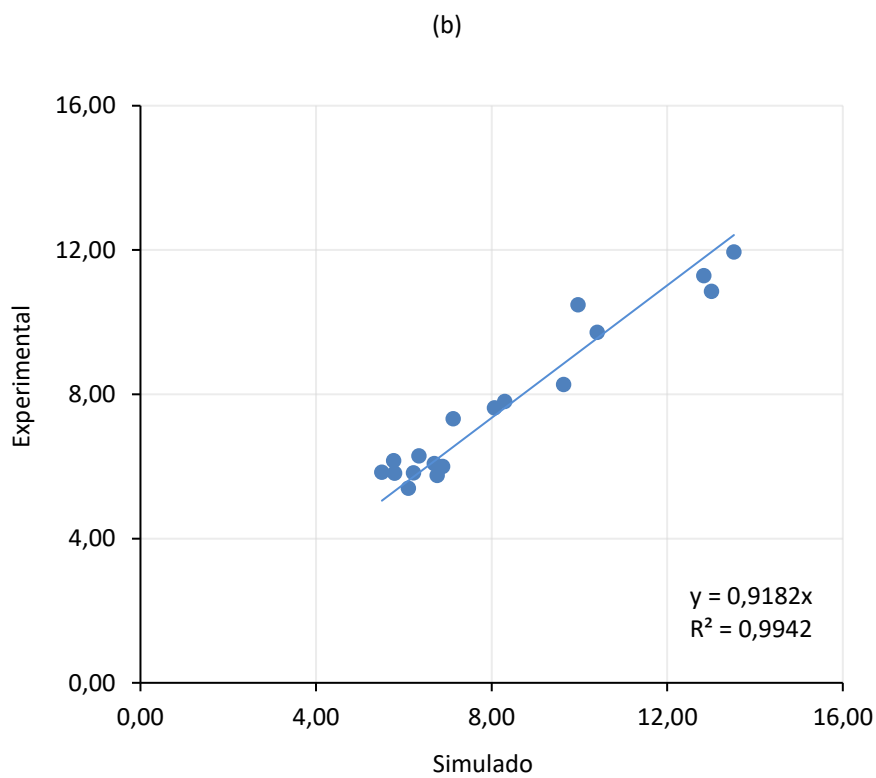
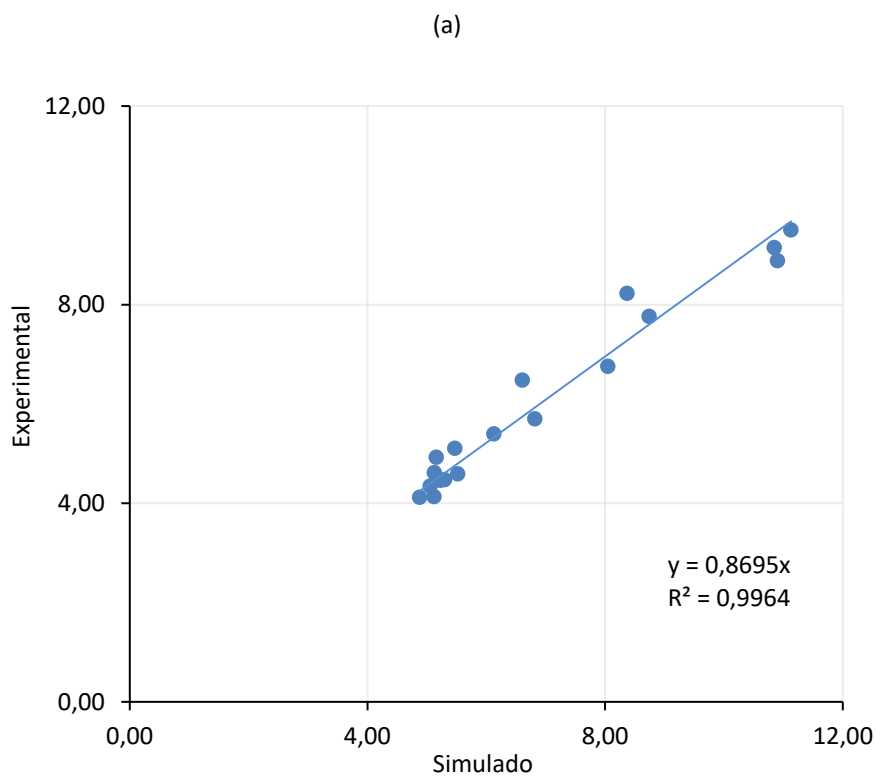
O programa de computador para estimar o consumo de combustível, o programa utilizado no sistema embarcado e o aplicativo para dispositivos móveis foram nomeados “Traction”, “Ensaio de Tratores Agrícolas - Sistema Embarcado”, “Ensaio de Tratores Agrícolas – Aplicativo” e registrados junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob os números BR512023002647-6, BR512023002646-8 e BR512023002644-1, respectivamente. A interface gráfica do usuário do programa de computador para estimar o consumo de combustível é apresentada no Apêndice A. No Apêndice B, é exibida uma tela do aplicativo para dispositivos móveis, cuja finalidade é fornecer os dados coletados do sistema embarcado e armazenar os resultados do ensaio de tração.

Em todos os testes experimentais realizados, o consumo de combustível apresentou uma variação entre 4,0 L/h a 14,5 L/h, enquanto a variação do consumo específico de combustível foi de 0,24 L/kWh a 1,48 L/kWh. A força de tração variou na faixa de 3.800 N a 20.600 N, enquanto a potência do motor variou entre 4,0 kW a 53,0 kW, atingindo, aproximadamente, 85% da potência disponível do motor. O deslocamento ocorreu com velocidades que variaram de 2,61 km/h a 3,30 km/h, na marcha 2A. Na marcha 2B, o trator se deslocou com velocidades que variaram entre 4,95 km/h a 7,52 km/h.

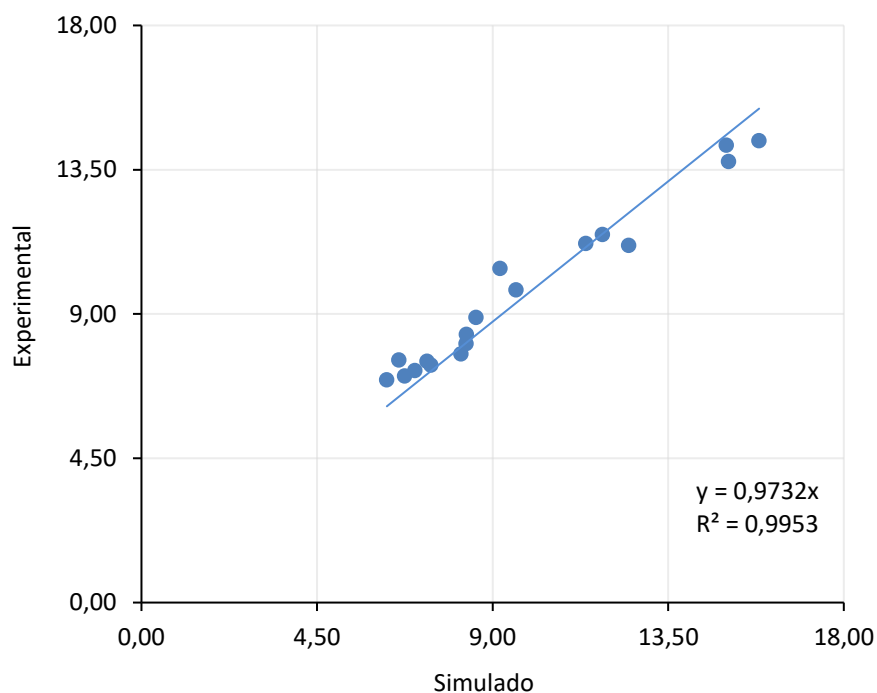
3.5.1. Validação do programa de computador

Na Figura 3.8 são apresentados gráficos de dispersão que relacionam os resultados provenientes das simulações com os dados dos testes experimentais, para o consumo horário de combustível. A partir dos pontos nos gráficos foi ajustado um modelo de regressão linear simples com intercepto nulo. Notou-se uma dispersão limitada dos dados junto à reta de regressão, destacando-se uma maior similaridade entre o modelo e os testes experimentais na situação em que a aceleração era máxima. Para as acelerações mínima e média foi observada uma tendência de crescimento dos desvios conforme o consumo de combustível se elevava.

Figura 3.8 – Gráficos de dispersão entre os resultados simulados e experimentais do consumo horário de combustível, considerando as acelerações do motor: (a) mínima, (b) média, (c) máxima



(c)



Fonte: O Autor.

Os valores calculados para os índices de concordância são apresentados na Tabela 3.3. O índice de concordância de Willmott aumentou conforme o aumento do nível de aceleração do motor. Esse mesmo comportamento foi observado para o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas, ainda assim a classificação de acordo com esse índice foi “Ótimo” para todos os casos. Esses resultados indicaram uma tendência de aumento na concordância entre o modelo matemático e os resultados experimentais à medida que o nível de aceleração do motor aumentou.

Tabela 3.3 – Resultados dos índices de concordância entre os resultados experimentais e simulados

Parâmetro	Aceleração mínima	Aceleração média	Aceleração máxima
d	0,9372	0,9611	0,9823
r	0,9794	0,9701	0,9845
c	0,9179	0,9324	0,9670
Classe	Ótimo	Ótimo	Ótimo

d: Índice de concordância de Willmott; r: Coeficiente de correlação de Pearson; c: Índice de desempenho de Camargo e Sentelhas.

Os resultados do teste t de Student e das métricas dos desvios são apresentados na Tabela 3.4. Ao considerar a aplicação da ANOVA e um modelo de regressão linear com intercepto nulo, os valores obtidos do teste de hipóteses para o p-valor evidenciaram que a hipótese nula não foi rejeitada apenas para o caso em que o motor foi operado em aceleração máxima. Desse modo, constatou-se que, para essa condição específica, o coeficiente angular da reta era estatisticamente igual a 1, prevalecendo a igualdade estatística entre o modelo e a situação experimental. Por outro lado, essa igualdade não foi observada para os casos de aceleração mínima e média, uma vez que o resultado do teste de hipóteses foi de rejeitar a hipótese nula nessas condições.

Tabela 3.4 – Resultados do teste t de Student e das métricas dos desvios entre os resultados experimentais e simulados

Parâmetro	Aceleração mínima	Aceleração média	Aceleração máxima
β_1	0,8695	0,9183	0,9733
p-valor	0,0000	0,0002	0,1173
Desvio relativo médio (%)	14,68%	9,21%	5,56%
Desvio relativo máximo (%)	23,87%	19,83%	12,74%
RMSE (L/h)	1,02	0,93	0,73

Os valores calculados do coeficiente angular para os casos de aceleração mínima e média indicaram que o modelo desenvolvido apresentou uma tendência de superestimar o consumo de combustível do trator em regime de aceleração parcial. Essa diferença tornou-se mais pronunciada à medida que o nível de aceleração do motor foi reduzido. Essa situação pode ser explicada pelo fato de o modelo matemático apresentado na norma ASABE D497.7, empregado nesse estudo, ter sido elaborado com base em testes realizados em diversos tratores no período de 1980 a 2005. Desse modo, o trator testado pode ter apresentado um desempenho mais

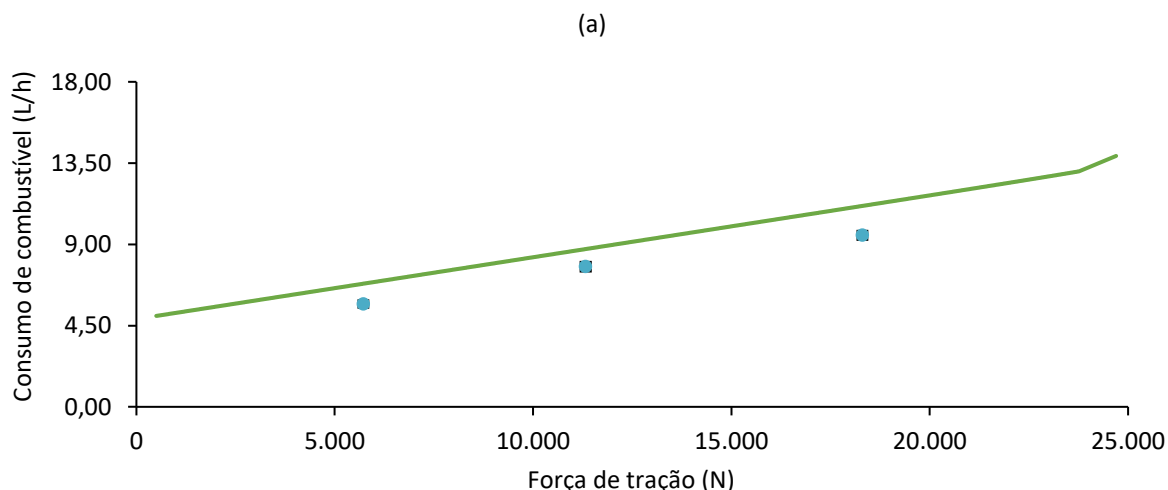
econômico em acelerações parciais do que a média dos tratores utilizados para o desenvolvimento do modelo.

