

GIUSEPPE EUGÊNIO PERUZO IACONO

**DESEMPENHO DO MOTOR DE UM TRATOR AGRÍCOLA
UTILIZANDO MISTURAS DIESEL-BIODIESEL-ETANOL**

**CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2017**

GIUSEPPE EUGÊNIO PERUZO IACONO

**DESEMPENHO DO MOTOR DE UM TRATOR AGRÍCOLA
UTILIZANDO MISTURAS DIESEL-BIODIESEL-ETANOL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura para obtenção do título de Mestre.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio Gurgacz
COORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

**CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2017**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada por Rosângela A. A. Silva – CRB 9º/1810

I12d Iacono, Giuseppe Eugênio Peruzo
Desempenho do motor de um trator agrícola utilizando misturas diesel-
biodiesel-etanol. / Giuseppe Eugênio Peruzo Iacono. — Cascavel – PR:
UNIOESTE, 2017. — 98 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Gurgacz
Coorientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná,
Campus de Cascavel, 2017
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na
Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Máquinas agrícolas. 3. Desempenho.
4. Gases. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

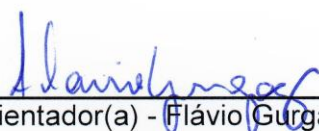
CDD 20.ed. 621.47

Revisão de língua inglesa e portuguesa e das normas de edição conforme requisitos do PPGEA:
Prof. Dra. Alcione Tereza Corbari.

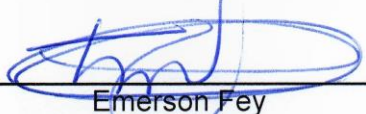
GIUSEPPE EUGÊNIO PERUZO IACONO

Desempenho do motor de um trator agrícola utilizando misturas
diesel-biodiesel-etanol

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biomassa e Culturas Energéticas, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:


Orientador(a) - Flávio Gurgacz

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Emerson Fey

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon
(UNIOESTE)


Luís Fernando Souza Gomes

Universidade Federal do Paraná - Campus de Palotina (UFPR)

Cascavel, 24 de fevereiro de 2017

*Dedico este trabalho à minha mãe, que nunca
mediu esforços para formar seus filhos como
seres humanos melhores para o mundo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente pelo dom da vida e por tudo aquilo que já recebi até hoje dela através da obra do nosso Senhor Supremo.

À minha mãe Jane Peruzo Iacono, meus irmãos Luigi Bruno Peruzo Iacono e Sociarai Peruzo Iacono Bahl, e minha namorada, Débora Bavaresco, pelo carinho, orações, e toda ajuda necessária para conclusão desta obra.

Aos meus entes queridos que já partiram desta vida, mas deixaram seu legado para que eu pudesse chegar onde cheguei. Meu pai Jair Iacono e meus avós Eugênio Iacono, Santo Peruzo e Maria Politi Peruzo.

Ao meu professor orientador e agora amigo, Flávio Gurgacz, que com toda sua disposição e paciência me ensinou o possível para conclusão deste trabalho.

Ao amigo Felipe Klajn que com muita paciência me ajudou, mesmo após ter se mudado para a Espanha.

Ao fomento fornecido pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) para realização deste trabalho.

À todos os professores do programa que de alguma forma contribuíram para minha formação e para a conclusão deste trabalho.

À secretária do programa Vanderléia L. S. Schmidt pelas boas conversas e pela presteza sempre que necessário.

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.

José de Alencar

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

4T – Quatro Tempos
ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
B% – Porcentagem de biodiesel (0-100%) numa mistura binária com diesel
bar – Pressão barométrica
CI – Compression Ignition
CNPE – Conselho Nacional de Política Energética
CO – Monóxido de Carbono
CO₂ – Dióxido de carbono
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP – Conference of the Parties
CSC – Capacidade de Sustentação do Conjugado
E% - Porcentagem de etanol anidro na mistura
GEE – Gases de Efeito Estufa
HC – Hidrocarbonetos
ICO – Ignição por Compressão
IE – Índice de Elasticidade
kJ – Quilo-Joules
kW – Quilo-Watts
LAMA – Laboratório de Máquinas Agrícolas
MME – Ministério de Minas e Energia
MP – Material particulado
NO_x – Óxidos de Nitrogênio
O₂ – Gás Oxigênio
PCI – Poder calorífico inferior
PCS – Poder calorífico superior
PMI – Ponto Morto Inferior
PMS – Ponto Morto Superior
PNMC - Política Nacional sobre Mudança do Clima
PPM – Partes por milhão
PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
SO_x – Óxidos de enxofre
TDA – Tração Dianteira Auxiliar
TDP – Tomada de Potência
UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change
UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tratores de roda comercializados no Brasil nos últimos 16 anos	4
Figura 2 - Ilustração de um Dinamômetro de Correntes de Foucault. 1. Rotores; 2. Bobinas; 3. Célula de carga; 4. Eixo estriado; 5. Eixo-árvore ou Eixo-Cardã; 6. Tomada de potência do trator.	6
Figura 3 - Diagrama de perdas de potência nos sistemas de um trator.	8
Figura 4 - Curvas características de desempenho do motor e principais pontos do funcionamento a plena carga.	9
Figura 5 - Os quatro tempos de um motor de ignição por compressão.....	11
Figura 6 - Distribuição do consumo de combustíveis pela matriz veicular brasileira, ano base 2015.....	15
Figura 7 - Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel (B100).	17
Figura 8 - Configuração do ensaio.	24
Figura 9 - Trator Ford/New Holland modelo 7630 utilizado para os ensaios.	25
Figura 10 - Dinamômetro EGGERS, modelo PT170.	27
Figura 11 - Tela de visualização de dados do Software EGGERS PowerControl® v2.1.	28
Figura 12 - Equipamentos complementares: (A) Termo-higro-barômetro; (B) Tacômetro digital.	29
Figura 13 - Fluxômetro EGGERS modelo FM3-100.....	32
Figura 14 - Fluxograma do sistema de medição.	33
Figura 15 - (A) Calorímetro e2k para medição do Poder Calorífico Superior; (B) Cadinho metálico e fio de algodão (fio de ignição) preso à resistência.	34
Figura 16 - Analisador de combustão portátil Bacharach PCA3-285.	36
Figura 17 - Pontos da curva de torque para medição das emissões de gases do motor.	37
Figura 18 - Combustíveis sem etanol (B0E0, B7E0, B10E0, B15E0 e B20E0).	41
Figura 19 - Combustíveis com 1% de etanol (B7E1, B10E1, B15E1 e B20E1).....	41
Figura 20 - Combustíveis com 3% de etanol (B7E3, B10E3, B15E3 e B20E3).....	42
Figura 21 - Combustíveis com 5% de etanol (B7E5, B10E5, B15E5 e B20E5).....	42
Figura 22 - Curvas de desempenho do trator ensaiado utilizando B0E0 (diesel puro).	44
Figura 23 - Valor médio de potência máxima em cada um dos tratamentos.....	46

Figura 24 - Potência máxima dos tratamentos B07E0, B10E0, B15E0 e B20E0.	46
Figura 25 - Tendência dos valores de torque máximo para: (a) observação dos valores variando as frações de etanol; (b) observação dos valores variando as frações de biodiesel.	48
Figura 26 - Consumo específico mínimo e máxima eficiência térmica para cada tratamento.	52
Figura 27 - Eficiência térmica com o incremento de biodiesel e etanol nas misturas.	53
Figura 28 - Variação de O ₂ nos fatores biodiesel e etanol para as 5 (cinco) cargas aplicadas.	57
Figura 29 - Decréscimo da % vol. de O ₂ excedente no analisador de combustão.	57
Figura 30 - Comportamento das emissões de NO _x (ppm) em cada carga. (a) observação dos valores variando as frações de etanol; (b) observação dos valores variando as frações de biodiesel.	59
Figura 31 - Aumento na % vol. de CO ₂ com aumento da carga aplicada.	62
Figura 32 - Emissões de CO para a Carga 1 em cada porcentagem diesel-biodiesel.	64
Figura 33 - Variação da temperatura de exaustão nos fatores biodiesel e etanol para as 5 (cinco) cargas aplicadas.	65
Figura 34 - Comportamento da temperatura dos gases de exaustão com a diminuição da carga.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução da demanda de combustíveis líquidos por setor (mil tep*)	15
Tabela 2 - Vendas internas de combustíveis, ano base 2015	16
Tabela 3 - Dados técnicos do motor do trator ensaiado	25
Tabela 4 - Composição das frações de combustível nas misturas ensaiadas	26
Tabela 5 - Dados técnicos do Termo-higro-barômetro GREISINGER GFTB-100.....	29
Tabela 6 - Dados técnicos do tacômetro Peaktech 2790	30
Tabela 7 - Dados técnicos do medidor de combustão Bacharach PCA3-285	35
Tabela 8 - Variação das condições do ambiente durante os ensaios	39
Tabela 9 - Valores absolutos medidos da massa específica (kg m^{-3})	40
Tabela 10 - PCI médio (MJ kg^{-1}) da variação das frações de biodiesel no etanol à esquerda e das frações de etanol no biodiesel à direita	43
Tabela 11 - Potência máxima média (kW) da variação das frações de biodiesel no etanol à esquerda e das frações de etanol no biodiesel à direita.....	45
Tabela 12 - Rotação de potência máxima (rpm)	47
Tabela 13 - Torque máximo (N m) e rotação de torque máximo (rpm)	47
Tabela 14 - Consumo específico mínimo ($\text{g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	50
Tabela 15 - Consumo horário médio para a variação das frações de biodiesel no etanol à esquerda e das frações de etanol no biodiesel à direita	51
Tabela 16 - Eficiência térmica (%) para os tratamentos avaliados.....	53
Tabela 17 - Índices e parâmetros de desempenho em cada tratamento	55
Tabela 18 - Valores da concentração de O_2 (%vol.) nas cargas aplicadas	56
Tabela 19 - Valores de NO_x (ppm) mensurados nos ensaios de emissões	58
Tabela 20 - Valores da concentração de CO_2 (% vol.) nas cargas aplicadas	61
Tabela 21 - Valores de CO [ppm] mensurados nos ensaios de emissões	63
Tabela 22 - Temperatura dos gases de exaustão para as cargas aplicadas	66

IACONO, Giuseppe Eugênio Peruzo. Me. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro de 2017. **Desempenho do motor de um trator agrícola utilizando misturas diesel-biodiesel-etanol**. Professor Orientador: Dr. Flávio Gurgacz.

RESUMO

O grande desafio que se apresenta para o mercado de combustíveis atualmente é encontrar novas alternativas energéticas, especialmente para os motores movidos a diesel, uma vez que estes representam quase a metade da frota nacional e internacional, representados em sua maioria pelos meios de transporte. Nesse contexto, o intuito desta pesquisa foi avaliar o desempenho do motor de um trator agrícola empregado em tarefas de campo utilizando como combustíveis: diesel puro A-S500, misturas binárias (diesel-biodiesel) e ternárias (diesel-biodiesel-etanol). O desempenho mecânico do trator foi medido por um dinamômetro de correntes de Foucault acoplado à tomada de potência; as emissões de gases foram mensuradas por um analisador de combustão; e o poder calorífico superior foi medido por um calorímetro isotérmico. As proporções binárias diesel-biodiesel propostas (B7, B10, B15 e B20) foram fundamentadas na Lei nº 13.263/2016 e na Resolução CNPE nº 3/2015. Essas misturas binárias foram avaliadas sem etanol (E0) e nas proporções de 1%, 3%, e 5% de etanol anidro (99,6% de pureza). Os ensaios dinamométricos tiveram quatro repetições; as medições de poder calorífico foram realizadas em triplicata; e as medições de emissões foram coletadas uma única vez para cada tratamento. Os resultados demonstram que os valores de poder calorífico decresceram com a adição tanto de etanol quanto de biodiesel. A potência se manteve estável com a adição de biodiesel, mas diminuiu com a adição de etanol para todas as misturas. Nas misturas sem etanol, houve aumento da potência com o incremento do biodiesel. Os valores de torque reduziram com a adição de etanol às misturas. Comparados ao B7E0 (diesel comercial), os decréscimos de torque variaram para um mínimo de 0,5% em B20E0 ao decréscimo máximo de 4,2% em B7E5 e B20E5. O consumo específico aumentou com a adição de biodiesel e etanol, com influência ligeiramente maior do biodiesel neste aumento. A eficiência térmica aumentou com a adição de etanol, com destaque para o tratamento B15E5 com eficiência acima de 40%. A reserva de torque para 6 dos 17 combustíveis avaliados ficou na faixa de desempenho considerada regular; os outros 11 foram considerados ruins. As análises de emissões mostraram que a presença de O_2 nas emissões de gases diminuiu com o aumento da carga aplicada. Comportamento inverso ocorreu com CO_2 , que aumentou com o acréscimo da carga. O biodiesel provocou um pequeno aumento nas emissões de NO_x em algumas misturas, principalmente em cargas mais altas. Já o etanol, causou decréscimo desse gás em todos os tratamentos. Foi verificado que a adição de biodiesel e etanol reduziu a emissão de CO à plena carga, sendo que o etanol tem efeito mais contundente. Para cargas baixas e médias, os valores de CO foram considerados irrisórios. A temperatura dos gases de exaustão aumentou com o acréscimo da carga. Todavia, a adição de combustíveis oxigenados não produziu nenhum efeito na temperatura dos gases.

Palavras-chave: Máquinas agrícolas. Desempenho. Emissões de gases.

IACONO, Giuseppe Eugênio Peruzo. Me. State University of West Paraná, February, 2017. **Performance of a tractor engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends**. Teacher Coordinating: Dr. Flávio Gurgacz.