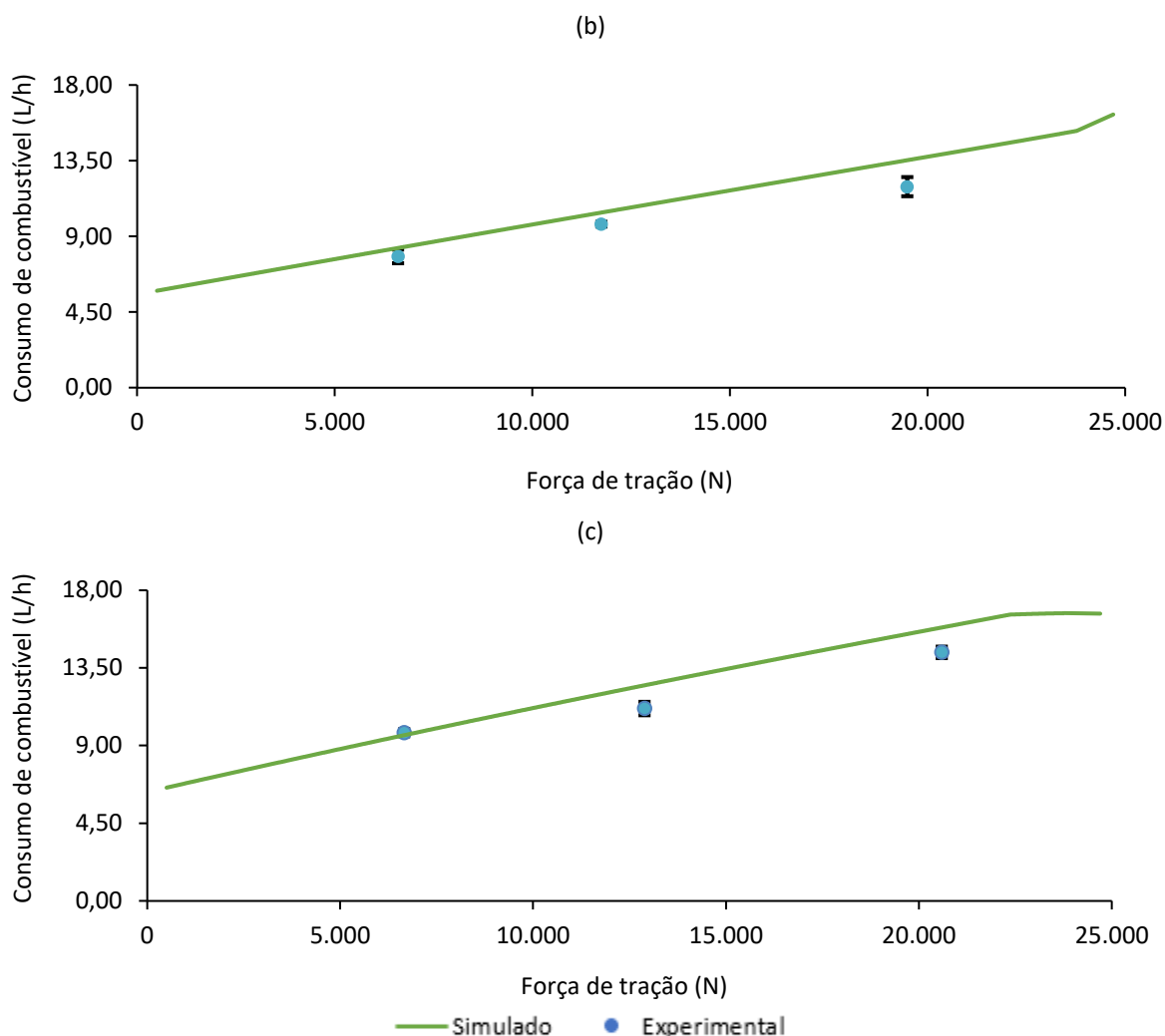
O erro quadrático médio diminuiu à medida que o nível de aceleração aumentou, corroborando a tendência de menor dispersão dos pontos junto à reta de regressão no caso aceleração máxima. Embora a igualdade estatística não tenha sido observada para situações nas quais o motor estava parcialmente acelerado, foi identificado que o desvio relativo médio foi inferior a 15% para os três níveis de aceleração analisados. Além disso, foi verificada uma associação linear entre os resultados simulados e experimentais para todos os casos, conforme indicado pelo coeficiente de determinação (R^2).

3.5.2. Desempenho do trator com relação ao consumo de combustível

Na Figura 3.9 são exibidos gráficos que relacionam o consumo horário de combustível do trator de acordo com o aumento na força aplicada na barra de tração. Os dados foram obtidos a partir de resultados das simulações e dos testes experimentais. Os gráficos apresentam os níveis mínimo, médio e máximo de aceleração do motor, durante a operação do trator na condição de solo gradado. Essa análise foi realizada utilizando a marcha 2B, a qual apresenta a menor relação de transmissão. Com o intuito de evidenciar a precisão das medidas do consumo de combustível, o erro padrão da média foi adotado como indicador de desvio nos resultados experimentais.

Figura 3.9 – Consumo de combustível em função da força de tração em solo gradado para as acelerações do motor: (a) mínima, (b) média, (c) máxima





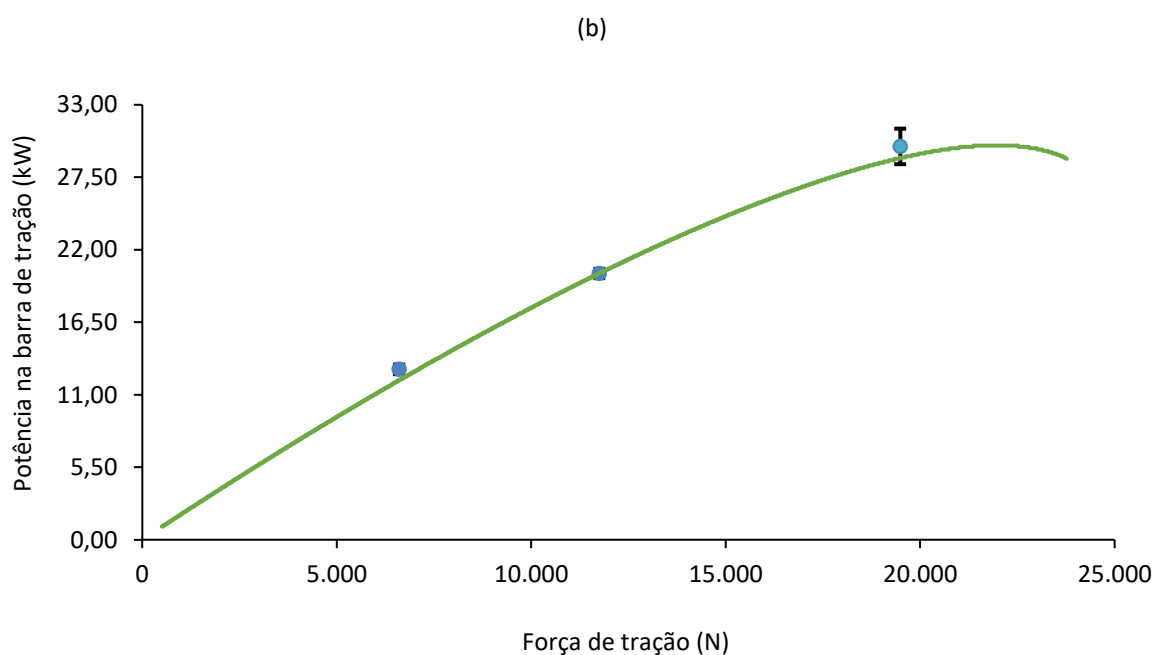
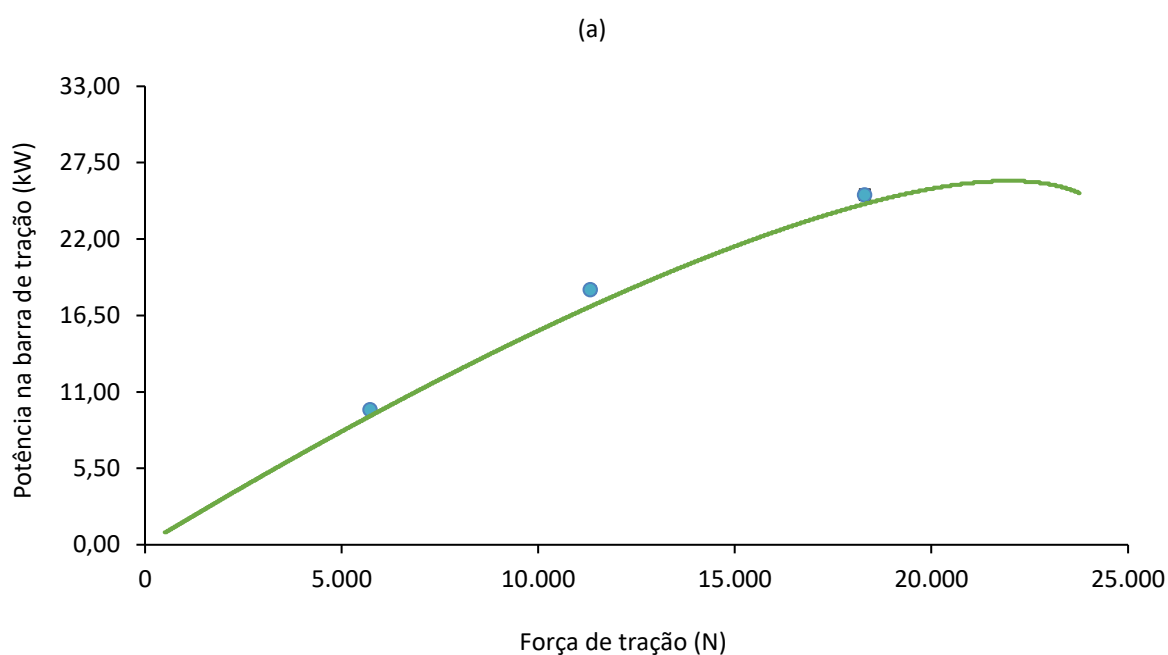
Fonte: O Autor.

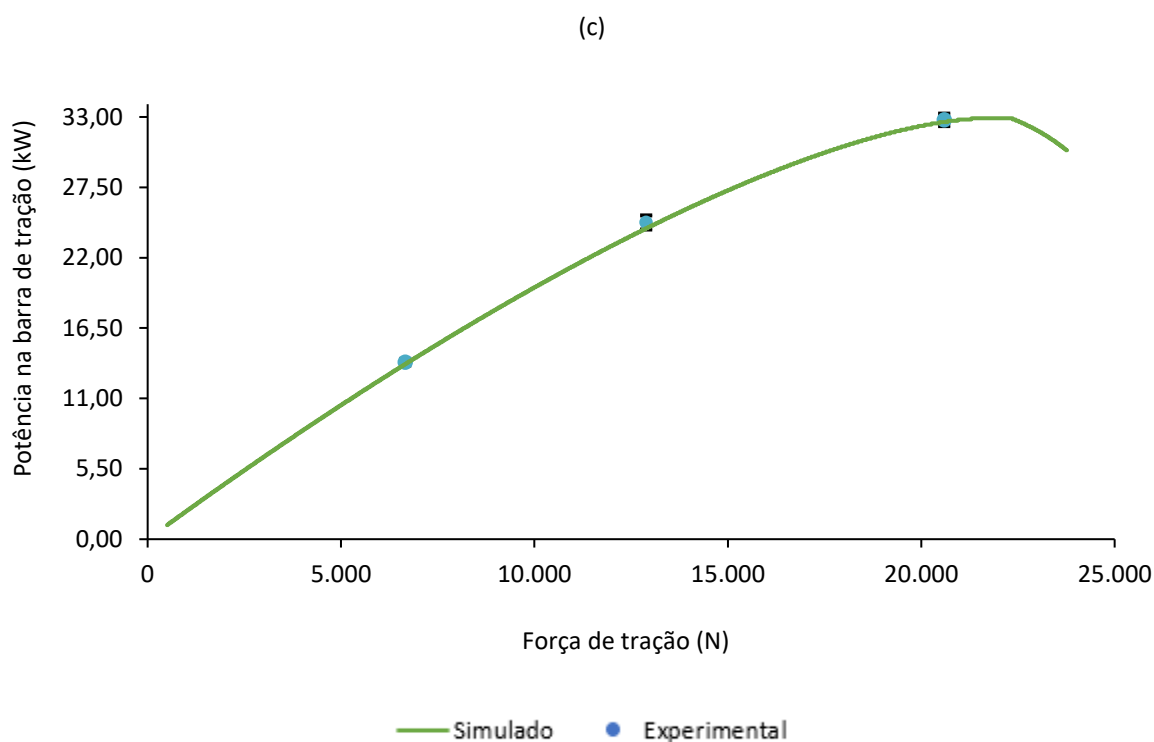
Conforme evidenciado nos gráficos, os pontos experimentais se aproximaram da curva obtida por meio da simulação em todos os casos. Foi observado que tanto para as simulações quanto para os testes experimentais o consumo de combustível cresceu com o aumento da força de tração. O aumento do consumo de combustível em função do crescimento da força de tração foi confirmado por Siddique et al. (2021) em um estudo que avaliou um modelo matemático para previsão do consumo de combustível em um motor de trator, em conjunto com ensaios experimentais. Adicionalmente, verificou-se que para uma determinada força de tração o consumo de combustível aumentou conforme o aumento do nível de aceleração do motor.

A variação da potência na barra de tração em função da força de tração é apresentada na Figura 3.10. Os dados foram obtidos por meio de simulações e de ensaios de tração. Os gráficos evidenciam as condições de aceleração mínima, média e máxima do motor, na condição de solo gradado e na marcha 2B. Os desvios dos

resultados experimentais foram indicados pelo erro padrão da média. Conforme evidenciado nos gráficos, a potência na barra de tração aumentou com o incremento da força de tração até um ponto máximo. Após isso, foi observada uma tendência de queda da potência mesmo com o contínuo aumento da força. Além disso, foi evidenciado que, para uma força estabelecida, a potência gerada na barra de tração cresceu com o aumento do nível de aceleração do motor.