ABSTRACT

The great challenge presented to the fuel market nowadays, is to find new energy alternatives, especially for diesel engines, since they represent almost the half of the national and international fleet, mostly transport means. Therefore, the aim of this research is evaluating the engine performance of an agricultural tractor used in ordinary field tasks, fueled with pure diesel A-S500, binary blends (diesel-biodiesel) and ternary blends (diesel-biodiesel-ethanol). The mechanical performance of the tractor was measured by an Eddy Current Dynamometer coupled to the tractor's PTO, the gas emissions were measured by a combustion analyzer, and the high calorific value, measured by a calorimeter. The proposed diesel-biodiesel binary proportions (B7, B10, B15 and B20) were based on Law 13.263/2016 and the CNPE Resolution N.3/2015. These binary blends were evaluated without ethanol (E0) and in proportions of 1%, 3%, and 5% of anhydrous ethanol (99.6% purity). The dynamometric tests had four replicates, as calorific measurements were performed in triplicate and emission measurements were collected only once for each treatment. The results demonstrate that the calorific values decreased with the addition of ethanol and biodiesel. Power output remained stable with the addition of biodiesel, but decreased with the ethanol addition to all mixtures. In blends without ethanol, the power output increased with increasing biodiesel. Torque values decreased with the addition of ethanol to the mixtures. Compared to the B7E0 (commercial diesel), the decreases of Torque varied between 0.5% in B20E0 and 4.2% in B7E5 and B20E5. Brake specific consumption increased with the addition of biodiesel and ethanol, with slightly higher biodiesel influence in this increase. The thermal efficiency increased with the addition of ethanol, with emphasis on the B15E5 treatment that reached over 40% efficiency. The torque back up for six of the seventeen fuels stayed in the range considered regular, the other eleven had the performance on the range considered poor. The emission analysis showed that the amount of O₂ in gas emissions decreased with the increase of the applied load. Reverse behavior occurred with CO₂, which increased with increasing load. Biodiesel caused a small increase in NO_x emissions in some blends, especially at high loads. On the other hand, ethanol caused a decrease of this gas in all treatments. It was verified that the addition of biodiesel and ethanol reduced CO emission at full load, with ethanol having a stronger effect. For low and medium loads, CO values were considered to be negligible. The temperature of the exhaust gases increased with increasing charge. However, the addition of oxygenated fuels had no effect on the temperature of the gases.

Key-words: Agricultural machinery. Performance. Gas emissions.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Tratores agrícolas e seu desempenho	4
2.1.1	Pontos de interesse	8
2.1.2	Índices e parâmetros de desempenho	10
2.2	Motores ciclo diesel ICO (ignição por compressão)	10
2.2.1	Sistemas de injeção em motores diesel	12
2.3	Combustíveis	13
2.3.1	Panorama nacional do diesel	13
2.3.2	Biodiesel	16
2.3.3	Etanol	18
2.3.4	Misturas diesel-biodiesel-etanol	19
2.4	Emissões atmosféricas	21
3	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1	Local	23
3.2	Configuração dos ensaios da pesquisa	23
3.3	Trator ensaiado	24
3.4	Combustíveis e tratamentos	25
3.5	Ensaio com dinamômetro	27
3.6	Medições complementares	29
3.7	Reserva de torque, reserva de rotação e índice de elasticidade	30
3.8	Rendimento global do motor	31
3.9	Fluxômetro	32
3.10	Bomba Calorimétrica	34
3.11	Medições de emissões atmosféricas	35
3.12	Análise Estatística	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Massa específica a 20°C	39
4.2	Estabilidade e solubilidade das misturas	40
4.3	Poder calorífico inferior (PCI) das misturas (MJ kg ⁻¹)	42
4.4	Desempenho do motor utilizando diesel puro (B0E0)	43
4.5	Desempenho dos tratamentos propostos	45
4.5.1	Potência (kW)	45
4.5.2	Torque (N.m)	47
4.5.3	Consumo específico (g kW ⁻¹ h ⁻¹)	50
4.5.4	Consumo horário (l h ⁻¹)	51
4.5.5	Eficiência global do motor (%)	52
4.5.6	Parâmetros de desempenho	54
4.6	Emissões atmosféricas	56
4.6.1	Gás oxigênio (O ₂ %vol.)	56
4.6.2	Fração de óxidos de nitrogênio (NO _x ppm)	58
4.6.3	Gás dióxido de carbono (CO ₂ %vol.)	61
4.6.4	Fração de monóxido de carbono (CO ppm)	62
4.6.5	Temperatura dos gases de exaustão (°C)	65

5	CONCLUSÕES	65
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	69
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	APÊNDICES	78
	Apêndice A - Resultados da análise de variância	79
	Apêndice B - Checklist para realização dos ensaios.....	83

1. INTRODUÇÃO

A energia é essencial aos seres humanos e ao desenvolvimento econômico e social desde os primórdios da história. Inúmeras formas de energia foram exploradas desde o fogo, como também a energia mecânica dos animais, a energia hidráulica dos rios, entre outras. No entanto, somente com a revolução industrial é que o uso e a produção de energia assumiram conotação fundamental na substituição de homens e animais pelas máquinas. A utilização do carvão mineral como fonte de energia marcou o fim da era da energia renovável, para iniciar-se a era não renovável, a dos combustíveis fósseis (ALCOFORADO, 2015).

Alcoforado (2015) relata ainda que foram o uso da eletricidade e a invenção das máquinas elétricas no século XIX, junto com a introdução dos veículos automotores, que lançaram as bases para a formação da moderna sociedade de consumo, caracterizada por uma intensidade energética nunca vista na história da humanidade.

A crescente industrialização tem aumentado a demanda por combustíveis fósseis mais do que nunca, fazendo com que as reservas desses combustíveis estejam se esvaindo numa taxa alarmante em todo o mundo. Mesmo as novas reservas descobertas com o que há de mais moderno de tecnologia disponível no mundo – como é o caso do pré-sal – não serão suficientes para suprir essa crescente demanda (SHAHIR et al., 2015).

O cenário atual contrasta com o do início do século XXI, quando havia a previsão de escassez do petróleo, e então emergiu o conceito “segurança energética”, que significa muito mais do que proteger refinarias e oleodutos contra ataques terroristas (ROCHA et al., 2013).

Segurança energética é um termo que deve ser interpretado como a disposição global de continuar existindo nos moldes atuais, isto é, produzindo energia suficiente (eletricidade, combustíveis, etc.), para que todos os países possam, ao menos, prosperar social e economicamente (GOODSTEIN, 2004; ROBERTS, 2004).

Conforme Klajn (2016), a redução do uso do óleo diesel com a incorporação de outros combustíveis tem sido estudada por muitos pesquisadores e se faz necessária para atingir maior segurança energética e maior aproximação das metas de redução de gases tóxicos prejudiciais ao planeta. O cumprimento de tais metas é

também interesse do Brasil, um dos países signatários dos acordos mundiais que visam à redução de gases poluentes.

Os combustíveis utilizados no transporte estão, cada vez mais, sujeitos a regulamentações de emissões rigorosas. Nessa busca urgente para substituir os combustíveis fósseis e manter o ambiente limpo, os esforços dos pesquisadores têm sido direcionados no sentido de encontrar fontes alternativas e que reduzam a dependência dos combustíveis fósseis. Entre os combustíveis alternativos propostos para motores a diesel, o biodiesel e a mistura diesel-etanol ganharam muita atenção nos últimos anos. Esta atenção se deve principalmente ao fato de que ambos são considerados fontes de energia renováveis e porque não possuem processos de produção complexos. Além disso, estudos têm demonstrado que a redução das emissões de CO, hidrocarbonetos não queimados e material particulado em motores ciclo diesel pode ser conseguida utilizando estas misturas (diesel-biodiesel) com combustíveis renováveis (LI et al., 2005; SHI et al., 2005; SRIVASTAVA; PRASAD, 2000; MASUM et al., 2014).

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 (BRASIL, 2014), em 2020 as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) não poderão ultrapassar 680 milhões de toneladas de CO_{2(eq)}, na produção, transformação e uso da energia, visando atender à Lei 12.187/09 e ao Decreto 7390/10. Dentre as ações para alcançar essas metas, estão a implementação do uso de biocombustíveis (biodiesel e etanol) no setor de transportes e a geração de eletricidade renovável (eólica, biomassa, solar e hidrelétrica).

Com base no exposto anteriormente, fica claro que haverá um incremento de medidas de redução das emissões de GEE, especialmente com a ampliação do uso das fontes alternativas de energia, com foco no uso de biocombustíveis nos meios de transporte e geração de eletricidade.

Esta pesquisa buscou avaliar o comportamento destes combustíveis renováveis num trator agrícola comum usado em rotinas de campo, com 103 cv (75,8kW) de potência, medindo seu desempenho operando com misturas de diesel, biodiesel e etanol.

Para isso, foi realizada a coleta de dados de torque e potência através de ensaios com dinamômetro de correntes de Foucault. Com os dados obtidos nos ensaios dinamométricos, foram calculados os índices e parâmetros de desempenho como: índice de elasticidade, reserva de torque, reserva de rotação e faixa de

utilização do motor. Coletou-se também dados de consumo específico e consumo horário de combustível através de medições com fluxômetro conectado ao dinamômetro.

As emissões de O₂ (%vol.), NO_x (ppm), CO (ppm), CO₂ (%vol.) e temperatura dos gases de exaustão, foram medidas com analisador de combustão e, por fim, feito um levantamento do poder calorífico superior do diesel puro e das 16 (dezesseis) misturas combustíveis propostas, através de bomba calorimétrica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratores agrícolas e seu desempenho

O trator é um engenho móvel que proporciona força de tração. A palavra tração e o nome trator tem a mesma origem e são quase sinônimos de puxar. Um trator pode ser também classificado como um engenho envolvido em operação na condição fora de estrada como: movimentação de terra, construção de estradas, ou em serviços diversos. No entanto, é como uma máquina agrícola que ele se destaca, e com o passar dos anos vem substituindo cada vez mais a mão de obra humana no desempenho das mais diferentes tarefas (MIALHE, 1980; MACHADO, REIS e MACHADO, 2010).

Segundo registros da ANFAVEA (2016), de 1960 à 2016, o número de tratores de rodas comercializados no mercado nacional foi de 1.679.496 unidades entre modelos nacionais e importados, sendo 661.178 unidades só nos últimos 16 anos, conforme mostra o gráfico da Figura 1.

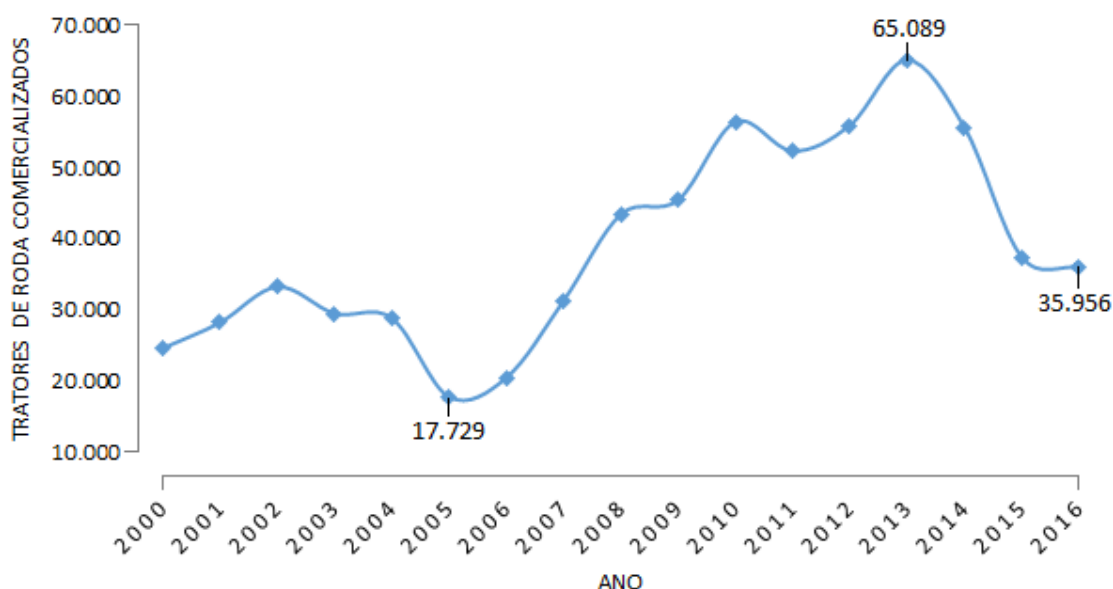


Figura 1 - Tratores de roda comercializados no Brasil nos últimos 16 anos
Fonte: Adaptado de ANFAVEA (2016).

A ANFAVEA classifica os tratores de rodas em três categorias: até 80 cv; de 81 a 130 cv; acima de 130 cv. No ano de 2016, das 35.956 unidades de tratores

comercializadas, a faixa de potência que remete ao trator utilizado nesta pesquisa (81 a 130 cv) correspondeu a 10.017 unidades, ou 27,86% (ANFAVEA, 2016).

A Figura 1 também mostra que houve um grande incremento, de cerca de 27%, no número de tratores comercializados de 2005 a 2013. Isso se deve principalmente à implantação pelo Governo Federal, de programas de crédito que objetivaram melhorar a produtividade agrícola através do acesso facilitado ao crédito para a aquisição de tratores agrícolas, implementos e colhedoras de grãos aos produtores rurais e cooperativas, através de bancos e outros agentes financeiros (FARIAS, 2014).

Thomas (2010) afirma que embora seja natural pensar que o trator é utilizado como unidade de força de tração na aplicação agrícola, cabe lembrar que a maioria inclui ainda uma tomada de potência (TDP) como forma de obter torque em um eixo rotativo, bem como uma tomada hidráulica como fonte de fluido hidráulico pressurizado. Com uso individual ou combinado destes recursos, esta máquina agrícola mostra sua versatilidade.

Mialhe (1987) considera a avaliação de desempenho de máquinas agrícolas como a caracterização e julgamento de seus atributos, baseado em conhecimentos científicos e tecnológicos implícitos no projeto e construção, em função da missão que essas máquinas têm no processo de produção agropecuária ou florestal.

Em meados do século XIX, procedimentos usados para testes de desempenho em motores a combustão interna foram adaptados de equipamentos usados para avaliar motores a vapor. Até o começo do século atual, esses equipamentos utilizavam sistemas de frenagem por atrito. O desenvolvimento de um modelo Schenck substituiu as peças de flexão radial, eliminando, assim, a fricção e o desgaste, dando origem à modelos mais modernos de medição (MARTYR; PLINT, 2007).

Inicialmente, os dinamômetros hidráulicos eram mais utilizados por serem mais baratos, porém, devido à dificuldade de controlá-los para obtenção de resultados mais precisos, outros mais modernos têm ganhado espaço, pois são mais versáteis e têm, por exemplo, a capacidade de estabelecer medições em rotações constantes, como é o caso dos dinamômetros por corrente de Foucault (MARTYR; PLINT, 2007; CEZAR, 2012).

A construção de um dinamômetro de correntes de Foucault consiste de discos dentados (rotores) construídos com material de alta permeabilidade magnética,

ligados a um eixo, e que são acionados por um motor primário. Esses rotores giram com uma pequena folga ao redor de bobinas acopladas a polos magnéticos (estatores). Quando uma corrente elétrica flui através dessas bobinas, um fluxo magnético é formado em torno delas. O movimento circular dos rotores dá origem a alterações na distribuição do fluxo magnético, criando correntes que atuam no sentido oposto ao sentido de giro, que são as chamadas Correntes Parasitas, ou, Correntes de Foucault. A energia do campo magnético tentando frear o motor primário é transferida para um transdutor/célula de carga posicionado numa distância conhecida, fornecendo o valor do momento de força ou torque aplicado por este motor. Toda essa energia é dissipada em forma de calor, que é extraído do sistema por um potente sistema de exaustão (MARTYR; PLINT, 2007; FARIAS, 2014).

De acordo com Martyr e Plint (2007) “o torque produzido por um motor primário sob teste é resistido e medido pelo dinamômetro ao qual ele está conectado. A precisão com que um dinamômetro mede tanto o torque quanto a rotação é fundamental para todas as outras medidas derivadas feitas no ensaio”.

A Figura 2 apresenta um sistema de medição realizado através de um modelo que utiliza como base correntes de Foucault.

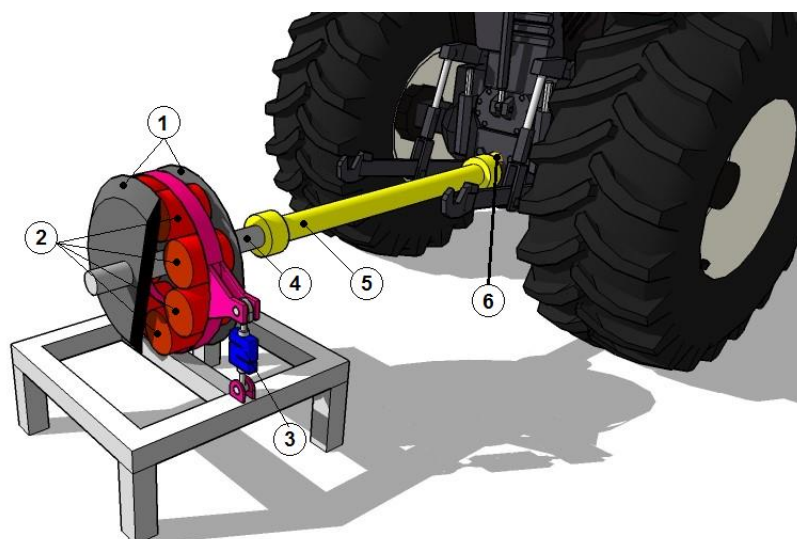


Figura 2 - Ilustração de um Dinamômetro de Correntes de Foucault. 1. Rotores; 2. Bobinas; 3. Célula de carga; 4. Eixo estriado; 5. Eixo-árvore ou Eixo-Cardã; 6. Tomada de potência do trator.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a informação da variação do torque (T) no tempo (s) através da velocidade angular, é possível obter a disposição de energia que um motor possui, ou seja, sua potência (P) (HALLIDAY, 2008). Neste caso, a potência pode ser expressa matematicamente através da Equação 1.

$$Potência = \frac{Força [N] \times Distância [m]}{Tempo [s]} = [kW] \quad (1)$$

Mialhe (1996) descreve que “O balanço das transformações de energia que ocorrem em um motor agrícola define uma série de potências”, e as define da seguinte forma:

- Potência teórica ou motora (H_t): Potência que seria obtida se fosse possível a transformação total da energia resultante da combustão, em energia mecânica.
- Potência indicada (H_i): É a potência desenvolvida no cilindro do motor, como resultado da ação da pressão média dos gases da combustão sobre a cabeça do êmbolo.
- Potência efetiva ou potência ao freio (H_e): Potência desenvolvida no volante do motor e medida por meio dos dinamômetros de absorção ou freios dinamométricos. É a potência que efetivamente está disponível no motor para atender as exigências de sua aplicação. Pode ser facilmente calculada a partir do valor de torque em sua correspondente rotação do motor.
- Potência de atrito (H_a): Potência consumida pelo próprio motor para vencer o atrito nos mancais, êmbolos e demais partes móveis, bem como para realizar a aspiração do ar (motores ciclo Diesel) ou da mistura ar e combustível (motores ciclo Otto) e a expulsão dos gases de escape.
- Potência observada (H_o): Potência que foi medida na bancada dinamométrica, sob determinadas condições especificadas por um método de ensaio normalizado.
- Potência reduzida (H_r): Potência observada reduzida para as condições atmosféricas padrão.

À despeito do que se encontram em algumas literaturas, potência corrigida é diferente de potência reduzida. A primeira refere-se às correções feitas devido à calibração e ajustes de instrumentos de medição, já a segunda aos resultados reais de desempenho do motor que foram obtidos por cálculos efetuados a partir da potência observada, os quais levam em conta as condições atmosféricas de referência (FARIAS, 2014).

A Figura 3 apresenta um diagrama que mostra as perdas de potência que ocorrem no trator desde a geração da potência líquida no motor, até sua utilização como força de tração na barra de tração ou como fonte de torque na TDP.

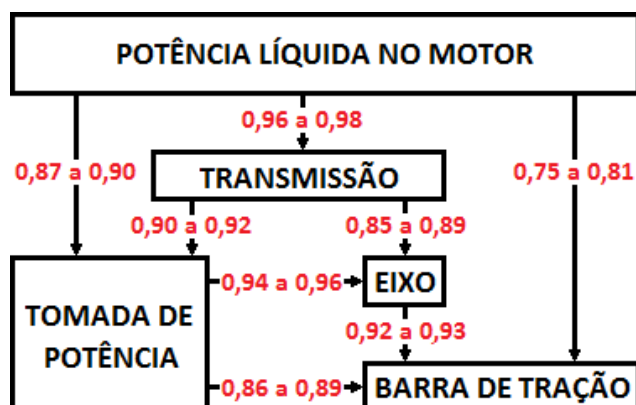


Figura 3 - Diagrama de perdas de potência nos sistemas de um trator.
Fonte: ASAE EP496.2 *apud* Farias (2014).

2.1.1 Pontos de interesse

De maneira geral, os resultados dos ensaios de desempenho seguem o padrão da norma utilizada nesses ensaios, através da apresentação dos dados numéricos e gráficos ilustrativos. Segundo Mialhe (1996), dentro das curvas que caracterizam os resultados desses ensaios, ocorrem 5 (cinco) pontos de interesse (Figura 4) denominados:

- Ponto 1 - Ponto de potência efetiva máxima: representa o maior valor obtido pelo produto (torque x velocidade angular) no ensaio do motor;
- Ponto 2 - Ponto do torque de potência efetiva máxima: é o valor do torque desenvolvido que possibilita a obtenção da potência máxima. Este ponto também marca o limite superior de rotação que define a Faixa de Utilização do motor;
- Ponto 3 - Ponto de torque máximo: expressa condição operacional na qual ocorre o maior valor para a pressão média efetiva capaz de ser desenvolvida nos cilindros do motor. Este ponto marca o limite inferior da rotação da Faixa de utilização do motor;

- Ponto 4 - Ponto de consumo específico mínimo: é o ponto em que ocorre o máximo valor de rendimento termodinâmico e, portanto, condições operacionais ideais em termos de rotação e torque para o motor;
- Ponto 5 - Ponto de consumo horário ótimo: corresponde à condição operacional em que ocorre o ponto de consumo específico mínimo.

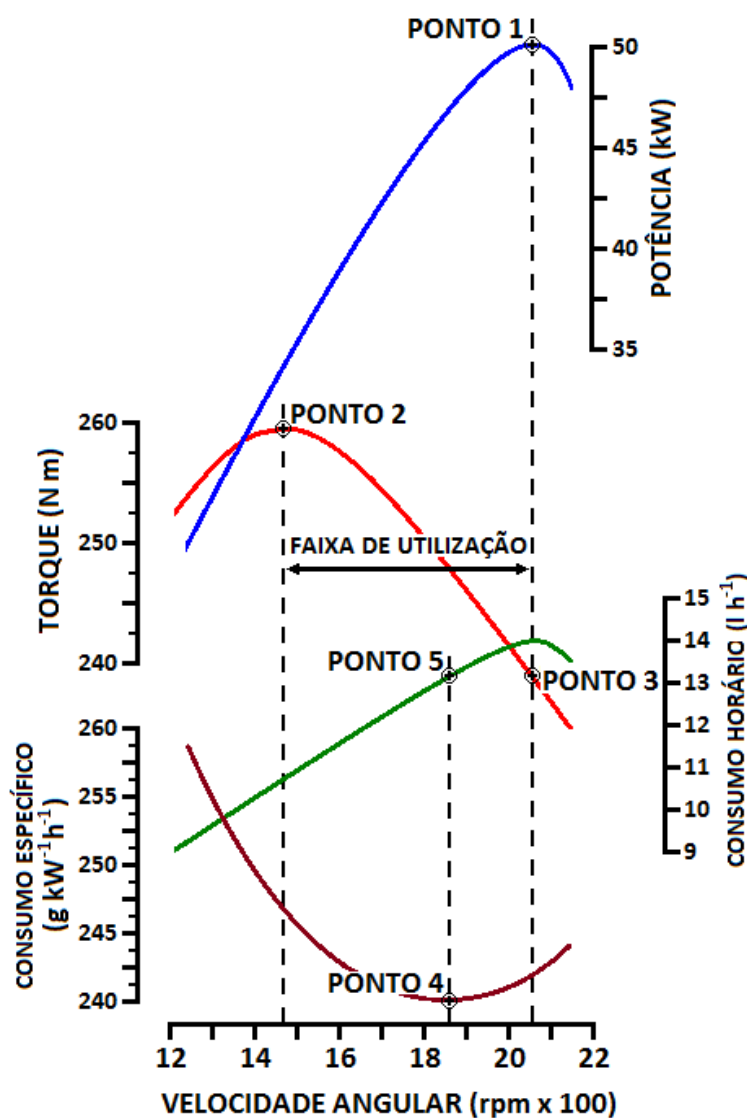


Figura 4 - Curvas características de desempenho do motor e principais pontos do funcionamento a plena carga.

Fonte: Adaptado de Mialhe (1996).

Todos os resultados são relacionados à velocidade angular momentânea, demonstrando: na curva azul o comportamento da potência; na curva vermelha o comportamento do torque; na curva marrom o comportamento do consumo específico; e, finalmente, na curva verde os valores de consumo horário.

2.1.2 Índices e parâmetros de desempenho

Garcia e Brunetti (1992), explicam que motores de combustão interna apresentam uma faixa de utilização que é delimitada pelas rotações dos pontos 1 e ponto 2 do gráfico da Figura 4. Nessa faixa os motores apresentam um comportamento estável, tendo a capacidade de se autorregular para pequenas resistências ao torque. Essa autorregulação é denominada de Índice de Elasticidade (IE).

Além do IE, também considera-se como importante parâmetro de desempenho, a Capacidade de Sustentação do Conjugado (CSC), popularmente conhecida como “reserva de torque” (RT). Este parâmetro é delimitado pelos pontos 2 e ponto 3 do gráfico da Figura 4, e é calculado pelos valores extremos de torque e potência, na faixa de utilização do motor em plena carga. A RT acima de 15% é considerada boa, entre 10 e 15% regular e abaixo de 10% ruim (MIALHE, 1996).

MACHADO, REIS e MACHADO (2010), definem a reserva de torque como a capacidade que o trator apresenta de aumentar o torque à medida que ocorre diminuição na rotação do motor. Essa diminuição de rotação geralmente acontece devido a uma sobrecarga imposta ao trator durante o trabalho em campo.

Mialhe (1996) ainda apresenta um último parâmetro, diretamente ligado à RT, denominado reserva de rotação (RR), que nada mais é do que a porcentagem que a rotação da faixa de utilização representa dentro da faixa de rotação total. O autor salienta que “essas relações expressam atributos de desempenho na ‘faixa de utilização’, para condição de plena carga. Todavia, sabe-se que essa não é a condição de uso na prática, quando o motor opera a cargas parciais.”

2.2 Motores ciclo diesel ICO (ignição por compressão)

Os motores ciclo diesel são projetados para funcionar com um elevado fator de carga, isto é, operar grande parte do tempo desenvolvendo potências próximas da máxima. No caso específico de motores para tratores, espera-se que a potência produzida possa ser de 85 à 90% da potência máxima por um prolongado período de tempo (LILJEDAHL et al., 1989).

De acordo com Reis et al. (1999), os motores CI ou ICO de 4T são a principal fonte de energia na agricultura, especialmente nos casos em que se necessita elevados fatores de carga, baixo consumo, elevada potência, grande confiabilidade e onde o peso não é um fator limitante. Como é o caso do seu emprego em tratores, colhedoras auto propelidas, conjuntos motobombas, entre outros.