Figura 3.10 – Potência na barra de tração em função da força de tração em solo gradado para as acelerações do motor: (a) mínima, (b) média, (c) máxima

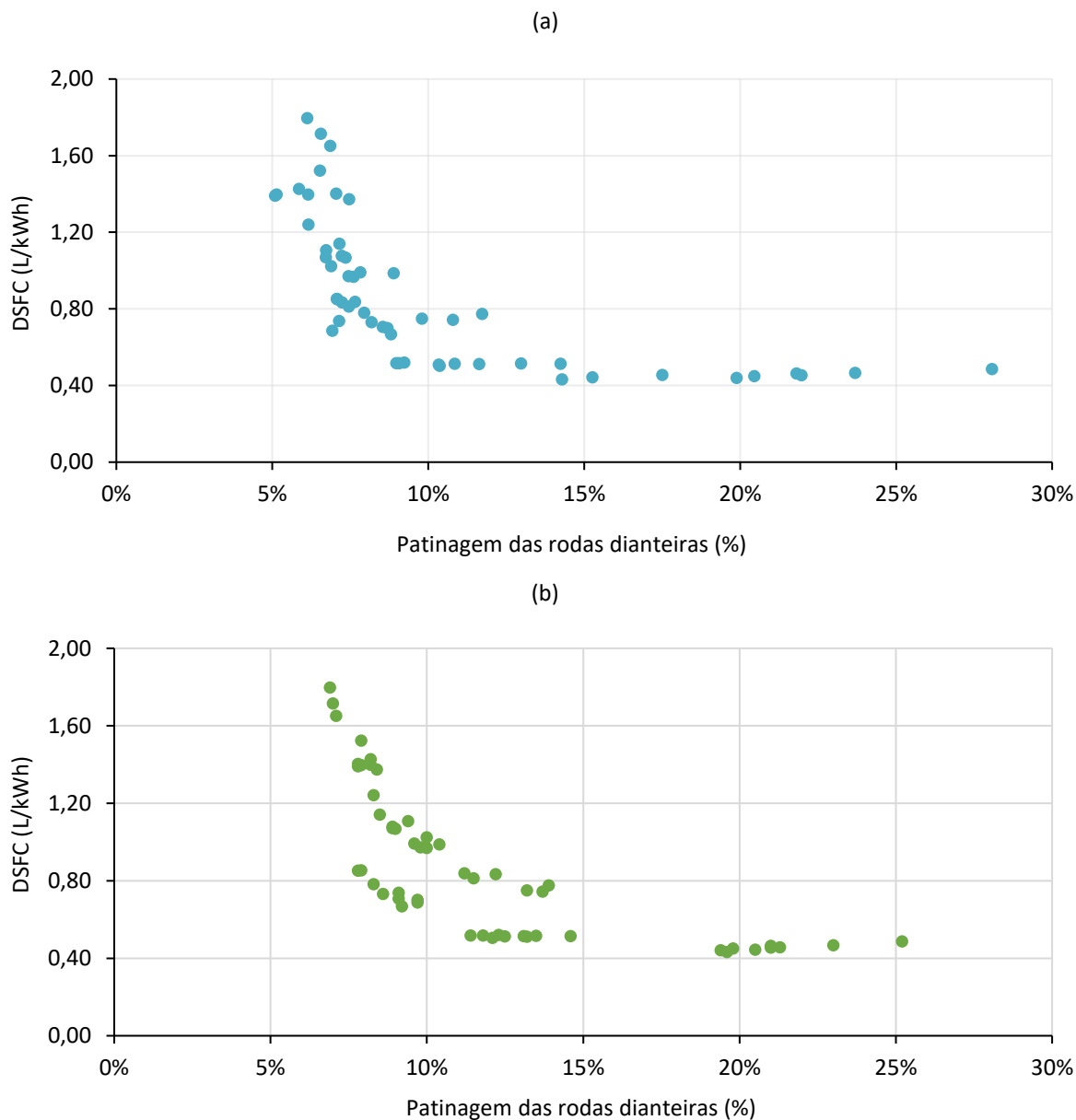




Fonte: O Autor.

Nos testes experimentais, observou-se um aumento no consumo de combustível conforme o aumento da patinação. A variação da patinação do rodado dianteiro variou de 5,09% a 28,07%, resultando em consumos de combustível de 4,35 L/h e 14,40 L/h, respectivamente. Esses resultados foram corroborados por Kumar et al. (2017), em um estudo que indicou uma economia de combustível na operação do trator ao limitar a patinação em 15%. Além disso, os testes experimentais revelaram que o consumo específico de combustível na barra de tração (DSFC) diminuiu até atingir um determinado valor da patinação do rodado dianteiro, conforme ilustrado na Figura 3.11a. Essa mesma tendência foi observada por meio dos correspondentes pontos simulados (Figura 3.11b). Após isso, o consumo específico se manteve aproximadamente constante, mesmo com o aumento da patinação. Essas constatações destacam a importância de operar o trator dentro de limites específicos de patinação, assegurando o uso eficiente da energia do combustível.

Figura 3.11 – Variação do consumo específico de combustível em função da patinagem do rodado dianteiro, considerando resultados (a) experimentais e (b) simulados



Fonte: O Autor.

3.6. CONCLUSÃO

O programa de computador simulou o desempenho e o consumo de combustível de um trator de rodas, com base nas condições testadas. A utilização do sistema embarcado desenvolvido facilitou a execução da fase de ensaios de tração. O teste de hipóteses evidenciou a equivalência estatística entre os resultados experimentais e simulados no regime de aceleração máxima. No entanto, nos regimes de acelerações parciais, houve uma tendência de superestimação do consumo de combustível pelo programa de computador, sobretudo à medida que o nível de aceleração foi reduzido. Ainda assim, os desvios médios foram inferiores a 15% para todos os casos. Além disso, os índices aplicados indicaram concordância entre os dados, sendo que todos os casos foram classificados como “Ótimo” de acordo com índice de desempenho de Camargo e Sentelhas.

O desempenho do trator com relação ao consumo de combustível, foi avaliado, evidenciando-se que o consumo aumentou à medida que a força de tração se elevava, tanto nas condições simuladas quanto nas experimentais. O consumo horário de combustível também cresceu com o aumento do nível de aceleração do motor, para um determinado valor da força aplicada na barra de tração. Por outro lado, a potência na barra de tração cresceu à medida que a aceleração do motor aumentou. Além disso, foi constatado que o consumo específico de combustível na barra de tração decresceu com o aumento da patinação até um certo valor limite, após isso essa variável manteve-se aproximadamente constante, mesmo com o aumento da patinação.

3.7. REFERÊNCIAS

ASAE. ASAE D497.7 MAR2011 Agricultural Machinery Management Data. **Test**, v. 2011, p. 9, 2011.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

GUPTA, C. et al. Automatic tractor slip-draft embedded control system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 165, p. 104947, 1 out. 2019.

KIM, Y. S. et al. Working Load Analysis of a 42 kW Class Agricultural Tractor According to Tillage Type and Gear Selection during Rotary Tillage Operation. **Agriculture (Switzerland)**, v. 13, n. 8, 2023.

KOLATOR, B. A. Modeling of Tractor Fuel Consumption. **Energies**, v. 14, n. 8, p. 2300, 19 abr. 2021.

KUMAR, A. A. et al. A device to measure wheel slip to improve the fuel efficiency of off road vehicles. **Journal of Terramechanics**, v. 70, p. 1–11, abr. 2017.

KUMAR, A. A.; TEWARI, V. K.; NARE, B. Embedded digital draft force and wheel slip indicator for tillage research. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, p. 38–49, set. 2016.

KUMAR, R.; PANDEY, K. P. A program in Visual Basic for predicting haulage and field performance of 2WD tractors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 67, n. 1–2, p. 18–26, jun. 2009.

LEE, J. W.; KIM, J. S.; KIM, K. U. Computer simulations to maximise fuel efficiency and work performance of agricultural tractors in rotovating and ploughing operations. **Biosystems Engineering**, v. 142, p. 1–11, fev. 2016.

LEE, S. H. et al. Performance tests of flowmeters for fuel consumption measurements in fishing vessels. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 80, March, p. 101959, 2021.

MANSIR, I. B. et al. Comparison of three arrangements of internal combustion engine-

driven energy systems boosted with PEM fuel cell towards net-zero energy systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 52, p. 787–798, jan. 2024.

MD-TAHIR, H. et al. Experimental investigation of traction power transfer indices of farm-tractors for efficient energy utilization in soil tillage and cultivation operations. **Agronomy**, v. 11, n. 1, 2021.

MOINFAR, A. et al. The effect of the tractor driving system on its performance and fuel consumption. **Energy**, v. 202, p. 117803, jul. 2020.

NATARAJ, E. et al. Embedded digital display and warning system of velocity ratio and wheel slip for tractor operated active tillage implements. **Journal of Terramechanics**, v. 97, p. 35–43, 2021.

OLIVEIRA, R. A. et al. Desempenho do irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 166–173, 2008.

PRANAV, P. K. et al. Automatic wheel slip control system in field operations for 2WD tractors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 84, p. 1–6, 2012.

SHRIVASTAVA, P. et al. HMI-assisted visual interface-cum-embedded system for measurement of tractor–implement performance parameters. **Journal of Field Robotics**, June, p. 0–22, 2023.

SIDDIQUE, M. A. A. et al. Simulation of fuel consumption based on engine load level of a 95 kw partial power-shift transmission tractor. **Agriculture (Switzerland)**, v. 11, n. 3, p. 1–17, 2021.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.

CAPÍTULO IV – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DE UM TRATOR AGRÍCOLA DE RODAS

4.1. RESUMO

O trabalho do trator de rodas agrícola é fundamental no setor no agrícola. Grande parte das atividades são realizadas por meio da potência disponibilizada na barra de tração. A análise energética é crucial na operação dos tratores, já que os combustíveis utilizados representam uma considerável parcela dos custos operacionais. Além disso, uma significativa parte da energia produzida no motor é desperdiçada na interface pneu-solo. A eficiência de produção de tração do trator pode ser melhorada ao avaliar a relação entre os parâmetros envolvidos nesse processo. Essa análise pode ser realizada com a implementação de modelos matemáticos para o desenvolvimento de programas de computador. Em vista disso, esse trabalho teve o objetivo de utilizar um programa de computador que simula o desempenho dos tratores de rodas, para analisar como a variação dos parâmetros relacionados à operação influenciam o desempenho de tração e o consumo de combustível de um trator. Esse programa de computador foi desenvolvido em linguagem Python versão 3.9. No programa, um modelo matemático foi utilizado para realizar a predição do desempenho de tração. As equações da norma ASAE D497.7. foram empregadas para calcular o consumo de combustível. Em cada simulação, o programa identificou a força de tração máxima produzida pelo trator e qual foi o fator limitante dessa força. As simulações computacionais abrangeram variações de lastragem, condição de solo, tipo de pneu, relações de transmissão, configuração da tração dianteira auxiliar, declividade da superfície e nível de aceleração do motor. Em 58 simulações computacionais, foi identificado que a máxima força de tração realizada pelo trator foi 22.310 N. A máxima eficiência de produção de tração foi 68,30%. Em 91,38% das simulações, a máxima força de tração realizada foi limitada pela patinação das rodas motrizes.

Palavras-chave: Desempenho de tração; Eficiência de tração; Consumo de combustível; Força de tração.

4.2. ABSTRACT

The work of the agricultural wheeled tractor is fundamental in the agricultural sector. Much of the activities are performed through the power provided at the drawbar. Energetic analysis is crucial in tractor operation, as the fuels used constitute a significant portion of the operational costs. Furthermore, a significant portion of the energy produced in the engine is wasted at the tire-soil interface. The traction production efficiency of the tractor can be improved by evaluating the relationship between the parameters involved in this process. This analysis can be conducted through the implementation of mathematical models for the development of computer programs. In light of this, this work aimed to utilize a computer program that simulates the performance of wheeled tractors to analyze how the variation of parameters related to operation influences traction performance and fuel consumption of a tractor. This computer program was developed in Python version 3.9. In the program, a mathematical model was employed to predict traction performance. The equations from the ASAE D497.7 standard were employed to calculate fuel consumption. In each simulation, the program identified the maximum traction force produced by the tractor and determined the limiting factor for this force. The computer simulations encompassed variations in ballasting, soil condition, tire type, transmission ratios, auxiliary front-wheel drive configuration, surface slope, and engine acceleration level. In 58 computer simulations, it was identified that the maximum traction force achieved by the tractor was 22.310 N. The maximum traction production efficiency was 68,30%. In 91,38% of the simulations, the maximum traction force achieved was limited by the slipping of the drive wheels.

Keywords: Traction performance. Traction efficiency. Fuel consumption. Traction force.

4.3. INTRODUÇÃO

O trator agrícola de rodas tem um papel crucial no desenvolvimento de trabalhos no setor agrícola. Uma de suas finalidades é realizar trabalhos por meio da barra da tração, tracionando cargas de diversas magnitudes a uma determinada velocidade. A análise energética é fundamental na operação dos tratores, já que os combustíveis utilizados representam uma significativa parcela dos custos operacionais. Além disso, é imprescindível que os tratores atendam os requisitos com relação a emissão de poluentes (ASHOK KUMAR et al., 2017). Diante desse cenário, deve-se conhecer como as variáveis envolvidas na operação impactam a eficiência do trator. A eficiência de produção de tração de um trator, é definida por meio da razão entre a potência gerada pelo motor e a potência disponível na barra de tração. Esse parâmetro de desempenho fornece informações acerca da capacidade de tração e do consumo de combustível do trator (SHAFAEI; LOGHAVI; KAMGAR, 2018).

A eficiência do trator pode ser maximizada conhecendo-se influência das variáveis envolvidas no processo operacional. O uso de modelos matemáticos pode ser para tal finalidade. Nesse contexto, pesquisadores desenvolveram modelos para avaliar o desempenho de tratores (LEE; KIM; KIM, 2016; REGAZZI; MARALDI; MOLARI, 2019; SHAFAEI; LOGHAVI; KAMGAR, 2021b). A aplicação de modelos matemáticos em programas de computador para elaboração de simuladores é uma alternativa que facilita essa análise. Essa ferramenta oferece suporte a pesquisadores e fabricantes na determinação do efeito dos fatores que influenciam o desempenho do trator, assim como ajuda a encontrar soluções que otimizem o seu desempenho. Todo esse processo pode ser conduzido sem que haja a necessidade de realizar testes, que demandam tempo e recursos financeiros (KUMAR; PANDEY, 2009).

Dentre as variáveis que afetam o desempenho do trator, destaca-se o efeito da razão de redução de percurso, comumente denominada patinagem. Esse fenômeno ocorre devido ao deslizamento entre o pneu e a superfície do solo, à deformação do dispositivo de tração e ao cisalhamento interno do solo. A patinagem resulta na redução na velocidade de deslocamento do trator e ocorre sempre que o dispositivo de tração desenvolve força de tração (ZOZ; GRISSO, 2003). A eficiência de produção de tração atinge valores máximos quando a patinagem está dentro da faixa de valores considerada ótima, geralmente entre 10% e 15%. Quando a patinagem é baixa, parte do torque transferido à roda é utilizado para vencer a força

de resistência ao rolamento, ao invés de ser convertido em esforço de tração. Valores elevados de patinagem indicam que parte da rotação da roda não é convertida em velocidade de deslocamento, resultando em perda de potência de tração, já que a potência de tração é o produto entre a força de tração e a velocidade de deslocamento (GUPTA et al., 2019).