Garcia e Brunetti (1992) descrevem o funcionamento de um motor de ciclo diesel e seus quatro tempos de funcionamento da seguinte maneira (Figura 5):

- Admissão:** A válvula de admissão se abre durante este período, onde apenas ar puro é admitido para o interior do cilindro. O pistão se movimenta do PMS para o PMI.
- Compressão:** Com ambas as válvulas fechadas, o pistão sobe novamente até o PMS, comprimindo o ar puro admitido, causando seu aquecimento;
- Expansão:** O combustível é injetado, inflamando-se espontaneamente no contato com ar quente comprimido, fazendo com que o pistão se desloque para o PMI novamente;
- Escape:** Abre-se a válvula de escape, e o movimento do pistão de PMI para PMS faz a exaustão dos gases da combustão.

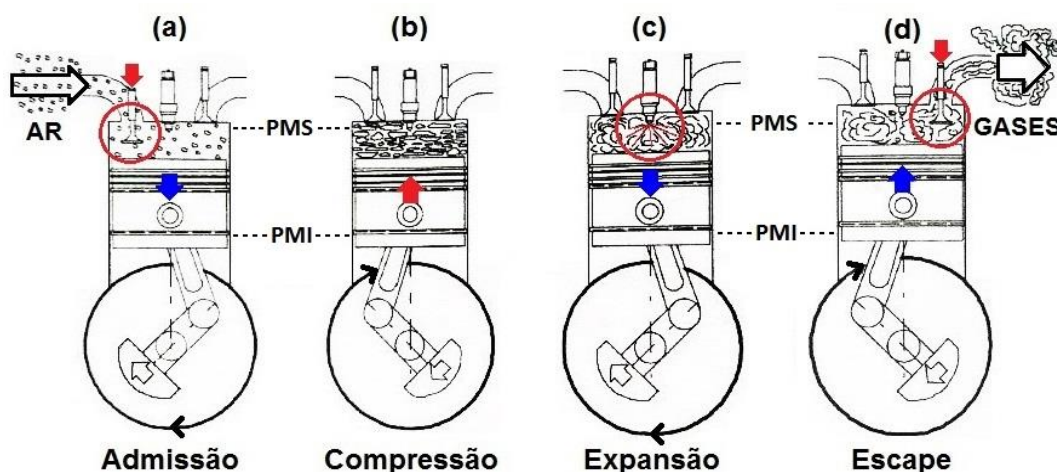


Figura 5 - Os quatro tempos de um motor de ignição por compressão.
Fonte: Adaptado de Garcia e Brunetti, (1992).

No início da injeção, como a temperatura e pressão do ar são superiores às do ponto de ignição, com certo atraso, se dá a autoignição das porções de combustível que já estão misturadas com o ar. Como consequência, a pressão e temperatura do cilindro elevam-se ainda mais, reduzindo esse atraso da ignição da massa de combustível restante já injetada, a qual evapora mais rapidamente. Os processos de

mistura do combustível com o ar e sua combustão continuam durante a expansão, até todo o combustível ter sido consumido (MOREIRA, 2008).

Challen e Baranescu (1999) explicam que a injeção de combustível do motor se inicia antes do ponto morto superior (PMS) e continua durante a descida do pistão, onde a pressão existente dentro do cilindro terá de ser ultrapassada pela pressão do sistema de injeção. Atualmente os motores apresentam pressões de injeção aproximando-se dos 2000 bar (200 MPa), de modo a proporcionarem uma boa preparação da mistura. O sistema de injeção deverá satisfazer as seguintes condições:

- Pulverização: Quanto menores forem as gotas pulverizadas, mais facilmente se dará a combustão, pois a área superficial da totalidade do combustível injetado será maior;
- Penetração: Convém que algumas gotas sejam maiores que outras. Gotas pequenas vaporizam perto do bico injetor enquanto gotas maiores terminarão a sua vaporização perto das paredes da câmara de combustão, usando o ar desta região;
- Gradiente de injeção: Os recentes sistemas de injeção controlados eletronicamente e com injetores de resposta rápida (piezoelétricos) permitem uma liberdade extrema dos gradientes de injeção, o que otimiza a combustão, reduzindo o ruído e a emissão de poluentes.

2.2.1 Sistemas de injeção em motores diesel

Segundo Martins (2006), atualmente existem três maneiras de injetar o combustível em elevadas pressões para promover uma combustão relativamente limpa e suave.

- Bomba de injeção (em linha ou rotativa): São conectadas aos injetores por meio de tubos metálicos. Tem sido usada há quase um século com bombas em linha que mais tarde foram substituídas pelas bombas rotativas. É um sistema barato e fácil de implementar. Os longos tubos de ligação apresentam problemas de controle na injeção, pois as ondas de pressão que se desenvolvem dentro deles podem alterar o seu funcionamento, não conseguindo por vezes atingir as pressões necessárias. Este sistema é

incapaz de atender ao sofisticado controle exigido nos motores atuais que usam pré e pós injeções e modulação da injeção principal, mesmo que se possa controlar eletronicamente a bomba e os injetores. Por esta razão têm sido preteridos por sistemas modernos, como o “*common rail*”.

- Injeção Direta: Este sistema foi concebido para se obter pressões de injeção acima de 1500 bar, e inicialmente não era para uso automotivo. Ele trabalha em elevadas pressões (> 2000 bar) pois o injetor e a bomba estão no mesmo corpo e são atuados por um came ligado ao motor. A alta pressão que este sistema proporciona, melhora a preparação da mistura (gotas mais finas), reduzindo drasticamente a produção de partículas. Foi neste sistema que se iniciou o controle eletrônico da injeção, sendo possível melhorar o arranque a frio e reduzir drasticamente a emissão de fumaça.
- Common-rail: Neste sistema uma bomba eleva a pressão do combustível que é fornecido a todos os injetores por uma tubulação comum (*rail*). Assim, a pressão é contínua e independe da velocidade do motor. Cada injetor possui um sofisticado controle de abertura que lhe permite executar uma elevada quantidade de pulsos por ciclo (atualmente fala-se de injeção piloto e várias pré-injeções, injeções principais e pós-injeções em cada ciclo).

2.3 Combustíveis

2.3.1 Panorama nacional do diesel

A Resolução da ANP nº 50, de 23 de dezembro de 2013 determina que o óleo diesel se apresente em dois tipos (ANP, 2013):

- Óleo diesel A: combustível produzido nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores. **Sem adição de biodiesel;**
- Óleo diesel B: óleo diesel A, **adicionado de biodiesel** no teor estabelecido pela legislação vigente.

Estes dois tipos de óleo diesel (A e B) são comercializados de acordo com o teor de enxofre máximo presente nos mesmos, sendo:

- Óleo diesel A S-10 e Óleo diesel B S-10: combustíveis com teor de enxofre máximo de 10 mg kg^{-1} ; e,
- Óleo diesel A S-500 e Óleo diesel B S-500: combustíveis com teor de enxofre máximo de 500 mg kg^{-1} .

Em março de 2016 foi sancionada a Lei nº 13.263/2016, aprovando o Projeto de Lei do Senado 613/2015, que estabelece novos percentuais de adição obrigatória, em volume, de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final em qualquer parte do território nacional. No período de até 12 meses após a data de promulgação da Lei, deve adicionar-se 8% (oito por cento) de biodiesel ao óleo diesel. Depois, de vinte e quatro meses a adição passa a ser de 9% (nove por cento), e em até trinta e seis meses a adição passa a ser de 10% (dez por cento) (BRASIL, 2016).

A Lei nº 13.263/2016 (BRASIL, 2016), o Artigo 1-C faculta a adição voluntária de biodiesel ao óleo diesel em quantidade superior ao percentual obrigatório e o uso voluntário da mistura no transporte público, no transporte ferroviário, na navegação interior, em equipamentos e veículos destinados à extração mineral e à geração de energia elétrica, em tratores e nos demais aparelhos automotores destinados a puxar ou arrastar maquinaria agrícola ou a executar trabalhos agrícolas.

A Tabela 1 mostra a evolução do consumo de combustíveis no Brasil nos diversos setores consumidores, realizada na última estimativa do Plano Nacional de Energia para combustíveis líquidos que vai até o ano de 2030. Observa-se que, além do aumento do consumo total em todos os setores, há a manutenção da predominância do consumo de combustíveis pelo setor de transportes, cuja representatividade de aproximadamente 74% (2004), tende a um aumento de mais 3%, subindo para aproximadamente 77% da demanda total de combustíveis do setor. A participação do setor agropecuário na demanda final de energia também deverá aumentar de 7% em 2004, para 9% em 2030 (BRASIL, 2007).

Tabela 1 - Evolução da demanda de combustíveis líquidos por setor (mil tep*)

	2004	2010	2015	2020	2025	2030
Setor industrial	5.542	5.776	6.756	8.004	9.863	11.196
Setor comercial	528	523	624	737	1.021	1.225
Setor público	637	635	759	901	1.277	1.556
Setor de transportes	49.953	53.454	62.984	77.340	108.118	132.635
Setor agropecuário	4.767	5.033	6.521	8.652	12.251	15.000
Setor residencial	5.841	5.880	6.270	8.268	10.508	11.406
Total	67.268	71.301	83.914	103.902	143.038	173.019

*Tonelada equivalente de petróleo

Fonte: BRASIL, 2007

Conforme a ANP (2016), o diesel ocupa uma parcela significativa da matriz veicular brasileira (Figura 6) e foi responsável, no ano de 2015, por praticamente metade (45,8%) do consumo total de combustíveis. Se associarmos isso ao fato de que o setor de transportes é o maior consumidor de combustíveis líquidos do país, logo, é possível afirmar que grande parte dos meios de transporte é movida à diesel.

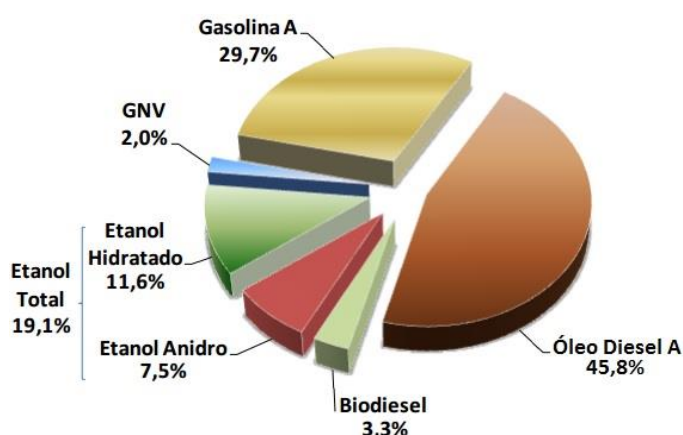


Figura 6 - Distribuição do consumo de combustíveis pela matriz veicular brasileira, ano base 2015.
Fonte: ANP, 2016a.

Os dados da Tabela 2 apontam que, em 2014, foram comercializados no Brasil pouco mais de 60 bilhões de litros de óleo diesel. Já no ano de 2015, observa-se um decréscimo (4,7%) na comercialização deste combustível, caindo para 57,211 bilhões de litros. Apesar da queda na comercialização do diesel, o aumento na proporção de biodiesel que passou para 7% em novembro de 2014 (Lei nº 13.033/2014), fez com que o volume de Biodiesel (B100) comercializado tivesse um aumento de 17,45% passando de 3,410 bilhões de litros (2014) para 4.005 bilhões (2015).

Tabela 2 - Vendas internas de combustíveis, ano base 2015

Combustível	mil m ³				Variação do Volume de venda
	2012	2013	2014	2015	15/14 (%)
Diesel B	55.900	58.571	60.032	57.211	- 4,70%
Biodiesel (B100)	2.762	2.929	3.410	4.005	17,45%

Fonte: ANP, 2016a.

2.3.2 Biodiesel

Biodiesel é um combustível composto de alquilésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de lipídeos de origem vegetal ou animal. É importante salientar que o produto dessas reações de esterificação ou transesterificação é considerado apenas um éster etílico ou éster metílico. Ele apenas passa a ser considerado Biodiesel, quando atende às especificações contidas no Regulamento Técnico nº 4/2012, da Resolução ANP nº 14, de 11/5/2012 (ANP, 2013; PARENTE, 2003).

Quando comparado ao diesel A, o biodiesel também tem vantagens ambientais, pois, a queima deste combustível pode reduzir significativamente as emissões de alguns poluentes. Esses percentuais são reduzidos proporcionalmente à medida em que se aumenta o percentual de biodiesel puro (B100) adicionado ao diesel puro, mas, em média, há a redução 48% menos monóxido de carbono (CO); 47% menos material particulado (MP); e, 67% menos hidrocarbonetos (HC) (GOLLO, MEDEIROS e PADILHA, 2012).

Em 2014 houve um aumento de 17,2% na produção de biodiesel B100 em relação à 2013. A capacidade nominal instalada para produção de biodiesel (B100) no Brasil em 2014 era de cerca de 7,7 milhões de m³ (21,2 mil m³ dia⁻¹), entretanto, a produção nacional no ano foi menos da metade, 3,4 milhões de m³ (44,3% da capacidade). Em 2015, novamente houve um aumento de 17,4% na produção. Em termos regionais, a região Centro-Oeste é maior produtora de biodiesel, com um volume de cerca de 1,5 milhão de m³, equivalente a 43,1% da produção nacional, seguida do Sul com 1,4 milhão de m³ (39,7%). Por estados, o Rio Grande do Sul é o maior produtor com um volume de 971,3 mil m³ (28,4% do total nacional), seguido por Goiás com 643,8 mil m³ (18,8% do total) (ANP, 2016).

O biodiesel é considerado um promissor substituto ao diesel mineral e seu uso vem crescendo devido principalmente a questões econômicas (redução da dependência de importação do óleo diesel, por exemplo) e ambientais (reduções nas concentrações de grande parte dos gases emitidos na combustão, aliado ao fato de ser um combustível renovável) (GOMES et al., 2013). Ele pode ser utilizado puro (B100) em motores de ciclo diesel ou em misturas binárias diesel-biodiesel (B%) de qualquer proporção (AGARWAL, 2007; LAPUERTA; ARMAS; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, 2008).