A carga vertical nos pneus também é um fator importante na interface-pneu solo, impactando a capacidade de tração do trator. Essa carga pode ser ajustada com a adição de lastros às rodas. O uso de lastros é útil para controlar a patinagem das rodas motrizes, sendo recomendado acrescentá-los em situações que a patinagem é alta e removê-los à medida que a patinagem diminui. Os lastros alteram a massa total do trator, assim como a posição de seu centro de gravidade. Por isso, a distribuição dessa massa entre os eixos dianteiro e traseiro também tem influência no desempenho do trator (KUMAR et al., 2018). As características relacionadas à constituição dos pneus também são importantes para estabelecer a interface-pneu solo. Os pneus são os elementos responsáveis pelo desenvolvimento da tração e pelo deslocamento do trator, influenciando o desempenho do trator (KUMAR; NOORI; PANDEY, 2019).

A máxima capacidade de tração dos tratores pode ser limitada pela estabilidade longitudinal, pela potência fornecida pelo motor e pela força de tração que pode ser desenvolvida pelas rodas motrizes (SAHAY; TEWARI, 2004). A máxima força de tração é determinada de acordo com a situação que o correr primeiro. Devido à força de tração e ao movimento do trator, ocorre uma transferência de massa do eixo dianteiro para o eixo traseiro. Quando todo o peso do eixo dianteiro é transferido para o eixo traseiro, a força de reação no eixo dianteiro se anula, resultando na perda de estabilidade. A operação do motor é definida pelo nível de aceleração e pela carga imposta, gerando torque e rotação e, conseqüentemente, determinando a potência (HAN; YAN; TANG, 2023). Caso a potência requerida na operação seja maior do que a potência fornecida, o funcionamento do motor é interrompido. Desse modo, deve-se conhecer o ponto de operação do motor em uma determinada operação para garantir que a potência necessária seja fornecida. À medida que a força aplicada na barra de tração do trator cresce, a patinagem das rodas motrizes aumenta. Sendo assim, a partir de uma força limite, a patinagem atinge 100% e o trator perde a capacidade de se deslocar.

Os tratores de rodas têm importância fundamental no crescimento da produtividade nos campos de produção agrícola. O desempenho do trator pode ser otimizado e os custos reduzidos com o correto ajuste dos parâmetros envolvidos na operação. Diante desse contexto, é evidente a necessidade de melhorar a eficiência dos tratores na execução dos trabalhos de campo do setor agrícola. Com esse propósito, deve-se direcionar pesquisas para compreender como as variáveis que governam o desempenho dos tratores se relacionam e para encontrar soluções que aprimorem a eficiência. A aplicação de modelos matemáticos em programas de computador é uma estratégia que facilita essa análise, além de resultar em economia de recursos. Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo aplicar um programa de computador que simula o desempenho dos tratores de rodas, para analisar como a alteração de variáveis relacionadas à operação influenciam o desempenho de tração e o consumo de combustível de um trator. Essa ferramenta possui o potencial de aprimorar os trabalhos de campo que envolvem o uso de tratores de rodas, especificando melhores condições de operação e identificando qual a faixa de potência ideal de um trator para executar determinada tarefa.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho desenvolvido no Laboratório de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizado em Viçosa/MG, foi executado em duas etapas. A primeira consistiu no desenvolvimento de programa de computador para análise do desempenho de tração e de consumo de combustível de um trator agrícola com rodas. Já na segunda foram realizadas simulações computacionais para avaliar o desempenho de tração e o consumo de combustível de um trator de rodas

4.4.1. Desenvolvimento do programa de computador

O programa de computador destinado a analisar a capacidade de tração de um trator agrícola de rodas foi desenvolvido com base nos conceitos e modelo matemático propostos por Goering et al. (2003). Esse modelo matemático é referente à um trator agrícola com tração nas quatro rodas e leva em consideração a condição de equilíbrio estático. Desse modo, presume-se que o deslocamento do trator ocorre em velocidade constante e que as velocidades angulares das rodas motrizes são constantes. Esse modelo foi descrito com base nas forças que atuam no trator.

Quando torque é transferido para a roda de tração, desenvolve-se uma força de tração bruta. Essa força não pode ser medida diretamente e está relacionada do raio da roda. Caso a tração dianteira auxiliar (TDA) estiver desligada, é importante observar que a força de tração bruta no rodado dianteiro é nula. À medida que o trator se desloca, surge a força de resistência ao rolamento, associada principalmente às perdas devido à deformação do solo e do rodado. A força de tração líquida, cuja finalidade é tracionar máquinas e implementos acoplados ao trator, é definida pela diferença entre a força de tração bruta e a força de tração líquida. A força de reação da roda, perpendicular à superfície do solo, está relacionada à distribuição de peso no rodado do trator (ZOZ; GRISSO, 2003).

As equações desse modelo foram empregadas para calcular a força de reação da roda perpendicular à superfície do solo, bem como a força de tração bruta e a força de resistência ao rolamento, considerando os rodados dianteiro e traseiro. Esses cálculos foram executados por meio da determinação do número de mobilidade, um parâmetro incorporado nas equações utilizadas para calcular a capacidade de tração de uma roda. Esse parâmetro considerou a resistência à

penetração do solo, a razão entre a largura e o diâmetro da roda e a razão de deflexão do pneu (GOERING et al., 2003). Foram aplicadas também equações para determinar a patinagem dos rodados dianteiro e traseiro, bem como equações para calcular os parâmetros associados ao motor de combustão interna, como torque, rotação e potência do motor.

O cálculo do consumo de combustível em tratores agrícolas contendo motor com ignição por compressão foi adicionado ao programa de computador utilizando as equações da norma ASAE D497.7 (ASAE, 2011). Essa norma apresentou o cálculo do consumo específico volumétrico de combustível nos motores alimentados por diesel. As equações foram desenvolvidas por meio de resultados de testes do Laboratório de Testes de Trator da Universidade de Nebraska, realizado entre os anos de 1980 e 2005. A aplicação desse modelo possibilitou determinar o consumo de combustível em aceleração total, bem como o consumo quando o motor estava parcialmente acelerado. Os cálculos levaram em consideração a razão entre a potência equivalente na TDP (tomada de potência) e a potência nominal na TDP, assim como a posição da alavanca do acelerador.

As equações que integram o modelo matemático para análise da capacidade de tração, em conjunto com as equações para cálculo do consumo de combustível foram implementadas em um programa de computador utilizando linguagem Python versão 3.9. Foi desenvolvida uma interface gráfica do usuário utilizando a biblioteca *PyQt5*. O programa foi desenvolvido para realizar os cálculos de modo iterativo. A cada iteração, o valor da força aplicada na barra de tração foi progressivamente incrementado em um valor pré-estabelecido. Para cada valor da força de tração, foram calculadas as variáveis reação no eixo dianteiro, patinagens das rodas dianteiras e traseiras, torque do motor, rotação do motor, potência do motor, velocidade do trator, potência na barra de tração, relação entre força de tração e peso do trator, eficiência de produção de tração e consumo de combustível.

O incremento da força de tração era concluído e o processo iterativo de execução do programa encerrava-se quando uma das três condições que limitam a capacidade de tração ocorresse. A primeira condição era quando a força de reação do solo no rodado dianteiro tornava-se nula, indicando perda de estabilidade longitudinal do trator (empinamento). A segunda condição era atingida quando a patinagem de algum dos rodados atingia o valor de 100%, situação na qual o trator

não podia se deslocar. A terceira era quando o torque para produzir a força de tração requerida superava o torque máximo produzido pelo motor.

O programa de computador demandou a entrada de dados referentes às características dos eixos dianteiro e traseiro do trator, incluindo informações como tipo de pneu, números de pneu no eixo, diâmetro nominal do aro, diâmetro do pneu indeformado, raio de rolamento da roda e lastragem do eixo. Também necessitou ser informado o peso do trator sem lastros, as coordenadas horizontal e vertical do centro de gravidade do trator com relação ao centro do rodado traseiro, a distância entre centros dos rodados, as distâncias horizontal e vertical entre a barra de tração e o centro do eixo traseiro, o índice de cone do solo, os ângulos de inclinação da superfície do solo e da força aplicada na barra de tração, bem como o incremento dessa força.

Além desses parâmetros, foi necessário fornecer a curva de torque e a respectiva rotação produzidos no motor, obtida com base em pontos de operação do motor. Esses pontos correspondem às condições de rotação máxima, rotação nominal, potência máxima e torque máximo. Adicionalmente, foram especificados a eficiência do sistema de transmissão de potência, as relações de transmissão entre o motor e os dois eixos, a configuração da TDA (ligada ou desligada) e a posição percentual da alavanca do acelerador. Ao concluir a simulação, o programa de computador informou qual dos três fatores limitou a tração e disponibilizou as variáveis calculadas na simulação na forma de tabela e gráficos. A interface gráfica do usuário para entrada de dados e simulação é apresentada no Apêndice A.

4.4.2. Planejamento das simulações computacionais

As simulações computacionais para analisar o consumo de combustível e o desempenho de tração foram realizadas para avaliar o trator agrícola John Deere, modelo 5705, o qual possui TDA. Esse trator possui motor turboalimentado com 4 cilindros, cilindrada total de 4.500 cm³, torque máximo de 330 Nm a 1.600 rpm, potência de 62 kW, permanecendo constante na faixa de rotação compreendida entre 2.000 e 2.400 rpm. O trator possui 12 relações de transmissão (marcha), sendo 9 à frente e 3 à ré. As relações de transmissão à frente do trator são apresentadas na Tabela 4.1. As simulações foram realizadas considerando a potência líquida do trator. Em todas as simulações foi considerado que o ângulo de aplicação da força na barra

de tração era 0° e foi adotado 0,85 para a eficiência de transmissão de potência do trator.

Tabela 4.1 – Relações de transmissão das marchas à frente do trator

Marcha	Relação de transmissão do eixo dianteiro	Relação de transmissão do eixo traseiro
1A	232,87	333,90
2A	161,02	232,16
3A	118,19	170,54
1B	98,40	142,86
2B	68,11	99,02
3B	50,89	72,58
1C	38,14	52,09
2C	28,50	36,36
3C	22,42	28,42

A análise da influência da lastragem foi conduzida mediante a aplicação de lastros nos eixos dianteiro e traseiro. Para isso, foram consideradas massas com valores de 0, 250, 500 e 750 kg, aplicadas de forma combinada nos dois eixos, totalizando assim 16 simulações computacionais. Essa análise possibilitou não só a influência da carga vertical imposta ao trator, mas também a distribuição dessa carga nos eixos. Em todas as simulações adotou-se pneus diagonais, índice de cone de 1.000 kPa, marcha 2A, TDA desligada e motor com aceleração total.

A condição de solo foi analisada realizando simulações nas quais o índice de cone do solo foi variado em cinco valores. As simulações contemplaram os índices 500, 1.000, 1.500, 2.000 e 2.500 kPa. Para cada condição de solo simulada foram avaliados os pneus diagonal e radial. Nesse contexto, foram conduzidas 10 simulações computacionais. As simulações foram executadas com o trator sem lastros, na marcha 2A, com a TDA desligada e com o motor totalmente acelerado.

A análise da influência das relações de transmissão e da tração dianteira foi conduzida mediante à realização de 18 simulações computacionais. Essa análise abrangeu as 9 marchas à frente do trator, bem como as duas configurações da TDA. As simulações foram realizadas com pneus diagonais, considerando que o índice de

cone do solo era 1.000 kPa, que o trator estava sem lastros e que o motor estava totalmente acelerado.

O efeito da declividade no desempenho do trator foi avaliado simulando a operação do trator em quatro variações de inclinação da superfície do solo. Foram considerados ângulos de 0°, 10°, 20° e 30°. A análise foi realizada com o trator operando sem lastros, na marcha 2A, em superfície com o índice de cone de 1.000 kPa, com a TDA desligada, com pneus diagonais e com o motor totalmente acelerado.

A avaliação da aceleração parcial do motor foi realizada mediante a execução de 10 simulações computacionais. Foi realizada a simulação com a posição da alavanca do acelerador em 100%, subtraindo 10% desse valor nas simulações subsequentes, até que a posição da alavanca atingisse o valor de 10%. Foi considerado que a operação do trator ocorresse com pneus diagonais sem lastros, em superfície com índice de cone de 1.000 kPa, na marcha 1C e com a TDA desligada.

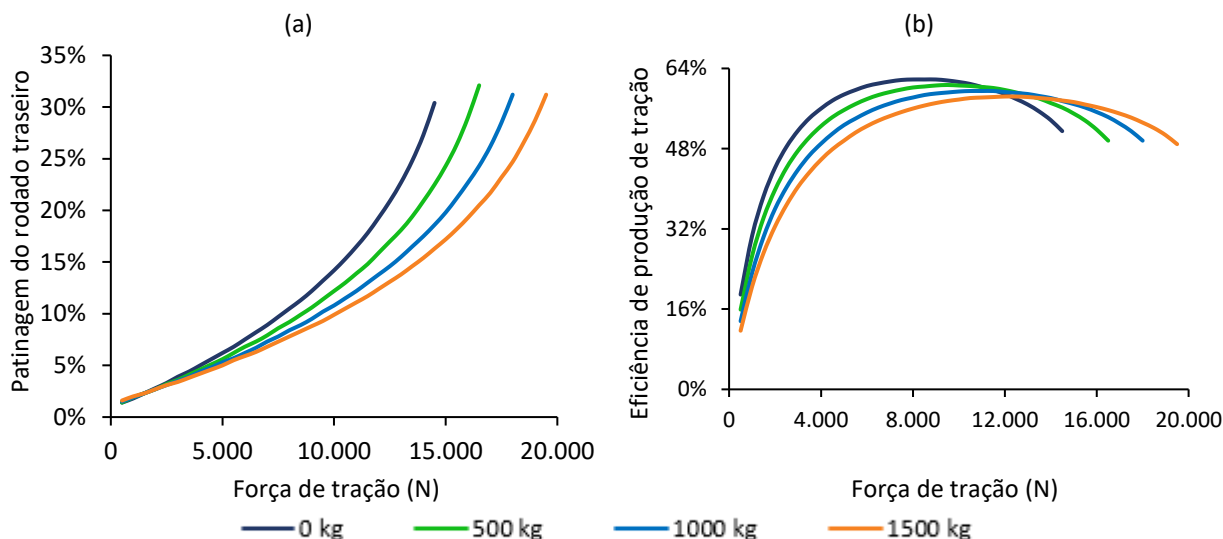
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todas as situações analisadas, a máxima força de tração desenvolvida foi 22.310 N, correspondendo a 78% do peso do trator. A máxima eficiência de produção de tração identificada foi 68,30%. Em nenhuma das simulações a tração foi limitada pela perda estabilidade longitudinal. A menor força de reação do eixo dianteiro foi de 2.140 N e ocorreu na situação em que o ângulo de inclinação da superfície era de 30°. Nessa situação, a patinagem do rodado dianteiro atingiu 100%, ocorrendo antes do empinamento. Nas simulações realizadas com a marcha 2C e 3C, com a TDA desligada, assim como nas simulações com as marchas 1C, 2C e 3C, com a TDA ligada, a tração foi limitada pelo torque disponibilizado pelo motor. Em todas as outras simulações, a patinagem das rodas motrizes limitou a tração.