O óleo de soja continua sendo a principal matéria-prima para a produção de biodiesel (B100), equivalente a 77,7% do total, com uma alta de 16,6% em relação a 2014. A segunda matéria-prima mais utilizada pelas usinas foi a gordura animal (18,8% do total), após aumento de 9,3% em relação a 2014, seguida pelo óleo de algodão (2% do total) e outros materiais graxos com 1,5% de participação (ANP, 2016). A Figura 7 mostra o crescimento das fontes de matéria-prima para produção de biodiesel no Brasil.

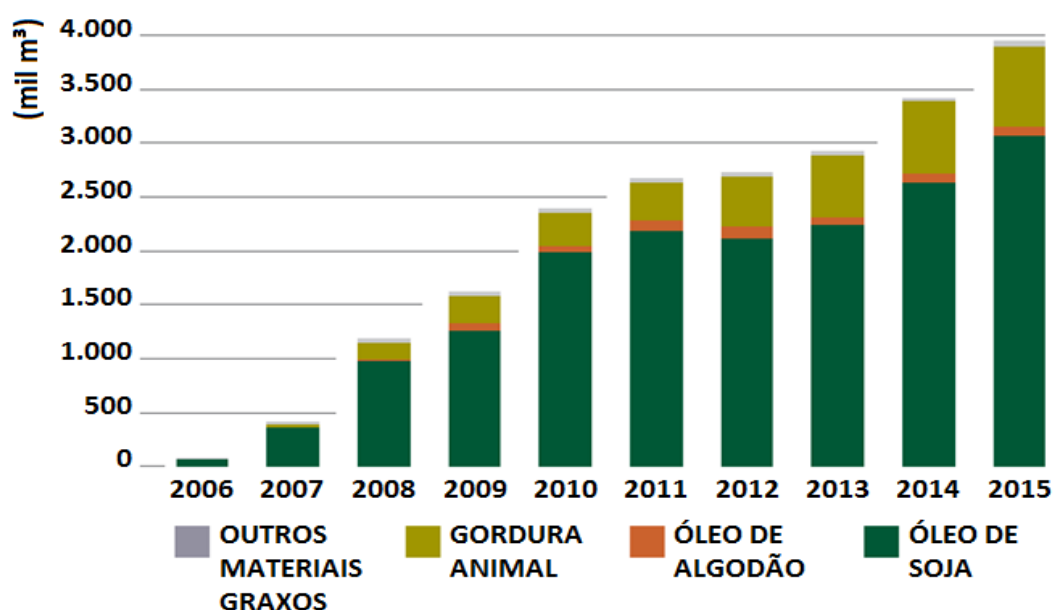


Figura 7 - Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel (B100).
Fonte: ANP, 2016.

No Brasil, a produção de biodiesel se adapta às safras disponíveis em cada região. No norte do país as culturas de maior abundância para este fim são as palmáceas e o soja; no nordeste, palmáceas, babaçu, soja, mamona e algodão; no centro oeste, a soja, algodão mamona e girassol; no sudeste, soja, mamona, algodão e girassol e no sul, soja, girassol, canola e algodão (PINTO et al., 2005).

De todas essas possibilidades, a soja é a que se apresenta como principal matéria-prima para a produção de biodiesel, respondendo por quase 80% do total das matérias primas oleíferas utilizadas para este fim. Isso se deve ao fato de que este grão é produzido praticamente em todo o território brasileiro e seu subproduto (farelo) ainda é usado como ração animal e pode ser exportado juntamente com os grãos (D'AGOSTO et al., 2015; CASTANHEIRA et al., 2014).

2.3.3 Etanol

Segundo ANP (2013), o Etanol combustível ou bioetanol é o produto destinado para uso em motores ciclo Otto, que possui como componente majoritário o etanol, especificado como álcool etílico anidro combustível (destinado para a mistura com a gasolina) ou etanol anidro combustível (EAC), ou então como álcool etílico hidratado ou etanol hidratado combustível (EHC) (comercializados em postos de combustível para o consumidor final).

No Brasil, as agroindústrias do açúcar e do álcool estão intimamente ligadas, pois, tanto o álcool como o açúcar têm origem na mesma matéria-prima, a cana-de-açúcar, e ambos podem ser produzidos por praticamente todas as empresas do setor. As inovações desenvolvidas para o álcool e o açúcar possuem efeitos potencialmente relacionados, especialmente quando realizados na fase agrícola da atividade, ou seja, quando o foco é na cana-de-açúcar. Por esta razão, ainda que tenham sido motivadas para a produção açucareira, diversas atividades influenciaram a estrutura disponível quando da implementação do Proálcool.

O Programa Nacional do Álcool – Proálcool é apontado como um marco no uso de biocombustíveis em larga escala. O período do Proálcool foi rico em investimentos em tecnologia, no aumento da produção e produtividade do álcool combustível (DUNHAM; BOMTEMPO; FLECK, 2011).

Recentemente, muita atenção tem sido dada ao desenvolvimento de combustíveis alternativos limpos que ajudem a melhorar a qualidade do ar, contribuindo para a redução da dependência dos combustíveis fósseis. Alcoois, especialmente o etanol e ésteres como o biodiesel, tem sido apontados como combustíveis alternativos não só por derivarem de fontes renováveis, mas também porque são muito oxigenados, e portanto, tem grande potencial para redução de

material particulado. O Etanol é comumente mais utilizado pois é de fácil produção, pode ser obtido de fontes renováveis, tem custo relativamente baixo e baixa toxicidade (PEREIRA et al., 1999; LAPUERTA et al., 2007; SHI et al., 2005).

O uso maciço de etanol é considerado como um importante mecanismo de redução dos gases do efeito estufa, pois diminui sensivelmente as emissões de CO₂. Parte do CO₂ emitido pelos veículos movidos a etanol é reabsorvido pelas plantações de cana-de-açúcar no processo de fotossíntese (ANP, 2016).

As principais desvantagens deste combustível dizem respeito à sua baixa lubricidade e potencial corrosivo, fatores que podem acelerar o dano às partes metálicas do motor de maneira mais acelerada quando comparado à gasolina (SOBRAL et al., 2009).

2.3.4 Misturas diesel-biodiesel-etanol

O uso de motores à diesel tem crescido, principalmente por serem mais eficientes que motores à gasolina. Um grande desafio que se apresenta para o mercado de combustíveis, é encontrar novas alternativas para esses motores, já que representam quase metade da frota nacional e internacional, e são considerados a maior fonte de poluição dos grandes centros urbanos (MENEZES et al., 2006). Em 2009, somente 5,93% dos veículos brasileiros eram movidos à diesel, todavia, eram responsáveis por 44% das emissões de gases poluentes, especialmente material particulado, óxidos de nitrogênio, compostos de enxofre e aldeídos (GUARIEIRO et al., 2008).

Embora o etanol seja um combustível renovável, suas fracas propriedades de autoignição fazem com que ele não possa ser usado puro em motores ciclo diesel, sem que haja grandes mudanças no motor. No entanto, sua utilização misturado ao diesel, resultando num combustível oxigenado tem sido muito estudada. Esta mistura de etanol e diesel é conhecida como diesohol ou e-diesel (SHAHIR et al., 2015).

Sabe-se que a adição de etanol ao óleo diesel altera algumas características do motor, como: aumento no atraso da ignição; aumento da taxa de combustão; aumento da eficiência térmica e redução da fumaça no escape (LAPUERTA et al., 2010; REYES et al., 2009; TORRES-JIMENEZ et al., 2010).

Porém, há críticas ao uso comercial de misturas diesel-etanol num motor ciclo diesel, uma vez que a adição de etanol ao diesel afeta propriedades essenciais do funcionamento do motor, como lubricidade, viscosidade, poder calorífico, índice de cetano e, principalmente, estabilidade e volatilidade (HANSEN; ZHANG; LYNE, 2005).

Uma das formas de melhorar as propriedades das misturas de etanol e diesel é o uso de aditivos emulsificantes, que impedem a formação de duas fases na mistura. Entretanto, essa alternativa é limitada, pois, apesar de trazer homogeneidade, acaba por não contemplar os demais problemas apresentados. Outra opção mais eficiente é a adição de cossolventes (RAKOPOULOS; ANTONOPOULOS; RAKOPOULOS, 2007; CAN; ÇELIKTEN; USTA, 2004; LAPUERTA; ARMAS; HERREROS, 2008).

Os cossolventes mais utilizados nas misturas diesel-etanol são os ésteres, principalmente devido à sua semelhança com o óleo diesel, formando diesel-éster-etanol. Os ésteres, tal como o etanol, devido ao teor de oxigênio, têm um grande potencial para reduzir as emissões de gases, especialmente materiais particulados, e podem ser utilizados misturados ao diesel em qualquer proporção (GUARIEIRO et al., 2009).

Ao contrário dos aditivos emulsificantes, que atuam em questões pontuais, a adição de ésteres traz inúmeras vantagens: são obtidos a partir de fontes de energias renováveis (óleos e/ou gorduras vegetais e/ou animais); têm propriedades lubrificantes que beneficiam o motor; melhoram a tolerância da mistura à água, mantendo a mistura estável, possibilitando seu armazenamento por um longo período; possuem maior número de cetano, compensando o baixo número de cetano do etanol, melhorando a ignição do motor (RIBEIRO et al., 2007; Shi et al., 2008).

Quando o biodiesel é adicionado a mistura diesel-etanol, a solubilidade do etanol no diesel aumenta para uma vasta gama de temperaturas, melhorando as propriedades físico-químicas da mistura (BARABÁS e TODORUT, 2011). Esta mistura é estável sob temperaturas abaixo de zero (FERNANDO e HANNA, 2004) e têm propriedades iguais ou superiores ao diesel "A" (LAPUERTA, ARMAS e GARCÍA-CONTRERAS, 2009). Alguns estudos já mostraram que a mistura diesel-biodiesel-etanol melhora as propriedades físico-químicas quando comparada à misturas binárias diesel-biodiesel ou diesel-etanol (BHALE; DESHPANDE; THOMBRE, 2009).

Uma desvantagem, é que estas misturas ternárias reduzem a entrega de força e torque nos motores na medida em que a porção de compostos oxigenados (biodiesel e etanol) na mistura aumenta (RAHIMI et al., 2009). Isto se dá devido ao baixo número

de cetano, menor poder calorífico e maior tempo de atraso da ignição, comparado ao diesel (CAN; ÇELIKTEN; USTA, 2004). Cheenkachorn e Fungtammasan (2009), encontraram aproximadamente 4,4 ~ 8,7% de redução máxima na entrega de força utilizando a mistura diesel-biodiesel-etanol comparando-a ao diesel fóssil.

Shahir et al. (2015) conduziram uma revisão para avaliar a mistura diesel-biodiesel-etanol coletando, resumindo e comparando dados, a fim de elucidar o potencial desta mistura como um combustível alternativo ao diesel e concluíram: numa mistura de diesel-biodiesel-etanol deve ser usado etanol com pureza acima de 99%, e sua quantidade na mistura deve ser a menor possível. Os melhores resultados podem ser obtidos a partir da mistura contendo etanol a 5% ou menos; a quantidade de biodiesel deve ser determinada de acordo com a sua qualidade; a utilização desta mistura ternária no motor ciclo diesel aumenta o consumo específico, mas também diminui a mais importante preocupação dos motores ciclo diesel, que é o MP nos gases de escape; também são reduzidas significativamente as emissões de fuligem, fumaça e HC, embora estas reduções dependam das condições de funcionamento do motor.

2.4 Emissões atmosféricas

Durante a COP15, 15ª Conferência das Partes da UNFCCC em Copenhague, na Dinamarca, o Brasil assumiu a meta voluntária de reduzir até 2020, entre 36,1 e 38,9% das emissões de Gases Efeito Estufa (GEE). A partir daí foi sancionada pela presidência da República em 29 de Dezembro de 2009 a Lei Nº. 12.187/09, a qual originou a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).

Num prosseguimento das COP's anteriores, com a preocupação de que as mudanças climáticas representam uma ameaça irreversível para a sociedade humana e para o planeta, a fim de alcançar o objetivo de combater essas mudanças climáticas, aconteceu em Paris, a 21ª Conferência das Partes da UNFCCC (COP21). Desta vez estabeleceram-se metas para que o aumento da temperatura média não ultrapasse níveis preestabelecidos, e consequentemente, se incentive a utilização de energias renováveis (ONU, 2015).

Essas metas visam fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas, no contexto do desenvolvimento sustentável e os esforços para erradicar a pobreza, ao:

- Manter o aumento da temperatura média global abaixo dos 2°C acima dos níveis pré-industriais e buscar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e impactos das mudanças climáticas;
- Aumentar a capacidade de adaptar-se aos impactos adversos das mudanças climáticas e fomentar a resiliência ao clima e o desenvolvimento de baixas emissões de gases de efeito estufa, de uma forma que não ameace a produção de alimentos;
- Promover fluxos financeiros consistentes com um caminho de baixas emissões de gases de efeito estufa e de desenvolvimento resiliente ao clima.

No Brasil, o controle de emissões de poluentes teve início de fato quando o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) instituiu com a Resolução nº 18 em 1986, o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Este programa, agora em sua sétima fase, tem motivado fabricantes de motores e veículos a adotarem medidas de minimização de poluentes, através de modificações estruturais do motor, pelo uso de componentes de tratamento de gases exauridos, bem como pelo uso de aditivos ao diesel mineral. Em geral, esta alternativa de controle de emissões é a menos onerosa e mais sustentável, pois além de minimizar as alterações construtivas nos motores, estimula o uso de combustíveis alternativos (BRIDI; COSTA; WANDER, 2012; BRASIL, 1986).