4.5.1. Análise de desempenho do trator

A adição de lastro aos eixos dianteiro e traseiro do trator proporcionou uma maior capacidade de tração, uma vez que a força máxima desenvolvida pelo trator foi elevada conforme a carga vertical aumentou. Observou-se uma redução na patinagem do rodado traseiro à medida que mais lastro foi adicionado ao trator (Figura 4.1a). A análise foi realizada nas situações em que os lastros foram igualmente distribuídos entre os dois eixos. Para isso, foram consideradas massas totais de lastro de 0 kg, 500 kg, 1.000 kg e 1.500 kg. Resultados similares foram encontrados por Moinfar et al. (2020) em ensaios de tração para identificar a influência de lastros no desempenho de tração. Esse fenômeno ocorre devido ao incremento do peso das rodas, resultando em aumento nas forças atuantes na interface pneu-solo. Com isso, há um aumento do cisalhamento das camadas de solo e um acréscimo na força líquida de tração (SHAFAEI; LOGHAVI; KAMGAR, 2021a). Em cargas menores, a adição de lastros tornou o trator menos eficiente, entretanto, a partir de um determinado valor limite da força de tração, a eficiência de produção de tração elevou-se à medida que a lastragem do trator aumentou (Figura 4.1b).

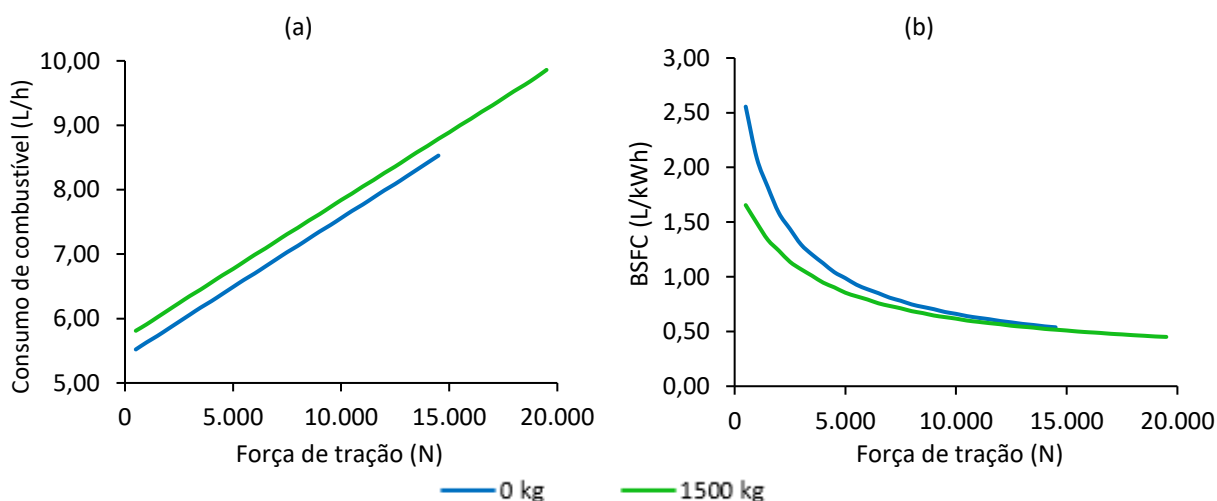
Figura 4.1 – Influência da lastragem no desempenho de tração do trator: (a) variação da patinagem do rodado traseiro e (b) variação da eficiência de produção de tração em função da força de tração



Fonte: O Autor.

A influência da lastragem no consumo de combustível do trator foi avaliada mediante à análise das situações em que o trator estava sem lastros e com 1500 kg de lastros, os quais estavam igualmente divididos entre os dois eixos. Observou-se a adição de lastros ao trator resultou em um consumo de combustível mais elevado (Figura 4.2a). No entanto, o consumo específico de combustível (BSFC) do trator lastrado foi menor (Figura 4.2b), já que nessa condição o trator foi capaz de produzir uma força de tração mais elevada, resultando em maior potência.

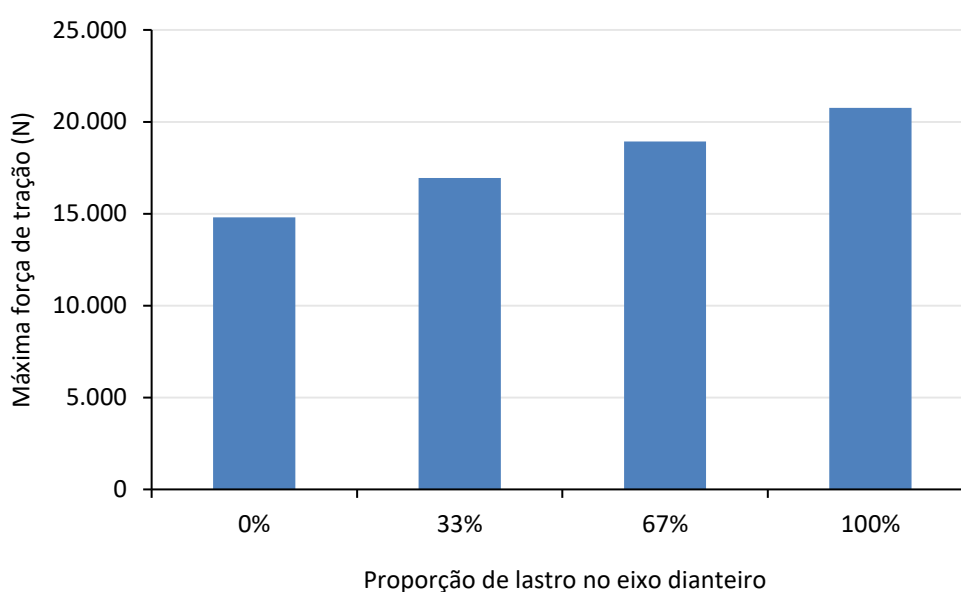
Figura 4.2 – Influência da lastragem no consumo de combustível do trator: (a) variação do consumo horário de combustível e (b) variação do consumo específico de combustível (BSFC) em função da força de tração



Fonte: O Autor.

A transferência de massa do eixo traseiro para o eixo dianteiro proporcionou em um aumento da capacidade de tração do trator. Analisando as simulações em que foram aplicados 750 kg de lastro ao trator, verificou-se que a força de tração máxima desenvolvida aumentou 40% com a transferência de toda massa do eixo traseiro para o eixo dianteiro (Figura 4.3). A eficiência de produção de tração também aumentou conforme a proporção da massa no eixo dianteiro adicionada.

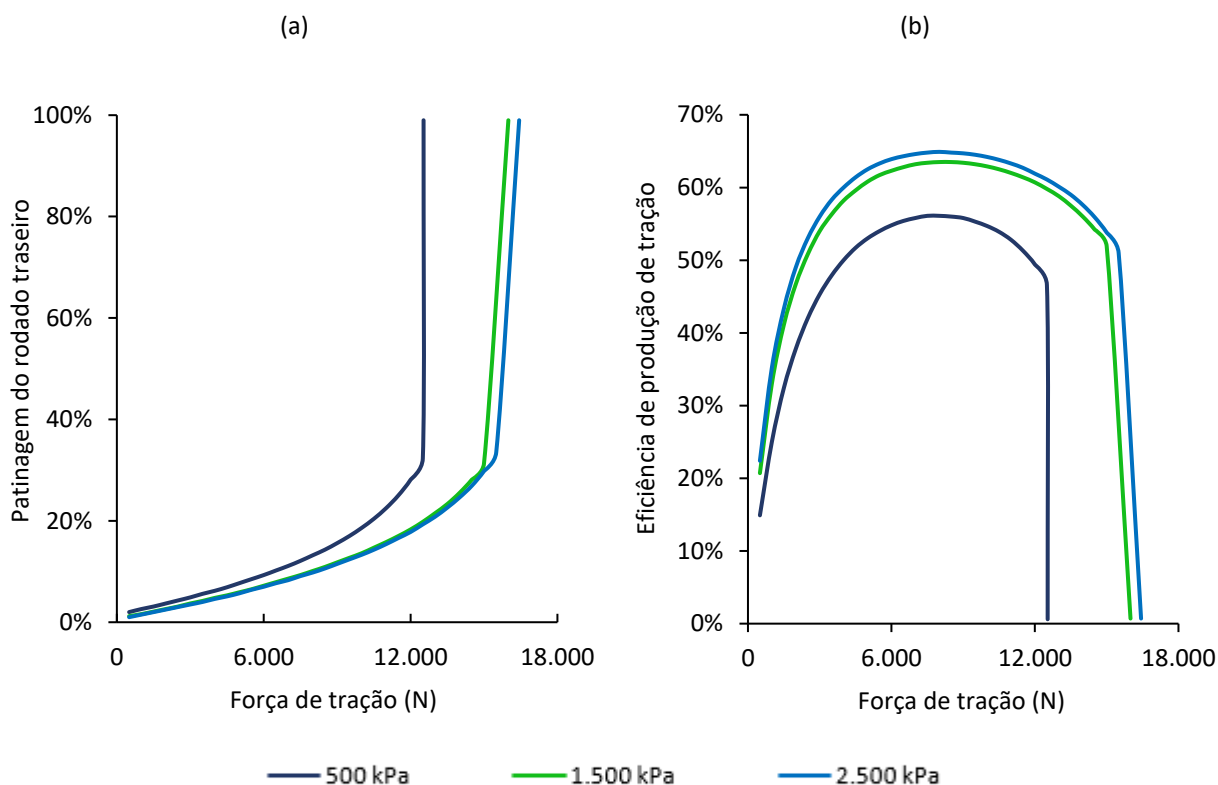
Figura 4.3 – Máxima força de tração desenvolvida pelo trator de acordo com a proporção de lastro adicionada no eixo dianteiro



Fonte: O Autor.

A variação da condição de solo, representada pelas simulações que consideraram diferentes valores do índice de cone do solo, resultou em uma elevação da força máxima de tração à medida que o índice aumentava. A análise das simulações em que os índices de cone foram 500, 1.500 e 2.500 kPa, indicou que o aumento desse parâmetro proporcionou uma redução da patinagem das rodas motrizes (Figura 4.4a). Essa redução foi devida principalmente à maior resistência ao rolamento dos pneus em superfícies menos compactadas (KUMAR; NOORI; PANDEY, 2019). Adicionalmente, constatou-se que os maiores valores de patinagem nas condições de solo menos compactadas resultaram velocidades de deslocamento menores e, conseqüentemente, a eficiência de produção de tração reduziu (Figura 4.4b).

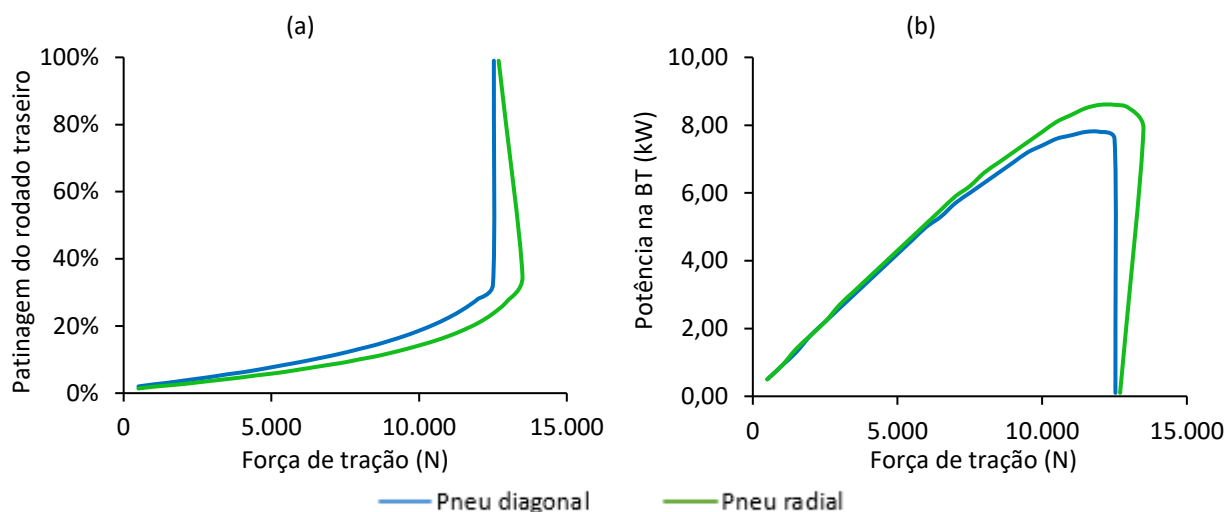
Figura 4.4 – Influência da condição de solo no desempenho de tração do trator: (a) variação da patinagem do rodado traseiro e (b) variação da eficiência de produção de tração em função da força de tração



Fonte: O Autor.

O uso de pneus radiais proporcionou um aumento na capacidade de tração do trator em comparação ao uso de pneus diagonais, considerando todas as condições de solo simuladas. Analisando a superfície com índice de cone de 500 kPa, observou-se que o uso dos pneus radiais acarretou na redução da patinagem das rodas motrizes (Figura 4.5a). A menor patinagem, por sua vez, favoreceu o deslocamento do trator em velocidades mais elevadas, resultando em uma maior potência disponibilizada na barra de tração (Figura 4.5b). Além disso, foi observado que a eficiência de produção de tração foi superior nos casos em que o pneu radial foi adotado. Essas constatações são atreladas ao fato de que o cruzamento das fibras que compõem o pneu diagonal o deixam mais rígido, resultando em uma menor área de contato com o solo e uma maior resistência ao rolamento, quando comparado ao pneu radial (KUMAR; NOORI; PANDEY, 2019).