Uma redução mais acentuada nos teores de enxofre em combustíveis que viesse a respaldar esta legislação se deu apenas recentemente, quando em 2014 a ANP determinou a substituição do S50 (50 ppm de enxofre) pelo S10 (10 ppm), e do S1800 pelo S500. Países como os EUA e do bloco europeu já na década de 90 atingiam concentrações em seus óleos diesel de 15 ppm a 50 ppm, o que mostra a demora brasileira em conseguir adequar-se à realidade internacional (KLAJN, 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

Os ensaios foram realizados na Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, campus de Cascavel/PR. Para os ensaios de desempenho do motor e de emissões atmosféricas, utilizou-se o Laboratório de Máquinas Agrícolas – LAMA, e o poder calorífico das misturas combustíveis ensaiadas foi determinado no Laboratório de Biocombustíveis.

3.2 Configuração dos ensaios da pesquisa

O trator ensaiado dispunha de uma TDP com velocidade única de 540 rpm, com eixo entalhado de 6 (seis) estrias e diâmetro de 35mm. Foi utilizado para a conexão trator-dinamômetro um eixo cardã adequado para essa medida.

O tanque original do trator foi desconectado do sistema de injeção e um tanque externo com capacidade de 20 (vinte) litros foi utilizado nos ensaios.

Todos os dias antes de serem iniciados os ensaios era realizado um procedimento para que o mesmo atingisse condições de trabalho, onde o trator era acelerado à sua rotação nominal (2200rpm) e era aplicado manualmente uma carga durante o período de 20 (vinte) minutos. Este procedimento foi determinado aferindo-se as temperaturas da água de arrefecimento, temperatura do óleo do motor e temperatura do combustível, durante o tempo mínimo necessário para que as mesmas mantivessem níveis estáveis.

Entre cada ensaio com as diferentes misturas, os filtros, mangueiras e o tanque de combustível foram retirados e drenados, só então uma nova mistura era colocada no tanque externo para começar nova medição.

Cinco medições foram realizadas para todas as misturas, mas para minimizar/eliminar quaisquer influências de resquícios de uma mistura ensaiada na mistura à ensaiar, os dados da primeira das cinco repetições em cada tratamento foram descartados, sendo considerado nas avaliações somente as quatro repetições restantes.

A Figura 8 descreve um esquema de como foi montado o ensaio para coleta de dados da pesquisa, sendo:

- Em vermelho o sistema de medição do fluxômetro apresentando os fluxos de combustível do tanque externo, sistema da bomba injetora e a transmissão dos dados que se dá através de um cabo coaxial conectado ao dinamômetro;
- Em azul a coleta dos dados de emissão de gases através do analisador de combustão portátil, e que chegam até o computador através de um cabo USB;
- Em verde os dados do dinamômetro que são transmitidos através de uma conexão bluetooth e também os equipamentos complementares de medição que alimentam o software *EGGERS PowerControl*®.

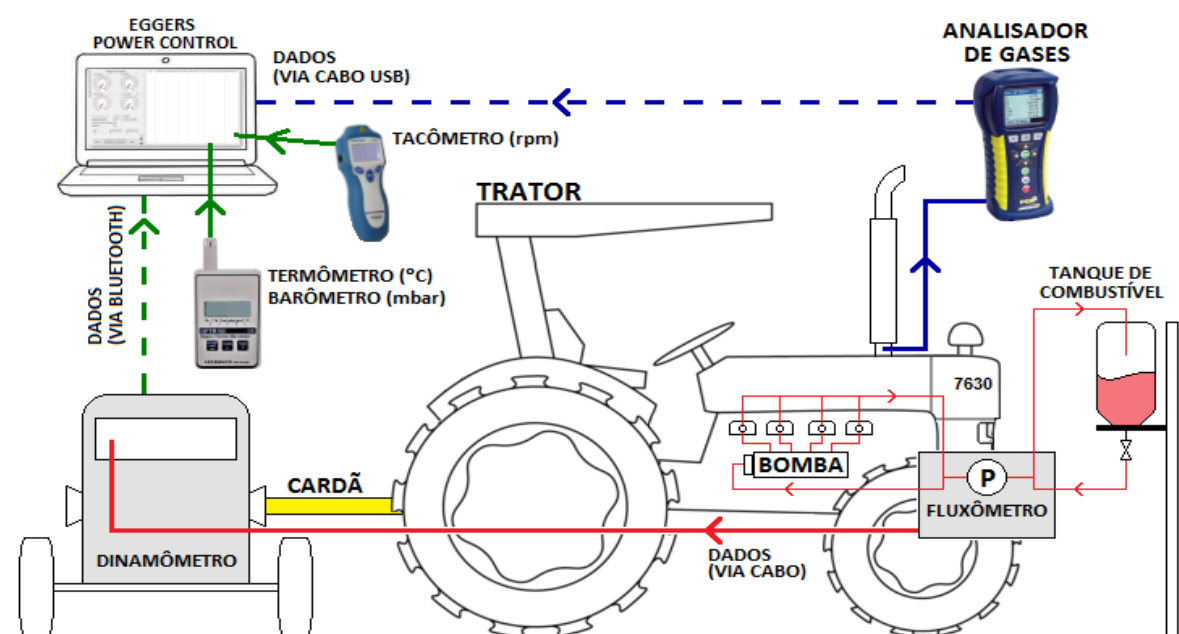


Figura 8 - Configuração do ensaio.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Trator ensaiado

A máquina utilizada foi um dos tratores do campus da UNIOESTE Cascavel, que estava em plenas condições de uso, e que é submetido à tarefas reais em aulas práticas, tais como preparo de solo, plantio, pulverização, etc. Trata-se de um trator marca Ford/New-Holland, modelo 7630 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA), ano de fabricação 1995 e que estava com 3196 horas de uso no início dos ensaios.

A Tabela 4 apresenta os dados técnicos do trator segundo o fabricante e a Figura 9 mostra uma imagem do mesmo acoplado ao dinamômetro na ocasião dos ensaios da pesquisa.

Tabela 3 - Dados técnicos do motor do trator ensaiado

Item	
Marca	New Holland
Aspiração	Turbo
Potência (NBR 5484)	75,8 kW a 2.200 rpm
Torque	407 N.m a 1.400 rpm
Reserva de torque	23%
Número de cilindros	4
Cilindrada	4.983 cm ³
Tipo de injeção	Bomba rotativa
Taxa de compressão	17,5:1

Fonte: Dados do fabricante



Figura 9 - Trator Ford/New Holland modelo 7630 utilizado para os ensaios.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Combustíveis e tratamentos

Nos ensaios do motor foram utilizados como combustíveis o diesel tipo A S500; biodiesel puro; e, etanol anidro (99,6% de pureza). O Diesel tipo A S500 e o Etanol Anidro foram adquiridos na Estrada Distribuidora de Derivados do Petróleo, em

Cascavel-PR. Já o biodiesel utilizado nos testes, foi gentilmente doado pela empresa BSBIOS - Indústria e Comércio de Biodiesel Sul Brasil S/A., de Marialva-PR.

Este biodiesel é produzido através da rota metílica e tem sua composição formada por: óleo de soja (68%); gordura bovina (25%); gordura de porco (5%); e óleo de aves (2%). Segundo o fabricante, além da utilização dessa gordura animal devido a sua disponibilidade, sua utilização também se deve ao fato de que essa gordura confere maior estabilidade ao biodiesel por possuir menor número de cadeias carbônicas insaturadas em relação ao óleo de soja.

As misturas foram preparadas em laboratório, sendo as frações medidas através de proveta graduada em escala de mililitros (ml). As misturas foram dispostas em recipientes de 20 (vinte) litros, e a sequência de elaboração foi sempre preencher a fração de diesel, depois a fração de biodiesel e ao final, a fração de etanol. As misturas foram preparadas 1 (um) dia antes de serem usadas, sendo agitadas após o preparo, e antes da utilização por cerca de 5 minutos.

Levando-se em consideração que a montadora do trator ensaiado obteve seus dados à época de sua fabricação (1995), e que o combustível da época era o diesel puro, foi realizado o ensaio com diesel puro tipo A S500 para contrastar os valores do fabricante com os desta pesquisa, e a nomenclatura utilizada foi B0E0, fazendo menção à 0% de biodiesel e 0% de etanol.

Para a elaboração das 16 (dezesesseis) misturas propostas, foi fixado o percentual de biodiesel de 7, 10, 15 e 20% do volume, sendo a fração de etanol adicionada, descontada da porcentagem do diesel puro. A Tabela 3 apresenta os tratamentos utilizados demonstrando a porcentagem (em volume) de cada um dos combustíveis em cada mistura.

Tabela 4 - Composição das frações de combustível nas misturas ensaiadas

Tratamento	Diesel "A"	Biodiesel	Etanol Anidro
		[%]	
B0E0	100	0	0
B07E0	93	7	0
B10E0	90	10	0
B15E0	85	15	0
B20E0	80	20	0
B07E1	92	7	1
B10E1	89	10	1
B15E1	84	15	1
B20E1	79	20	1

Tabela 3 - Continuação

Tratamento	Diesel "A"	Biodiesel	Etanol Anidro
	[%]		
B07E3	90	7	3
B10E3	87	10	3
B15E3	82	15	3
B20E3	77	20	3
B07E5	88	7	5
B10E5	85	10	5
B15E5	80	15	5
B20E5	75	20	5

3.5 Ensaios com dinamômetro

Para as medições de torque e potência, foi acoplado à TDP do trator um dinamômetro móvel (Figura 10) da marca Eggers, modelo PT170, que tem como princípio de funcionamento o freio magnético por correntes parasitas (correntes de *Foucault*), conforme detalhado no **ítem 2.1** deste trabalho.



Figura 10 - Dinamômetro EGGERS, modelo PT170.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o controle e configuração do dinamômetro foi utilizado o software Eggers *PowerControl*® v2.1, dedicado para este fim, produzido pela mesma empresa que construiu o dinamômetro. O equipamento é de fabricação alemã, e apresenta os dados de acordo com a norma DIN (*Deutsches Institut für Normung* ou Instituto Alemão para Normatização) número 70020. Esta norma figura como o procedimento

tradicionalmente adotado para determinação da potência líquida de motores em utilização contínua, uma vez que considera o trator em plenas condições de uso, devendo quaisquer um de seus acessórios (TDP, bomba hidráulica, ar-condicionado, etc.) estar funcionando antes e depois dos ensaios.

As inúmeras normas que se utilizam para os ensaios de potência dos motores de tratores e demais máquinas agrícolas apresentam algumas diferenças entre elas no intuito de atender às diferentes condições de funcionamento e aos distintos procedimentos adotados pelas estações de ensaio. Estas diferenças levam em consideração as variações nas configurações do motor e nas condições do ambiente.

A partir de dados de temperatura, pressão atmosférica e massa específica de cada combustível ensaiado, o *PowerControl*[®] executa os cálculos para correção dos valores, apresentando sempre ao final das medições, valores efetivos de potência na TDP segundo a norma DIN 70020.

As informações coletadas podem ser visualizadas em forma de tabela ou gráficos, elas ficam armazenadas num arquivo “.log” e também podem ser exportadas para softwares como Excel[®] para manipulação dos dados. A Figura 11 ilustra a tela de visualização dos dados durante os ensaios utilizando o *PowerControl*[®].

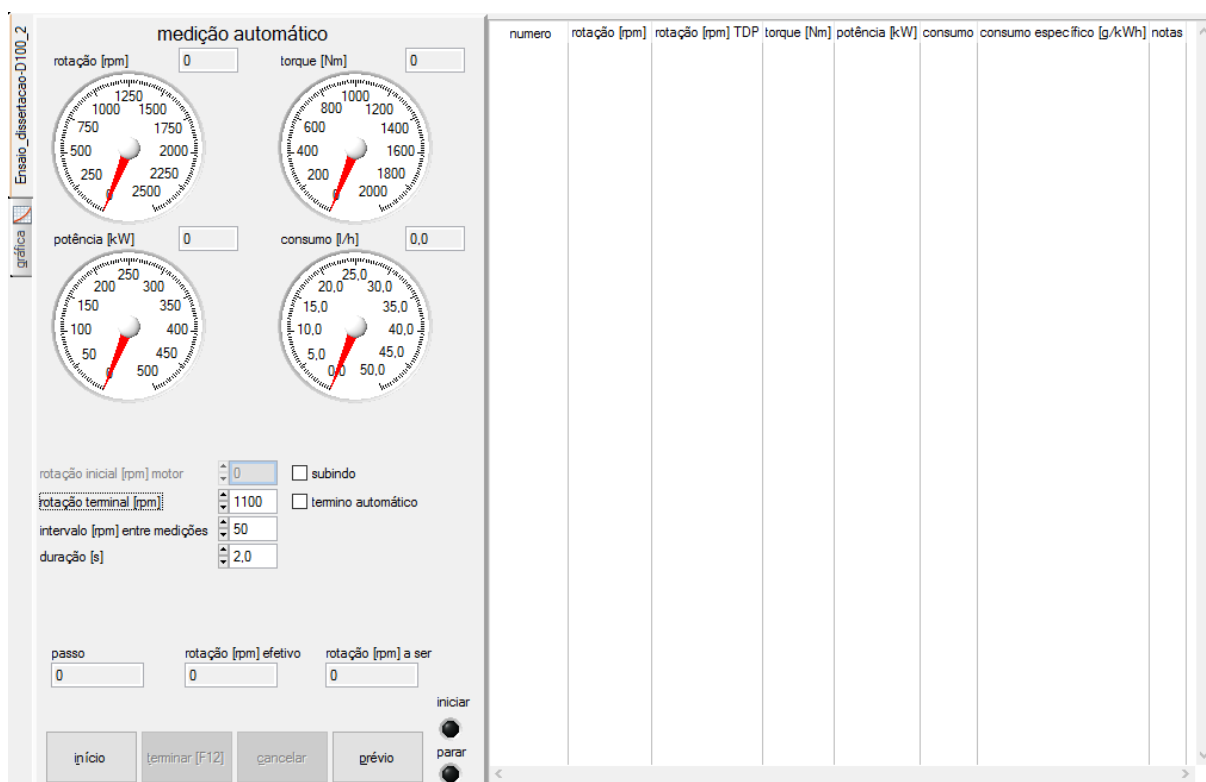


Figura 11 - Tela de visualização de dados do Software *EGGERS PowerControl*[®] v2.1.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Medições complementares

Para o software *PowerControl*® fazer as correções de valores de potência considerando as condições de ensaio, foi utilizado um Termo-higro-barômetro, marca GREISINGER, modelo GFTB-100 (Figura 12A), para medição da pressão atmosférica, umidade relativa e temperatura ambiente.