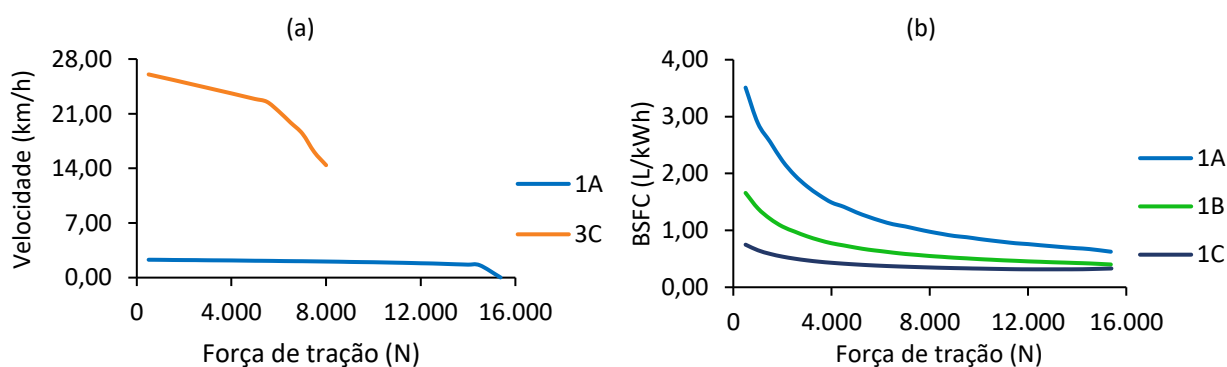
Figura 4.5 – Influência do tipo de pneu no desempenho de tração do trator: (a) variação da patinagem do rodado traseiro e (b) da potência na barra de tração em função da força de tração



Fonte: O Autor.

A comparação entre as marchas com a menor e a maior relação de transmissão esclareceu que o uso de marchas mais reduzidas favoreceu uma maior capacidade tração (Figura 4.6a). Isso ocorreu porque, na operação em marchas menos reduzidas, grande parte da potência disponível na barra de tração foi utilizada para que o trator pudesse trafegar em maiores velocidades. Além disso, observou-se que ao utilizar relações de transmissão mais baixas, houve maior possibilidade de a tração ser limitada pela potência disponibilizada pelo motor, mesmo em valores mais baixos de patinagem. Por meio da comparação entre as marchas 1A, 1B e 1C, observou-se que o uso de marchas com menores relações de transmissão resultou em um menor consumo específico de combustível (Figura 4.6b).

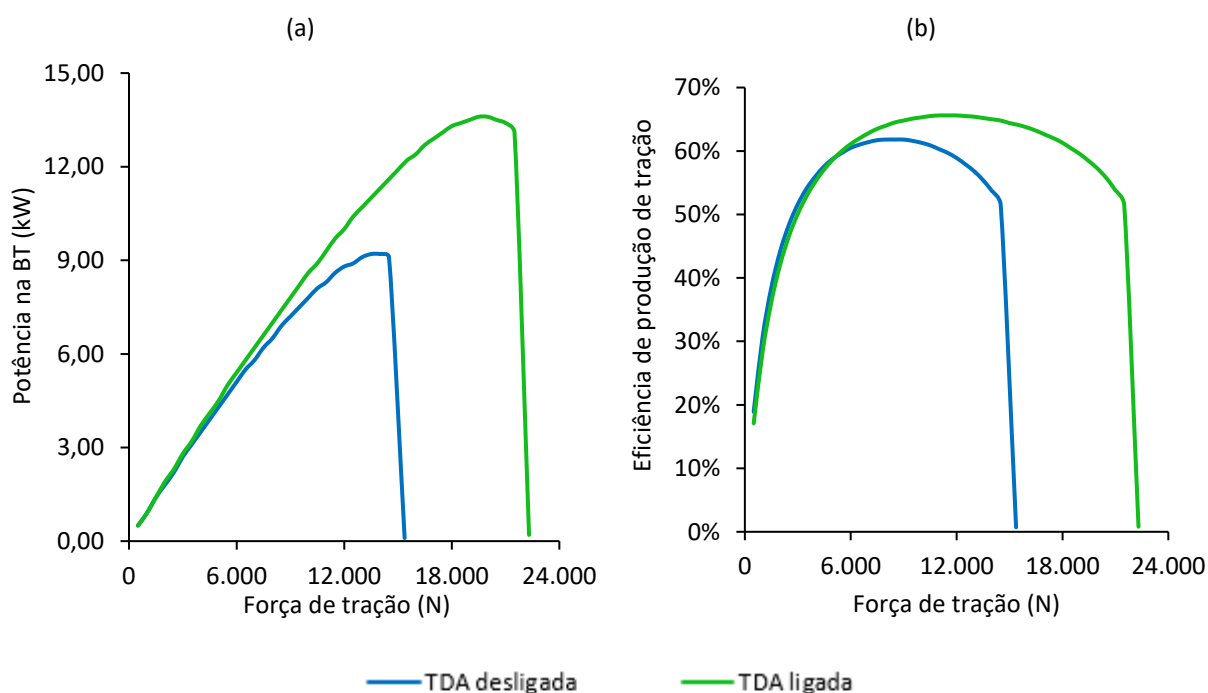
Figura 4.6 – Influência da relação de transmissão no desempenho do trator: (a) variação da velocidade de deslocamento e (b) do consumo específico de combustível (L/kWh) em função da força de tração



Fonte: O Autor.

A força máxima de tração produzida pelo trator aumentou, para todas as marchas, com o acionamento da TDA, sendo que esse aumento foi maior para as maiores relações de transmissão. O acionamento da TDA resultou em um aumento na força máxima de tração de 45,14% na marcha 1A. Ao analisar a operação do trator na marcha 2A, em ambas as configurações da TDA, constatou-se que a operação com a TDA desligada resultou em uma maior patinagem no rodado traseiro em comparação com a situação em que a TDA esteve ligada. A maior patinagem desenvolvida pelo rodado traseiro, considerando a TDA desligada, é justificada pela necessidade de compensar a falta do auxílio de tração do rodado dianteiro. Com isso, foi observado uma menor potência disponível na barra de tração (Figura 4.7a) e uma menor eficiência de produção de tração (Figura 4.7b), na simulação em que a esteve TDA desligada. Shafaei et al. (2018) também identificaram, por meio de ensaios de tração, que o acionamento da TDA resultou em um aumento da eficiência de produção de tração.

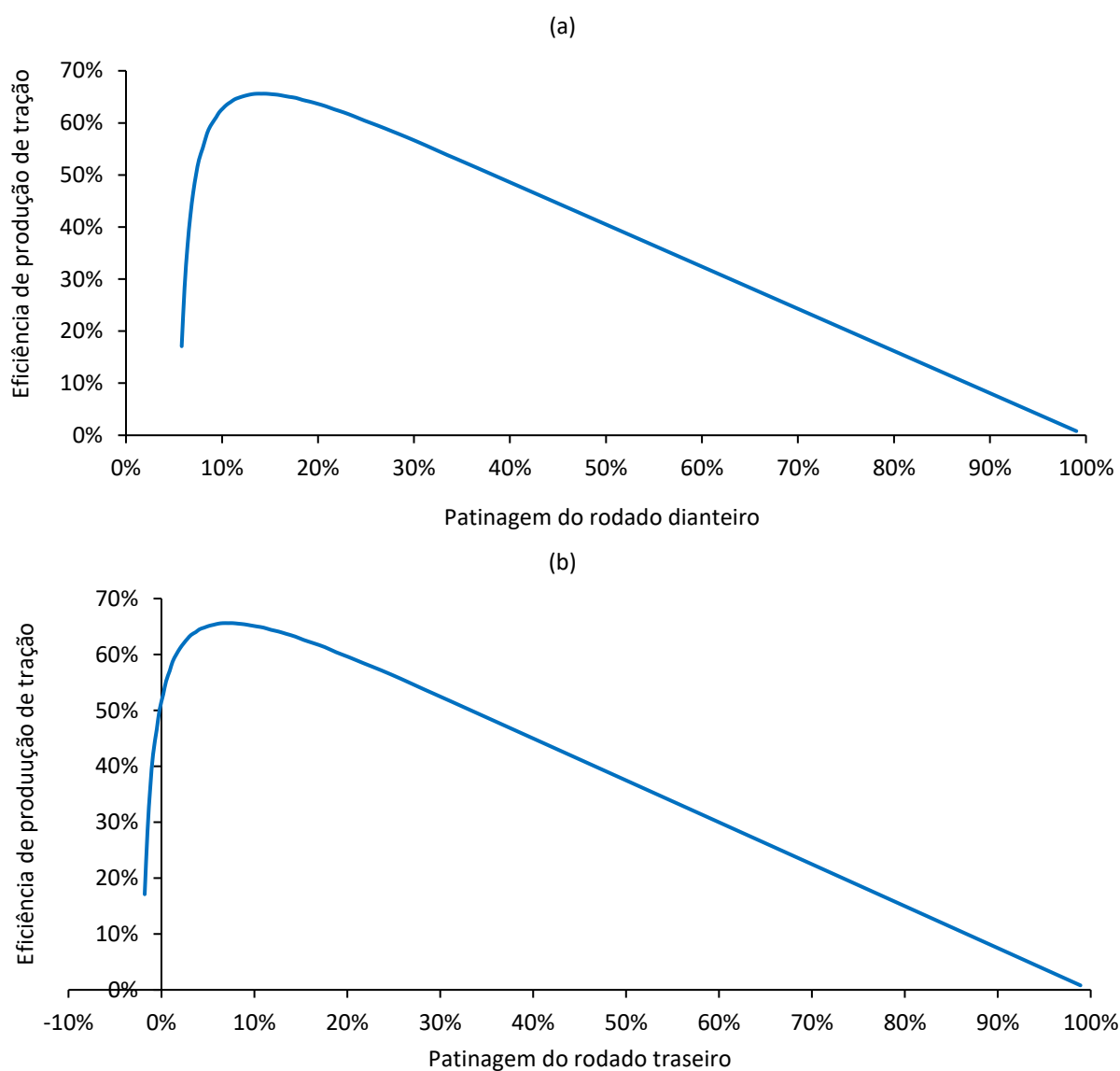
Figura 4.7 – Influência da tração dianteira auxiliar (TDA) no desempenho de tração do trator: (a) variação da potência na barra de tração e (b) da eficiência de produção de tração em função da força de tração



Fonte: O Autor.

Foi observado em todas as simulações que a eficiência de produção de tração aumentou com o crescimento da patinação, atingindo um ponto máximo e, posteriormente, diminuindo à medida que a patinação crescia. Ao avaliar a situação em que o trator foi simulado na marcha 2A, com a TDA acionada, foi observado que a maior eficiência de produção de tração ocorreu com 14,10% de patinação do rodado dianteiro (Figura 4.8a) e 7,20% de patinação do rodado traseiro (Figura 4.8b). Essa tendência foi corroborada experimentalmente por Roça et al. (2022).

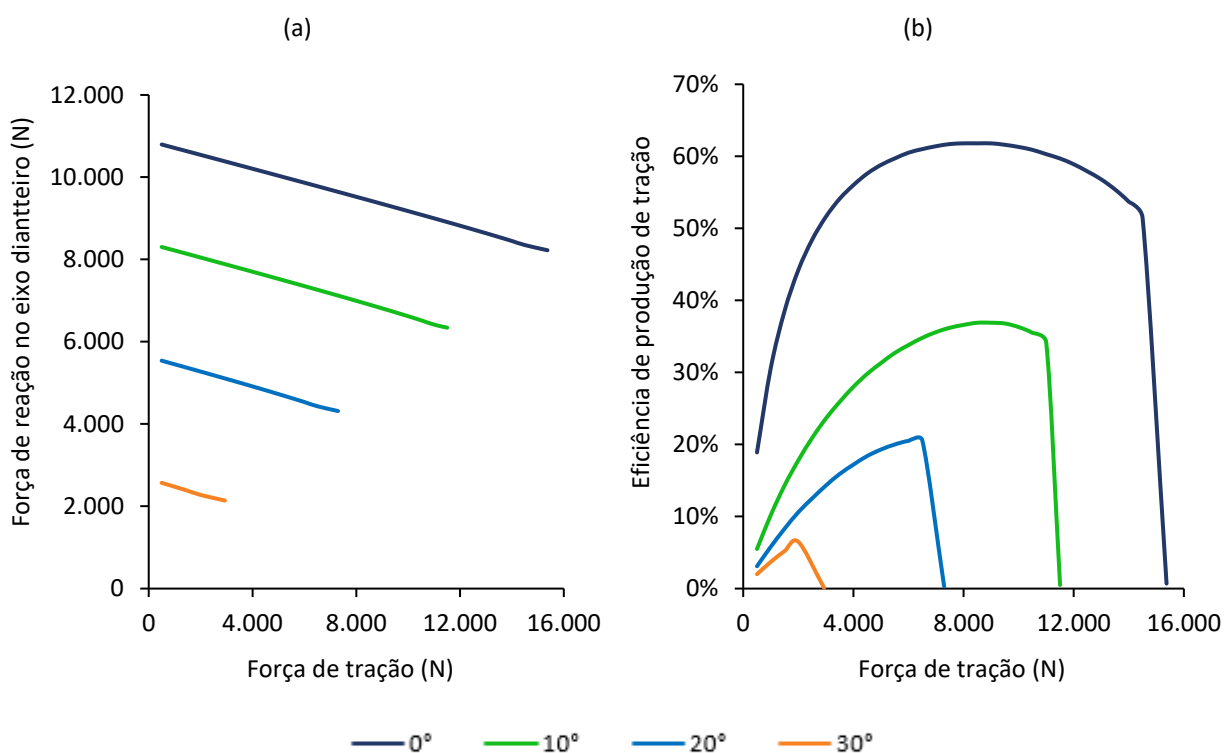
Figura 4.8 – Variação da eficiência de produção de tração em função da (a) patinação do rodado dianteiro e da (b) patinação do rodado traseiro



Fonte: O Autor.

A análise das simulações em superfícies com declividade indicou que o trator apresentou menor capacidade de tração conforme a inclinação da superfície aumentou. Além disso, foi identificado que a estabilidade longitudinal do trator foi um fator de risco nessas operações, já que a força de reação do eixo dianteiro diminuiu consideravelmente com o aumento da inclinação (Figura 4.9a). Na simulação em que a inclinação da superfície foi maior, a mínima força de reação no eixo dianteiro correspondeu a 7,48% do peso total do trator. Adicionalmente, a operação em superfícies com inclinações elevadas proporcionou um maior consumo específico de combustível e uma redução na eficiência de produção de tração (Figura 4.9b).