Também foi necessária a aquisição dos valores reais de rotação antes de cada ensaio dinamométrico, pois segundo Farias (2014), pode haver erros nos valores de rotação apresentados nos mostradores de tratores agrícolas. Neste caso, foi utilizado um tacômetro digital infravermelho, marca Peaktech, modelo 2790 (Figura 12B).



Figura 12 - Equipamentos complementares: (A) Termo-higro-barômetro; (B) Tacômetro digital.
Fonte: Elaborado pelo autor.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os dados dos equipamentos complementares de medição (termo-higro-barômetro e tacômetro, respectivamente) utilizados nos ensaios.

Tabela 5 - Dados técnicos do Termo-higro-barômetro GREISINGER GFTB-100

	Temperatura	Umidade	Pressão
Range	-25,0°C à +70,0 °C	0,0 à 100,0 %UR	10.0 à 1100.0 mbar
Resolução	0,1°C	0,1 %UR	0,1 mbar
Acurácia	±0,1°C	±2,5 %UR	±1,5 mbar
Ponta de medição	Pt100	Polímero capacitivo	Sensor piezoresistivo
Temperatura nominal	25,0°C		

Fonte: Dados do fabricante

Tabela 6 - Dados técnicos do tacômetro Peaktech 2790

Precisão	$\pm 0,05\% + 1$ dígito
Tempo de amostragem	0,5 sec (acima de 120 RPM)
Distância de medição	50 mm ~ 500 mm
Tipo de Laser	classe 2, Saída < 1 mW
Temperatura de operação	0°C ~ 50°C

Fonte: Dados do fabricante

3.7 Reserva de torque, reserva de rotação e índice de elasticidade

A partir dos valores medidos nos ensaios, foram calculados os seguintes parâmetros de desempenho: índice de elasticidade; reserva de torque; reserva de rotação; e faixa de utilização. Estes parâmetros combinados são importantes nas tomadas de decisão dos trabalhos do campo, para que se possa tirar maior proveito da máquina que se tem disponível.

O cálculo do índice de elasticidade (IE) foi realizado através da Equação 2:

$$IE = \left(\frac{T_{max}}{T_{pmax}} \right) - \left(\frac{RPM_{pmax}}{RPM_{tmax}} \right) \quad (2)$$

Onde:

T_{max} - Torque máximo observado (Ponto 2)

T_{pmax} - Torque de potência máxima observada (Ponto 3)

RPM_{pmax} - Rotação de potência máxima

RPM_{tmax} - Rotação no torque máximo

Já para a reserva de torque [%] é utilizada a Equação 3:

$$RT = \left(\frac{T_{max}}{T_{pmax}} - 1 \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

T_{max} - Torque máximo observado (Ponto 2)

T_{pmax} - Torque de potência máxima observada (Ponto 3)

E para o cálculo da reserva de rotação [%], a Equação 4:

$$RR = \left(\frac{RPM_{pmax}}{RPM_{tmax}} - 1 \right) * 100 \quad (4)$$

Onde:

RPM_{pmax} - Rotação de potência máxima

RPM_{tmax} - Rotação no torque máximo

A faixa de utilização (FU) é calculada pela simples diferença entre a rotação de potência máxima (RPM_{pmax}) e rotação de torque máximo (RPM_{tmax})

$$FU = RPM_{pmax} - RPM_{tmax}$$

3.8 Rendimento global do motor

Heywood (1988) descreve o rendimento global do motor à combustão como a relação entre a potência de saída do motor pela energia de entrada proveniente da queima do combustível, num certo intervalo de tempo. Essa medida de eficiência é definida conforme a Equação 5.

$$\eta = \left(\frac{W [kW]}{\dot{m} [g \ h^{-1}] \times PCI [kJ \ kg^{-1}]} \right) * 100 \quad (5)$$

Onde,

η - rendimento global;

$\dot{m}$ - vazão mássica de combustível ($g \ h^{-1}$);

PCI - poder calorífico inferior do combustível ($kJ \ kg^{-1}$);

W - potência efetiva do motor obtida no dinamômetro (kW).

Heywood (1988) define o consumo específico (C_{ESP}) como vazão mássica de combustível gasta por quilowatt (trabalho) gerado, conforme Equação 6:

$$C_{esp} = \frac{\dot{m} [g \ h^{-1}]}{W [kW]} \quad (6)$$

Através das Equações 5 e 6, obtemos a Equação 7, utilizada nos cálculos do rendimento global do motor.

$$\eta = \left(\frac{3.600.000}{C_{esp} [g \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}] \times PCI [kJ \text{ kg}^{-1}]} \right) \quad (7)$$

Onde,

3.600.000 é uma constante de ajuste para transformação de horas (h) em segundos (s) e gramas (g) em quilogramas (kg);

C_{esp} - consumo específico ($g \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$);

PCI - poder calorífico inferior do combustível ($kJ \text{ kg}^{-1}$);

3.9 Fluxômetro

Concomitantemente aos ensaios dinamométricos, foram feitas as medições do consumo específico ($g \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$) e consumo horário ($l \text{ h}^{-1}$) de combustível através de um fluxômetro, marca Eggers, modelo FM3-100 (Figura 13) conectado ao sistema de injeção do trator.



Figura 13 - Fluxômetro EGGERS modelo FM3-100.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 14 apresenta um fluxograma de funcionamento do fluxômetro utilizado nos ensaios. Para entendimento do sistema de medição deste equipamento, separou-se o mesmo em duas partes: antes e depois do medidor de pulsos (P). Inicialmente, porém, é necessário abrir a válvula V_1 (*by-pass* das duas partes do sistema de medição) por um período de tempo, para que seja purgado o ar do sistema, e antes de iniciar a medição essa válvula deve ser fechada.

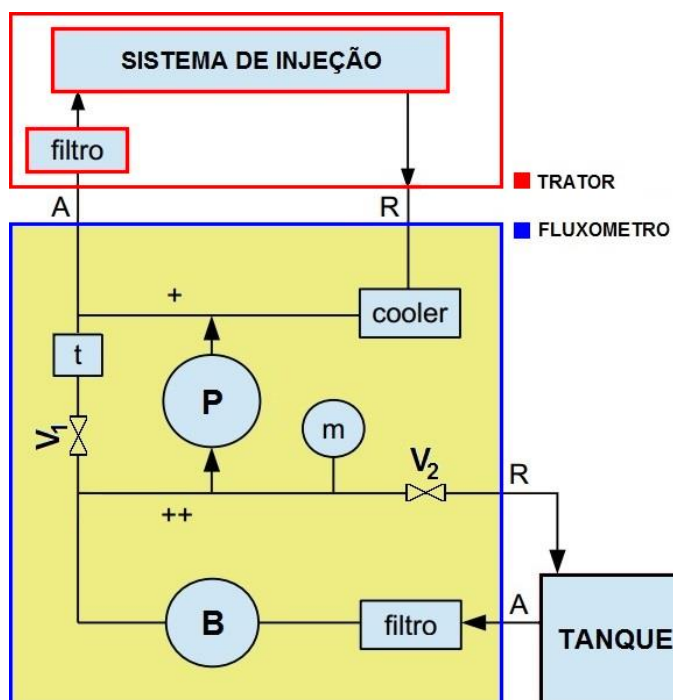


Figura 14 - Fluxograma do sistema de medição.
Fonte: Catálogo do fabricante.

Na primeira parte do sistema, o combustível flui do tanque de combustível utilizado (do próprio trator ou um tanque externo), passando por um filtro do próprio fluxômetro, bomba de sucção de combustível (B), manômetro (m), válvula reguladora de pressão (V_2) e então retorna ao tanque de combustível. A segunda parte só entra em funcionamento quando o trator é ligado, pois ao invés do combustível retornar ao tanque, o sistema de injeção irá fazer a sucção do combustível e ele passará pelo medidor de pulsos (P), que mensura o fluxo de combustível propriamente dito, e então entra no sistema de injeção do trator, passando pelo filtro do trator, bomba injetora, bicos injetores, e o excesso de combustível que sobra dos bicos, passa por um resfriador e vai novamente para o sistema de injeção do trator.

3.10 Bomba Calorimétrica

Para determinação do Poder Calorífico Superior (PCS), os combustíveis estudados foram submetidos a um calorímetro isotérmico modelo e2K, da marca *DDS Calorimeters* conforme mostrado na Figura 15-A.

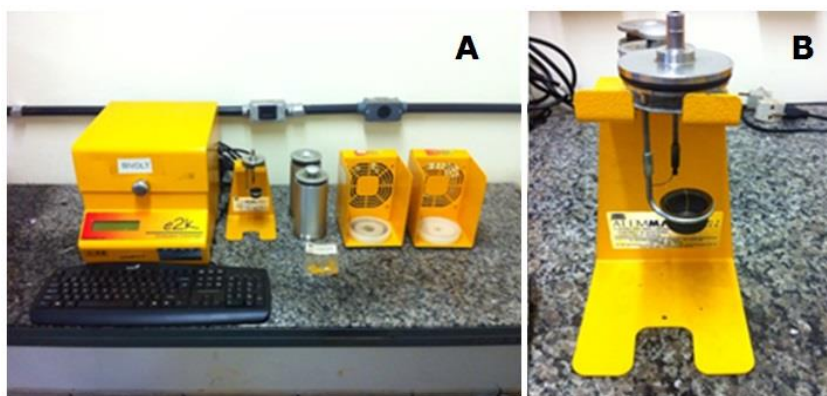


Figura 15 - (A) Calorímetro e2k para medição do Poder Calorífico Superior; (B) Cadinho metálico e fio de algodão (fio de ignição) preso à resistência.
Fonte: KLAJN, 2016.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) pode ser definido como o montante de energia desprendida em forma de calor após a combustão de determinado tipo de combustível, deduzidas as perdas com a evaporação da água presente no mesmo (QUIRINO et al., 2005). Portanto, para determinação do PCI, é necessário previamente medir o PCS e então deduzir o montante de energia fornecido pela água evaporada durante a combustão da misturas.

A bomba calorimétrica é um vaso com tampa, um suporte interno com resistência e um cadinho metálico. Inicialmente, são pesados cerca de 0,5 gramas da amostra em análise no cadinho metálico através de uma balança com precisão de quatro casas decimais. O cadinho é então colocado no suporte e um fio de algodão (fio de ignição) é amarrado à resistência e suas pontas imersas dentro do cadinho (Figura 15-B). Esse suporte é então acomodado dentro da bomba, a mesma é tampada e pressurizada a 3 MPa com oxigênio para então dar início à medição do poder calorífico. Cada medição foi realizada em triplicata e os resultados expressos em MJ.kg^{-1} e comparados pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Ao final das análises, realizou-se a medição do poder calorífico do ácido benzóico, que possui poder calorífico já determinado pelo fabricante, para fins de aferição do instrumento e correções dos valores, se necessário.

De posse do PCS, foi então determinado o PCI através da Equação 8 descrita por Volpato et al., (2009):

$$PCI = PCS - 3,052 \quad (8)$$

No qual:

PCI: Poder Calorífico Inferior (MJ kg^{-1});

PCS: Poder Calorífico Superior (MJ kg^{-1});

3,052: Constante.

3.11 Medições de emissões atmosféricas

Para a medição dos níveis de gases poluentes emitidos pela combustão das misturas no motor, foi utilizado um analisador de combustão da marca Bacharach, modelo PCA3-285. A tabela 7 apresenta os limites de medição dos sensores deste analisador.

Com este equipamento foi possível medir as emissões de NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) (ppm); CO (ppm); CO_2 (%) e Temperatura dos gases de exaustão ($^{\circ}\text{C}$). A avaliação destes parâmetros permite compreender a influência das diferentes misturas de diesel/biodiesel/etanol no processo de combustão.

Tabela 7 - Dados técnicos do medidor de combustão Bacharach PCA3-285

Gás	Faixa de leitura	Precisão
O_2	0,1 à 20,9 [%]	$\pm 0,3\%$
CO_{LOW}	0 à 4000 [ppm]	± 10 ppm
NO	0 à 3000 [ppm]	± 5 ppm
NO_2	0 à 500 [ppm]	± 5 ppm
Temperatura Ambiente	-20 à 537 [$^{\circ}\text{C}$]	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
		$\pm 2^{\circ}\text{C}$ entre 0 e 124 $^{\circ}\text{C}$
Temperatura Chaminé	-20 à 1200 [$^{\circ}\text{C}$]	$\pm 3^{\circ}\text{C}$ entre 125 e 249 $^{\circ}\text{C}$
		$\pm 4^{\circ}\text{C}$ entre 250 e 400 $^{\circ}\text{C}$

Fonte: Bacharach (2014).

A Figura 16 apresenta o analisador de combustão, com destaque para o local de inserção da sonda de medição, local este que deve ser vedado, sem interferência do ar externo ao escapamento.

Esta sonda conta com um termopar para medição da temperatura dos gases provenientes da combustão no motor e é conectada ao analisador através de uma mangueira com tubo para retenção da umidade e do material particulado. Os gases são succionados do escapamento através de uma bomba interna ao equipamento, passam pelos sensores do equipamento e são expelidos ao ambiente.



Figura 16 - Analisador de combustão portátil Bacharach PCA3-285.
Fonte: Elaborado pelo autor.