Figura 4.9 – Influência da inclinação da superfície no desempenho de tração do trator: (a) variação da força de reação no eixo dianteiro e (b) da eficiência de produção de tração em função da força de tração

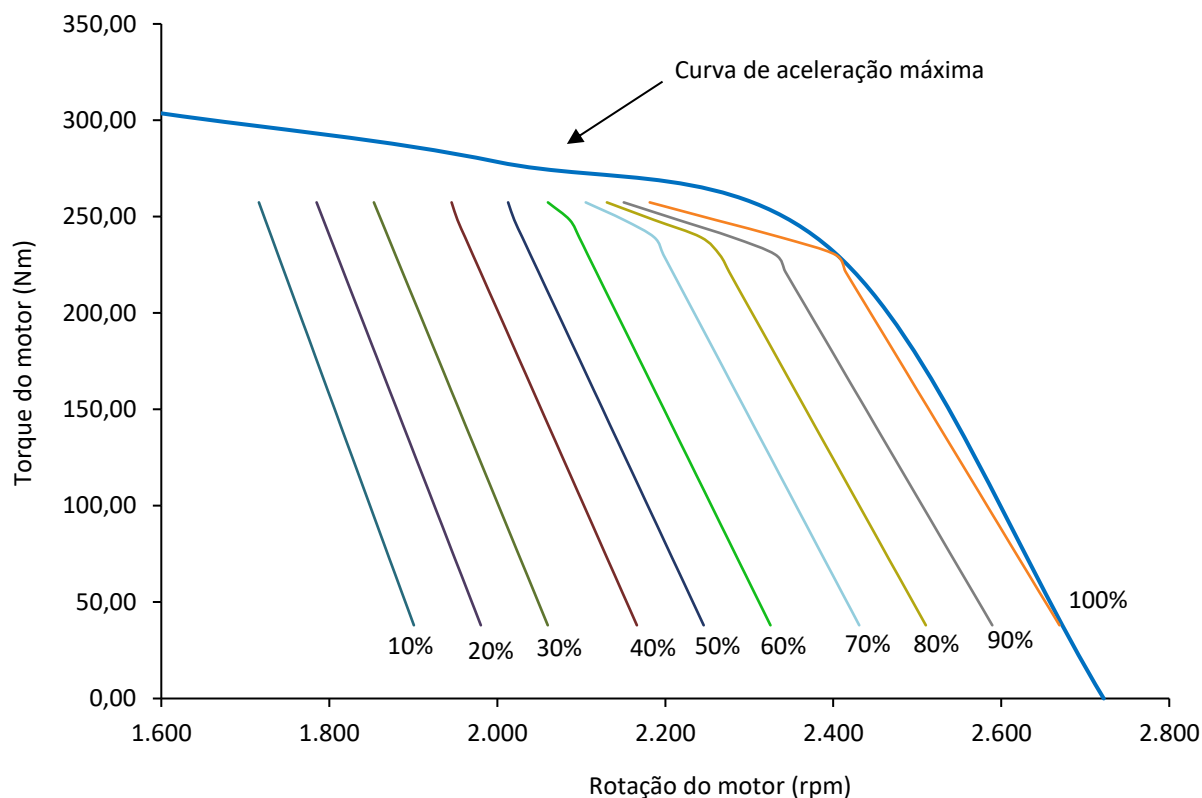


Fonte: O Autor.

A análise das simulações que consideraram a variação da posição da alavanca do acelerador indicou os possíveis pontos de operação do motor de acordo com o nível de aceleração (Figura 4.10). Constatou-se que à medida que a aceleração diminui a rotação do motor reduziu. Ainda assim foi possível operar em toda faixa de

torque que o motor tem capacidade de produzir. Foi verificado também que quanto menor a aceleração do motor menor foi a velocidade de deslocamento do trator.

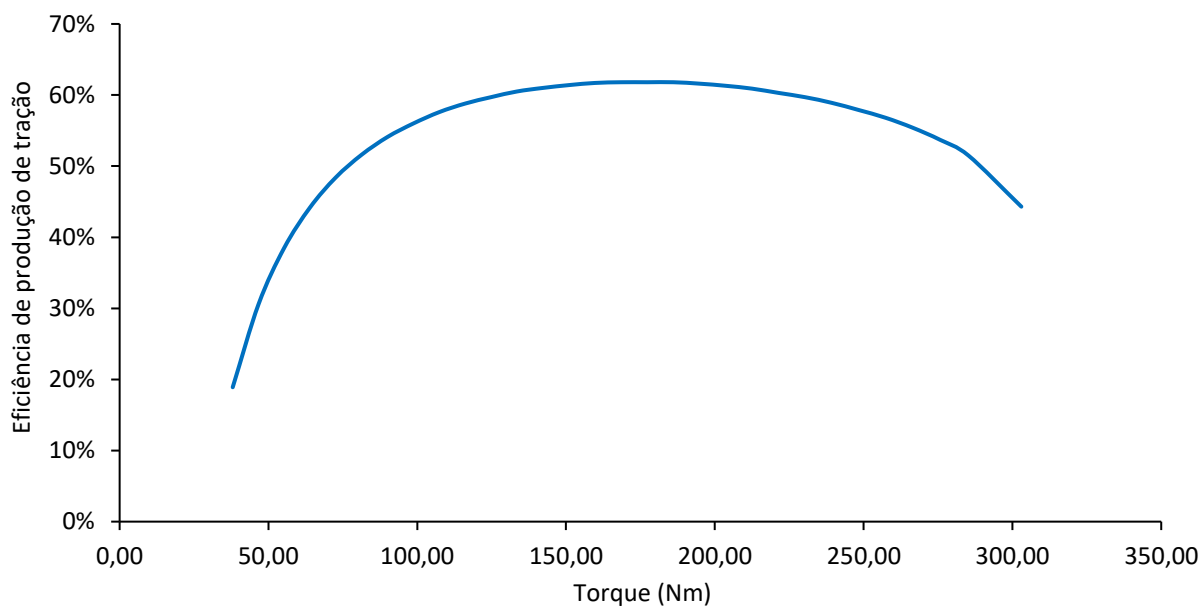
Figura 4.10 – Gráfico da rotação e o respectivo torque do motor de acordo com o nível de aceleração do motor



Fonte: O Autor.

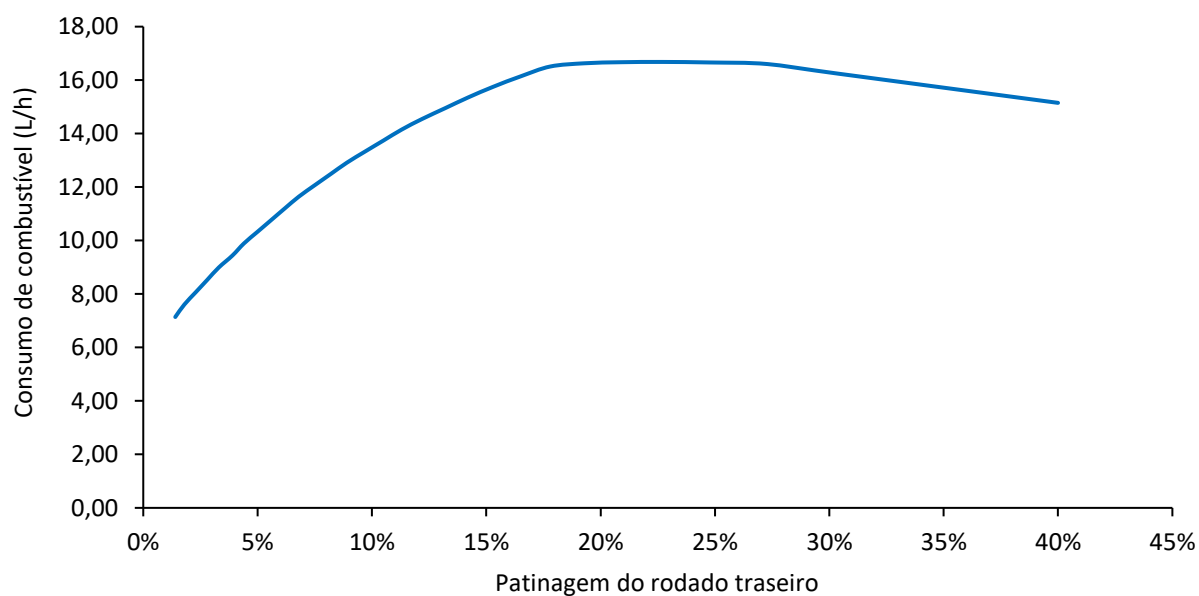
Ao analisar a simulação em que a aceleração foi máxima, na marcha 1C, observou-se que a eficiência de produção de tração cresceu com o aumento do torque. Próximo aos valores máximos, a eficiência apresentou uma pequena variação com o aumento do torque. Posteriormente, a eficiência foi reduzida à medida que o torque continuava a aumentar (Figura 4.11). Avaliando a mesma situação, constatou-se que o consumo horário de combustível aumentou proporcionalmente com a patinação, nas condições que a patinação foi baixa. Quando a patinação esteve na faixa entre 15% e 30%, o consumo horário de combustível apresentou pouca variação e atingiu os valores mais elevados. Depois disso, o consumo horário de combustível reduziu com o aumento da patinação (Figura 4.12).

Figura 4.11 – Variação da eficiência de produção de tração em função do torque do motor



Fonte: O Autor.

Figura 4.12 – Variação do consumo horário de combustível em função da patinagem das rodas motrizes



Fonte: O Autor.

4.6. CONCLUSÃO

Ao realizar as simulações computacionais, foi possível avaliar a operação do trator agrícola de rodas, considerando tanto o desempenho de tração quanto o consumo de combustível. Com base nos parâmetros estudados foi possível obter as seguintes conclusões:

- A lastragem do trator proporcionou aumento na capacidade de tração, redução do consumo específico de combustível e melhora na eficiência de produção de tração em valores mais elevados da força de tração;
- À medida que o índice de cone do solo aumentou, a capacidade de tração aumentou, bem como a eficiência de produção de tração;
- O uso de pneus radiais proporcionou uma redução da patinagem das rodas motrizes, aumentando a capacidade de tração e disponibilizando mais potência na barra de tração, em comparação ao uso de pneus diagonais;
- A escolha de maiores relações de transmissão resultou em aumento na capacidade de tração. O consumo específico de combustível diminuiu à medida que marchas menos reduzidas foram utilizadas;
- O acionamento da tração dianteira auxiliar proporcionou aumento na capacidade de tração, com a força máxima de tração aumentando 45,14% quando a TDA esteve ligada, na marcha mais reduzida. A eficiência de produção de tração aumentou com o acionamento da TDA;
- Em todas as situações analisadas, a eficiência de produção de tração aumentou proporcionalmente com a patinagem das rodas motrizes, atingindo um ponto máximo e, posteriormente, diminuindo conforme a patinagem continuou a aumentar;
- A eficiência de produção de tração foi reduzida conforme a inclinação da superfície aumentou. Nas condições em que a inclinação foi mais acentuada, a possibilidade de limitação da tração por perda de estabilidade longitudinal foi maior;
- Os pontos de operação do motor de acordo com o nível de aceleração foram identificados. A rotação do motor diminuiu à medida que o nível de aceleração foi menor;

- A eficiência de produção de tração aumentou proporcionalmente com o torque do motor, atingindo um ponto máximo e, posteriormente, diminuindo conforme o torque continuou a aumentar;
- O consumo horário de combustível aumentou proporcionalmente com a patinação das rodas motrizes, atingindo um ponto máximo e, posteriormente, diminuindo conforme a patinação continuou a aumentar.

4.7. REFERÊNCIAS

ASAE. ASAE D497.7 MAR2011 Agricultural Machinery Management Data. **Test**, v. 2011, p. 9, 2011.

ASHOK KUMAR, A. et al. A device to measure wheel slip to improve the fuel efficiency of off road vehicles. **Journal of Terramechanics**, v. 70, p. 1–11, abr. 2017.

GOERING et al. **Off-Road Vehicle Engineering Principles**. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2003.

GUPTA, C. et al. Automatic tractor slip-draft embedded control system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 165, p. 104947, 1 out. 2019.

HAN, J.; YAN, X.; TANG, H. Method of controlling tillage depth for agricultural tractors considering engine load characteristics. **Biosystems Engineering**, v. 227, n. 1961, p. 95–106, 2023.

KUMAR, R.; PANDEY, K. P. A program in Visual Basic for predicting haulage and field performance of 2WD tractors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 67, n. 1–2, p. 18–26, jun. 2009.

KUMAR, S. et al. Effect of ballasting on performance characteristics of bias and radial ply tyres with zero sinkage. **Measurement**, v. 121, p. 218–224, jun. 2018.

KUMAR, S.; NOORI, M. T.; PANDEY, K. P. Performance characteristics of mode of ballast on energy efficiency indices of agricultural tyre in different terrain condition in controlled soil bin environment. **Energy**, v. 182, p. 48–56, set. 2019.

LEE, J. W.; KIM, J. S.; KIM, K. U. Computer simulations to maximise fuel efficiency and work performance of agricultural tractors in rotovating and ploughing operations. **Biosystems Engineering**, v. 142, p. 1–11, fev. 2016.

MOINFAR, A. et al. The effect of the tractor driving system on its performance and fuel consumption. **Energy**, v. 202, p. 117803, jul. 2020.

REGAZZI, N.; MARALDI, M.; MOLARI, G. A theoretical study of the parameters affecting the power delivery efficiency of an agricultural tractor. **Biosystems Engineering**, v. 186, p. 214–227, out. 2019.

ROŞCA, R. et al. The Improvement of a Traction Model for Agricultural Tire–Soil Interaction. **Agriculture (Switzerland)**, v. 12, n. 12, 2022.

SAHAY, C. S.; TEWARI, V. K. Computer simulation of tractor single-point drawbar performance. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 4, p. 419–428, 2004.

SHAF AEI, S. M.; LOGHAVI, M.; KAMGAR, S. An extensive validation of computer simulation frameworks for neural prognostication of tractor tractive efficiency. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, n. August, p. 283–297, dez. 2018.

SHAF AEI, S. M.; LOGHAVI, M.; KAMGAR, S. Analytical Description of Power Delivery Efficiency of Front Wheel Assist Tractor in Tillage Works. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 46, n. 3, p. 236–253, 2021a.

SHAF AEI, S. M.; LOGHAVI, M.; KAMGAR, S. Fundamental realization of longitudinal slip efficiency of tractor wheels in a tillage practice. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104765, jan. 2021b.

ZOZ, F. M.; GRISSO, R. **Traction and Tractor Performance**. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, 2003.

CAPÍTULO V – CONCLUSÃO GERAIS

Foi desenvolvido um programa de computador com modelos matemáticos. O programa de computador forneceu informações relacionadas à capacidade de tração de tratores de rodas com base nas condições de operação. Além disso, foram obtidos dados relacionados à operação do motor e ao consumo de combustível. Essa ferramenta revelou potencial em oferecer suporte a pesquisadores e fabricantes na busca por soluções que otimizem o desempenho de tratores, bem como em auxiliar produtores a selecionar melhores condições de operação, visando alcançar maior eficiência para essas máquinas. Adicionalmente, destaca-se a aplicação didática do programa de computador desenvolvido, tendo considerável potencial de ser incorporado em disciplinas que abordem conteúdos relacionados a esse tema.

No segundo capítulo, foi apresentado o desenvolvimento e validação de um programa de computador para simular a capacidade de tração de tratores de rodas. As equações de um modelo matemático foram implementadas em linguagem Python versão 3.9 para desenvolvimento do programa de computador. A análise estatística, por meio de teste de hipóteses, assegurou a equivalência entre resultados simulados e experimentais. O sistema embarcado desenvolvido possibilitou a coleta de dados em ensaios de tração. Com base nos ensaios e nas simulações, constatou-se, que a patinagem das rodas motrizes aumentou de forma não linear com o incremento da força de tração até atingir um valor limite. Após isso, a patinagem começou a aumentar mesmo que a variação da força de tração fosse pouco pronunciada. Observou-se que o trator necessitou desenvolver maior patinagem para tracionar cargas com magnitudes semelhantes, conforme o índice de cone do solo diminuiu.

No terceiro capítulo, apresentou-se o desenvolvimento e validação de um programa de computador para calcular o consumo de combustível em tratores com motor por ignição por compressão, alimentados por diesel. Para isso, as equações para cálculo do consumo de combustível foram implementadas em linguagem Python versão 3.9. Com o intuito de validar o programa, foram realizados ensaios de tração com o auxílio do sistema embarcado. Com a aplicação dos testes estatísticos, foi verificada a igualdade entre os dados simulados e experimentais para o regime de aceleração máxima. Para os níveis de aceleração mínima e média, constatou-se uma tendência de superestimação do consumo de combustível por parte do programa. Nos ensaios de tração e nas simulações computacionais, foi evidenciado que o consumo

horário de combustível aumentou à medida a força de tração era incrementada. Os menores valores para o consumo específico de combustível foram observados em situações nas quais a rotação do motor foi reduzida e o torque aumentou.

O desempenho de tração e o consumo de combustível de um trator de rodas foi avaliado no quarto capítulo. Utilizou-se o programa de computador que simula a capacidade de tração integrado com a análise energética de consumo de combustível. Em 91,38% das simulações computacionais realizadas, a patinação das rodas motrizes limitou a força máxima de tração. O torque disponibilizado pelo motor limitou a força de tração quando as menores relações de transmissão foram utilizadas. Em nenhum dos casos a força de tração foi limitada pela perda de estabilidade longitudinal do trator. Na simulação em que a inclinação da superfície foi maior, observou-se que a menor força de reação no eixo dianteiro correspondeu a 7,48% do peso total do trator. Essa condição foi a que apresentou maior potencial para perda de estabilidade longitudinal. Em todas as simulações, a maior eficiência de produção de tração do trator foi 68,30%.

APÊNDICE A – PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRAÇÃO E DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Figura 1A – Tela para entrada de dados relacionados aos eixos dianteiro e traseiro do trator

The screenshot shows the 'Traction' software window with the 'EIXOS DIANTEIRO E TRASEIRO' tab selected. The interface is divided into two sections: 'Características do eixo dianteiro' and 'Características do eixo traseiro'. Each section contains a dropdown menu for 'Tipo de pneu' (set to 'DIAGONAL') and several input fields for numerical values. On the right side, there are two buttons: 'Limpar Dados' and 'Confirmar Dados'.

Características do eixo dianteiro	
Tipo de pneu:	DIAGONAL
Número de pneus no eixo:	2
Largura do pneu (m):	0.315
Diâmetro nominal do aro (m):	0.610
Diâmetro do pneu indeformado (m):	1.164
Raio de rolamento da roda (m):	0.568
Lastragem do eixo (kg):	0.000

Características do eixo traseiro	
Tipo de pneu:	DIAGONAL
Número de pneus no eixo:	2
Largura do pneu (m):	0.467
Diâmetro nominal do aro (m):	0.762
Diâmetro do pneu indeformado (m):	1.552
Raio de rolamento da roda (m):	0.758
Lastragem do eixo (kg):	0.000

Figura 2A – Tela para entrada de dados relacionados às características do trator e de condições operacionais

The screenshot shows the 'Traction' software window with the 'EIXOS DIANTEIRO E TRASEIRO' tab selected. The interface is divided into two sections: 'Características gerais do trator' and 'Outros dados gerais'. Each section contains several input fields for numerical values. On the right side, there are two buttons: 'Limpar Dados' and 'Confirmar Dados'.

Características gerais do trator	
Peso do trator sem lastros (N):	28596.05
Distância entre centro dos rodados (m):	2.600
Posição horizontal do centro de gravidade do trator (m):	0.878
Posição vertical do centro de gravidade do trator (m):	0.255
Distância horizontal entre a barra de tração e o centro da roda traseira (m):	0.700
Distância vertical entre a barra de tração e o centro da roda traseira (m):	0.400

Outros dados gerais	
Índice de cone do solo (kN/m ²):	1000.0
Ângulo de inclinação da superfície do solo (graus):	0.0
Ângulo de aplicação da força na barra de tração (graus):	0.0
Incremento de força aplicada na barra de tração (N):	500.0

Figura 3A – Tela para entrada de dados do motor e do sistema de transmissão de potência

The screenshot shows the 'MOTOR E TRANSMISSÃO' tab in the Traction software. It contains two main sections: 'Torque versus rotação do motor' and 'Outros dados sobre transmissão de potência'.

Torque versus rotação do motor

Rotação máxima (rpm):	2722.0	Torque na rotação nominal (N m):	232.01
Rotação nominal (rpm):	2400.0	Torque no regime de potência máxima (N m):	278.41
Rotação no regime de potência máxima (rpm):	2000.0	Torque máximo (N m):	303.60
Rotação no regime de torque máximo (rpm):	1600.0		

Outros dados sobre transmissão de potência

Tipo de sistema de transmissão: MANUAL

Velocidade de deslocamento máxima (km/h): 40

Velocidade de deslocamento referência (km/h): 0.1

Eficiência do sistema de transmissão de potência (decimal): 0.85

Relação de transmissão entre o motor e o eixo dianteiro: 161.02

Relação de transmissão entre o motor e o eixo traseiro: 232.16

Condição da tração dianteira (ligada/desligada): DESLIGADA

Posição do acelerador (%): 100

Redução da rotação em relação à rotação para o acelerador em 100%: 0 %

Buttons: Limpar Dados, Confirmar Dados

Figura 4A – Tela para executar uma simulação com apresentação dos resultados em tabela

The screenshot shows the 'EXECUTA' tab in the Traction software, displaying simulation results in a table. The table has 14 columns: P, Rf, sf, sr, Te, Ne, Fe, va, Pbt, Ept, Pwt, Q. The results are shown for 12 different simulation steps (0 to 11).

Nome da simulação: Simulação 1

Executar a Simulação

	P	Rf	sf	sr	Te	Ne	Fe	va	Pbt	Ept	Pwt	Q
0	500	9124.35	0	0.012	8.5	2710.2	2.4	3.3	0.5	0.189	0.017	5.52
1	1000	9053.2	0	0.016	10.5	2707.5	3	3.28	0.9	0.307	0.035	5.63
2	1500	8981.96	0	0.021	12.4	2704.8	3.5	3.26	1.4	0.386	0.052	5.74
3	2000	8910.65	0	0.025	14.4	2702.1	4.1	3.24	1.8	0.443	0.07	5.84
4	2500	8839.25	0	0.03	16.3	2699.3	4.6	3.22	2.2	0.485	0.087	5.95
5	3000	8767.76	0	0.035	18.3	2696.6	5.2	3.2	2.7	0.517	0.105	6.06
6	3500	8696.18	0	0.04	20.2	2693.9	5.7	3.18	3.1	0.543	0.122	6.17
7	4000	8624.51	0	0.045	22.2	2691.2	6.3	3.16	3.5	0.562	0.14	6.28
8	4500	8552.72	0	0.05	24.1	2688.5	6.8	3.14	3.9	0.578	0.157	6.38
9	5000	8480.82	0	0.056	26.1	2685.8	7.3	3.12	4.3	0.591	0.175	6.49
10	5500	8408.8	0	0.061	28	2683.1	7.9	3.1	4.7	0.601	0.192	6.6
11	6000	8336.65	0	0.067	30	2680.4	8.4	3.08	5.1	0.609	0.21	6.71

Figura 5A – Tela de apresentação dos resultados em forma gráfica

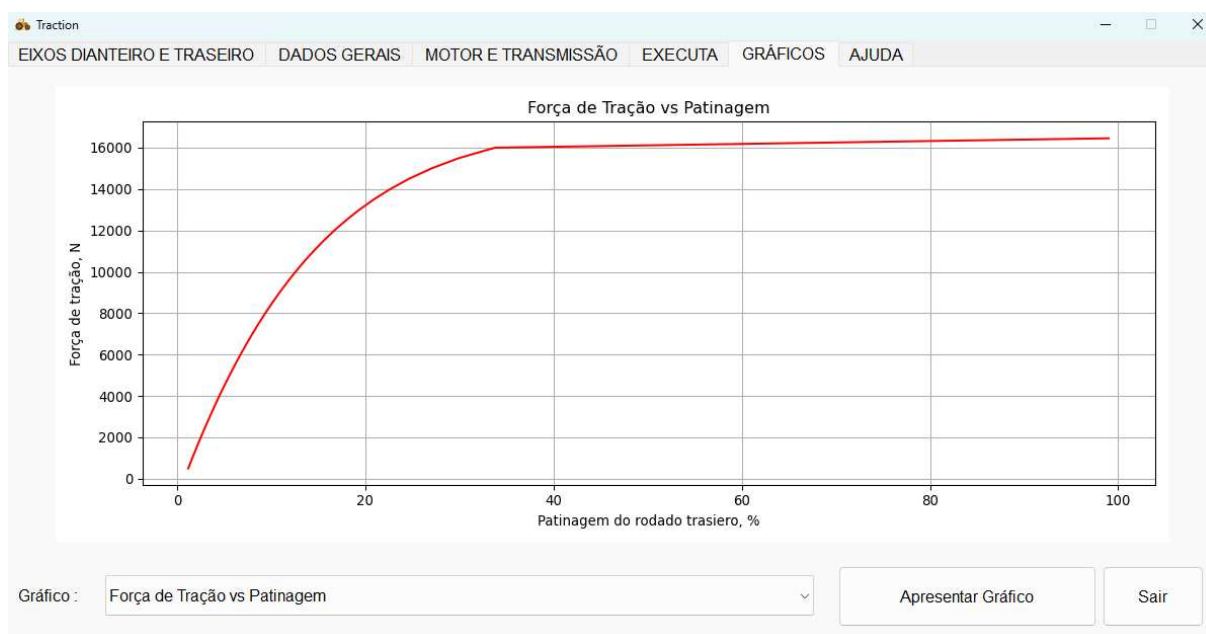
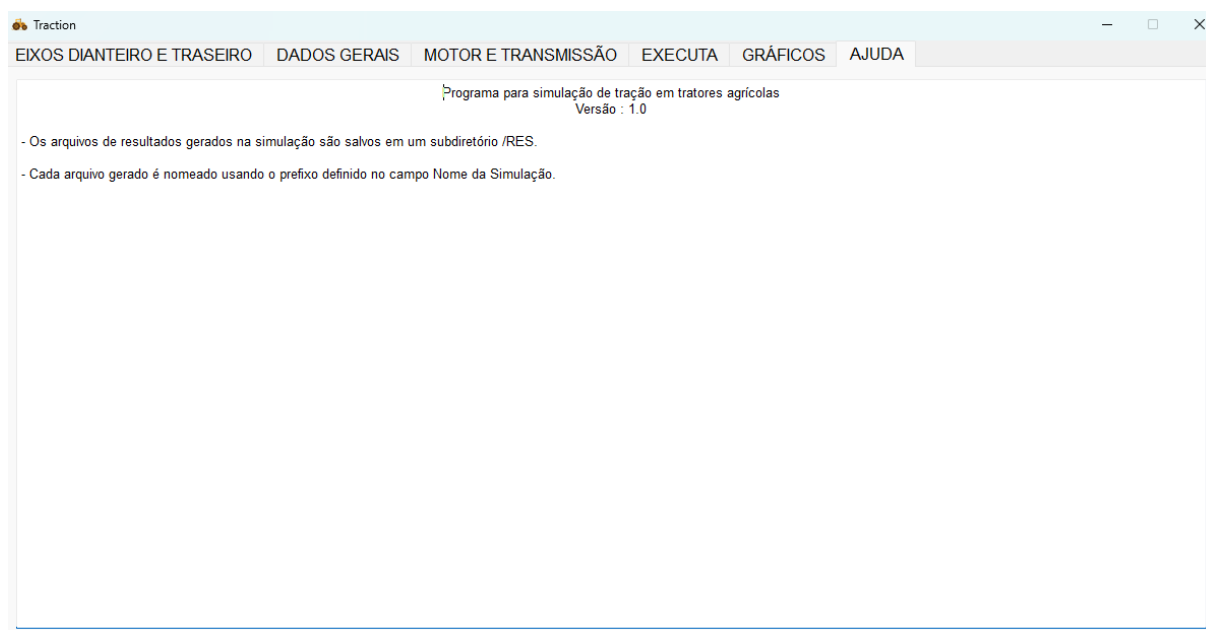


Figura 6A – Tela de apresentação de ajuda ao usuário



APÊNDICE B – APLICATIVO PARA VISUALIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS DO SISTEMA EMBARCADO

Figura 1B – Tela do aplicativo para visualização e armazenamento de dados do sistema embarcado