As medições das emissões de gases foram realizadas acelerando o trator até a rotação nominal (2200rpm) e aplicando 4 níveis de cargas manuais através do dinamômetro e mais uma medição sem carga, sendo:

- C1 = 100% do torque máximo;
- C2 = 75% do torque máximo;
- C3 = 50% do torque máximo;
- C4 = 25% do torque máximo; e,
- SC = sem carga (realizada na marcha lenta).

Para cada ponto, a medição foi realizada durante 3 (três) minutos, pois segundo o fabricante, é o tempo necessário para que os sensores estabilizem e o analisador apresente valores precisos. Os dados foram armazenados na memória do equipamento, que tem capacidade para 500 (quinhentas) leituras.

A Figura 17 representa o comportamento de uma curva de torque, mostrando os 5 (cinco) pontos onde foram realizadas as medições de emissões.

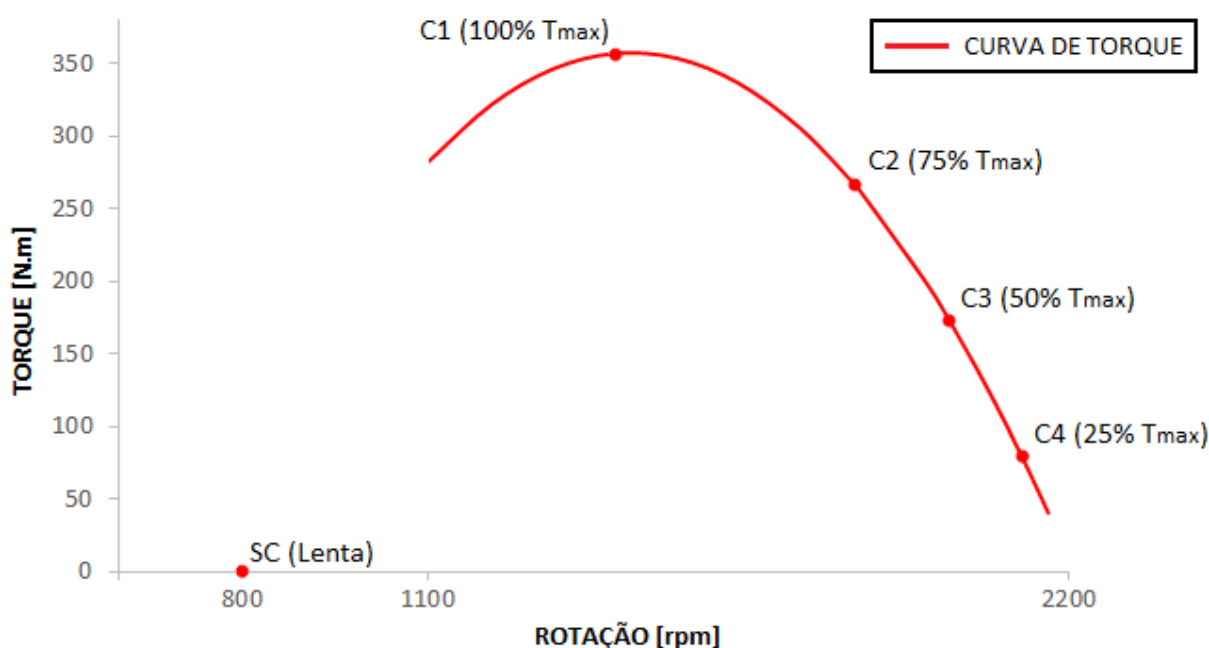


Figura 17 - Pontos da curva de torque para medição das emissões de gases do motor.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.12 Análise Estatística

Para análise estatística, foi utilizado o software livre Sisvar, versão 5.6, desenvolvido pela Universidade Federal de Lavras – UFLA. Nos experimentos de desempenho do motor foi realizada análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey com 5% de probabilidade de erro.

Os cálculos estatísticos foram realizados da seguinte forma:

- O experimento foi montado num esquema fatorial com dois fatores (% de biodiesel e % de etanol), em 4 níveis cada (7, 10, 15 e 20% de biodiesel e 0, 1, 3 e 5% de etanol), resultando num fatorial $2^4 = 16$ (dezesesseis) tratamentos, e mais uma análise com diesel puro, totalizando 17 (dezesete) combustíveis analisados. Foram determinados como variáveis resposta: Potência máxima (kW); Torque máximo (N m); Torque na potência máxima (N m); Consumo Específico de combustível ($\text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$); consumo horário de combustível [l h^{-1}]; reserva de torque (%); reserva de rotação (%); índice de elasticidade do motor; poder calorífico (MJ kg^{-1}); e, eficiência global do motor (%). As variáveis foram analisadas no intervalo de 2150 até 1100 rpm, com medições a cada

50 rpm, totalizando 22 (vinte e dois) pontos de medida de rotações do motor. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC) com 4 (quatro) repetições, caracterizando um arranjo experimental $17 \times 22 \times 4$.

- Em relação às emissões de gases poluentes do motor, foram consideradas como variáveis efeito, os níveis de emissões de O_2 (% vol.), NO_x (ppm), CO (ppm), CO_2 (% vol.), e temperatura dos gases de exaustão ($^{\circ}C$), sendo que as medições foram feitas uma única vez ao final dos ensaios de desempenho para cada um dos combustíveis avaliados, sem repetições, não havendo portanto análise estatística dessas variáveis.
- Para realização das medições de poder calorífico superior, foi extraída uma amostra de cada combustível do tanque utilizado nos ensaios e armazenada em frascos de vidro. Essas amostras foram levadas ao laboratório de biocombustíveis, onde foram realizadas, em triplicata, as medições em uma bomba calorimétrica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram discutidos baseados em duas premissas, desempenho do trator e emissões de gases. Os dados obtidos nos ensaios em quadruplicata foram tabulados e submetidos à análise de variância e teste de Tukey a 5% de probabilidade e as tabelas com os resultados dessas análises estão anexadas no Apêndice A ao final do trabalho.

As condições climáticas nos dias em que houveram ensaios não apresentaram variações bruscas. Na tabela 8, estão expostos os dados da variação de temperatura do ambiente e pressão atmosférica nestes dias.

Tabela 8 - Variação das condições do ambiente durante os ensaios

DATA	Temperatura (°C)		Variação (°C)	Pressão Atmosférica (mbar)		Variação (mbar)
	Máxima	Mínima		Máxima	Mínima	
07/10/2016	24,10	23,00	1,1	925,70	924,90	0,8
11/10/2016	25,00	23,30	1,7	930,00	928,10	1,9
12/10/2016	20,20	17,40	2,8	928,10	926,20	1,9
13/10/2016	18,00	17,80	0,2	926,30	925,30	1,0
14/10/2016	25,90	23,70	2,2	929,00	927,00	2,0

4.1 Massa específica a 20°C

Os valores de massa específica são essenciais para os ensaios, pois influenciam diretamente em propriedades como poder calorífico e número de cetano, consequentemente afetando a performance do motor (KLAJN, 2016; MOFIJUR et al., 2016). Os valores estão apresentados na Tabela 9, em kg m^{-3} .

Estes valores são necessários para o software Power Control® realize os cálculos de correção dos valores mensurados, para as condições de ensaio (mistura utilizada, temperatura e pressão atmosférica).

Todos os valores atenderam as especificações contidas na Resolução ANP nº 50/2013, e se situaram entre 815 a 865 kg m^{-3} . Para B0E0 o valor encontrado foi de 845 kg m^{-3} .

Tabela 9 - Valores absolutos medidos da massa específica (kg m^{-3})

% Biodiesel	% Etanol			
	0	1	3	5
7	846,7 Ad	845,6 Ac	845,3 Ab	844,5 Aa
10	847,9 Bd	847,3 Bc	846,6 Bb	845,7 Ba
15	849,8 Cd	848,2 Cc	847,5 Cb	846,6 Ca
20	850,4 Dd	849,1 Dc	848,6 Db	847,7 Da

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na COLUNA e médias seguidas de letras minúsculas iguais na LINHA, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Adaptado de Klajn (2016)

É possível verificar que o acréscimo de biodiesel aumenta a massa específica da mistura, enquanto o acréscimo de etanol tem efeito contrário, diminuindo o valor da massa específica. O maior valor de massa específica foi encontrado com a mistura com maior porcentagem de biodiesel e sem etanol (B20E0) $850,4 \text{ kg m}^{-3}$, e o menor valor com menos biodiesel e mais etanol (B7E5) $844,5 \text{ kg m}^{-3}$. BARABÁS, TODORUT e BALDEAN (2010), também avaliaram misturas com 5% de etanol e encontraram valores semelhantes para B5E5 (844 kg m^{-3}), B10E5 (845 kg m^{-3}), B15E5 (847 kg m^{-3}) e B20E5 (849 kg m^{-3}).

4.2 Estabilidade e solubilidade das misturas

Uma fração de cada uma das misturas ensaiadas foi extraída do tanque de combustível na ocasião dos ensaios de desempenho para realizar as medições de poder calorífico e também para uma inspeção visual a fim de analisar o comportamento da interação entre diesel, biodiesel e etanol através da coloração, homogeneidade e transparência dessas misturas à temperatura ambiente ($25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$).

O aspecto límpido de praticamente todas as misturas corrobora com dois fatos apresentados por alguns autores: o primeiro é que o etanol utilizado nas misturas ensaiadas do tipo anidro (99,6% de pureza), diminui a incompatibilidade entre etanol e diesel, pois possui pouca quantidade de água em suas moléculas, já que a água realça a polaridade do etanol fazendo com que este não seja miscível com o diesel puro, que possui moléculas não polares. O segundo aspecto é a presença do biodiesel, que atua como agente de ligação através da compatibilidade molecular para

produzir uma mistura homogênea entre diesel, biodiesel e etanol (FERNANDO e HANNA, 2004; KWANCHAREON, LUENGNARUEMITCHAI e JAI-IN, 2007).

Como o biodiesel é um alquil éster de ácidos carboxílicos de cadeia longa, com características semelhantes ao diesel, ele pode ser utilizado misturado ao diesel em qualquer proporção (KLAJN, 2016). Devido a esse fato, todas as misturas sem etanol (B7E0, B10E0, B15E0 e B20E0), se mostraram homogêneas, com aspecto translúcido, sem turbidez ou características de mudança de fase, como é possível visualizar na Figura 18.



Figura 18 - Combustíveis sem etanol (B0E0, B7E0, B10E0, B15E0 e B20E0).
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao incrementar 1% de etanol anidro às misturas (B7E1, B10E1, B15E1 e B20E1), houve apenas o clareamento da coloração, porém, sem nenhum aspecto distinto, como separação entre fases, com a aparência translúcida e homogênea preservada, conforme é possível visualizar na Figura 19.



Figura 19 - Combustíveis com 1% de etanol (B7E1, B10E1, B15E1 e B20E1).
Fonte: Elaborado pelo autor.

Já nas misturas com 3 e 5% de etanol, Figuras 20 e 21 respectivamente, foram observadas algumas peculiaridades. Os tratamentos B20E3 (Figura 20) e B15E5

(Figura 21) apresentaram uma pequena turbidez incomum. Se faz necessário fazer uma análise mais aprofundada para saber a razão deste comportamento.



Figura 20 - Combustíveis com 3% de etanol (B7E3, B10E3, B15E3 e B20E3).
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após 2 meses de armazenamento, houve formação de uma borra no fundo dos frascos das misturas B10E3, B15E3, B10E5 e B20E5, com indícios de glicerina residual presente no biodiesel. De acordo com Lôbo, Ferreira e Cruz (2009), no Brasil, é permitido até 0,02%_{vol.} de glicerina livre no biodiesel, e tem se observado a presença de glicerina em tanques de armazenamento de diesel-biodiesel.



Figura 21 - Combustíveis com 5% de etanol (B7E5, B10E5, B15E5 e B20E5).
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Poder calorífico inferior (PCI) das misturas (MJ kg⁻¹)

Como não houve significância para a interação entre os fatores biodiesel e etanol, ambos foram analisados separadamente, através do teste de Tukey a 5% para avaliar as diferenças entre as médias das frações de biodiesel em cada fração de etanol, e a média das frações de etanol, nas frações de biodiesel (Tabela 10).

Tabela 10 - PCI médio (MJ kg^{-1}) da variação das frações de biodiesel no etanol à esquerda e das frações de etanol no biodiesel à direita

%Etanol	Poder calorífico inferior	%Biodiesel	Poder calorífico inferior
0	41,00 C	7	40,88 C
1	40,72 BC	10	40,81 BC
3	40,53 B	15	40,44 AB
5	39,95 A	20	40,07 A
DMS: 0,425		CV: 0,95%	

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na COLUNA, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O PCI do biodiesel é em torno de 12% menor do que o do diesel puro (BUNCE et al., 2011), e o PCI do etanol em torno de 35% menor (RAHIMI et al., 2009). Embora ambos os combustíveis tenham causado efeito semelhante, onde o PCI da mistura diminuiu com o aumento do biodiesel e do etanol, a adição de etanol demonstrou afetar mais o PCI das misturas do que o biodiesel, já que houve um decréscimo no PCI de 2,56% com uma variação de 0 a 5% de etanol adicionado. Já com o biodiesel o decréscimo foi menor (1,98%), e a fração adicionada foi maior, de 7 a 20%.

O maior PCI foi mensurado com o diesel puro (B0E0) $42,40 \text{ MJ kg}^{-1}$. Entre os tratamentos propostos, o valor encontrado com a mistura combustível com teor estabelecido pela legislação (tratamento B7E0 e nome comercial B7) foi de $41,29 \text{ MJ kg}^{-1}$. Já o menor valor entre os tratamentos foi observado em B20E5 ($39,40 \text{ MJ kg}^{-1}$), que foi a mistura com maior porcentagem de biodiesel (20%) e maior porcentagem de etanol (5%).

4.4 Desempenho do motor utilizando diesel puro (B0E0)

Foi realizado o ensaio do trator com o diesel puro para fazer uma comparação das condições do mesmo quando novo em relação às suas condições antes dos ensaios com as misturas propostas. Os valores estão apresentados na Figura 22.

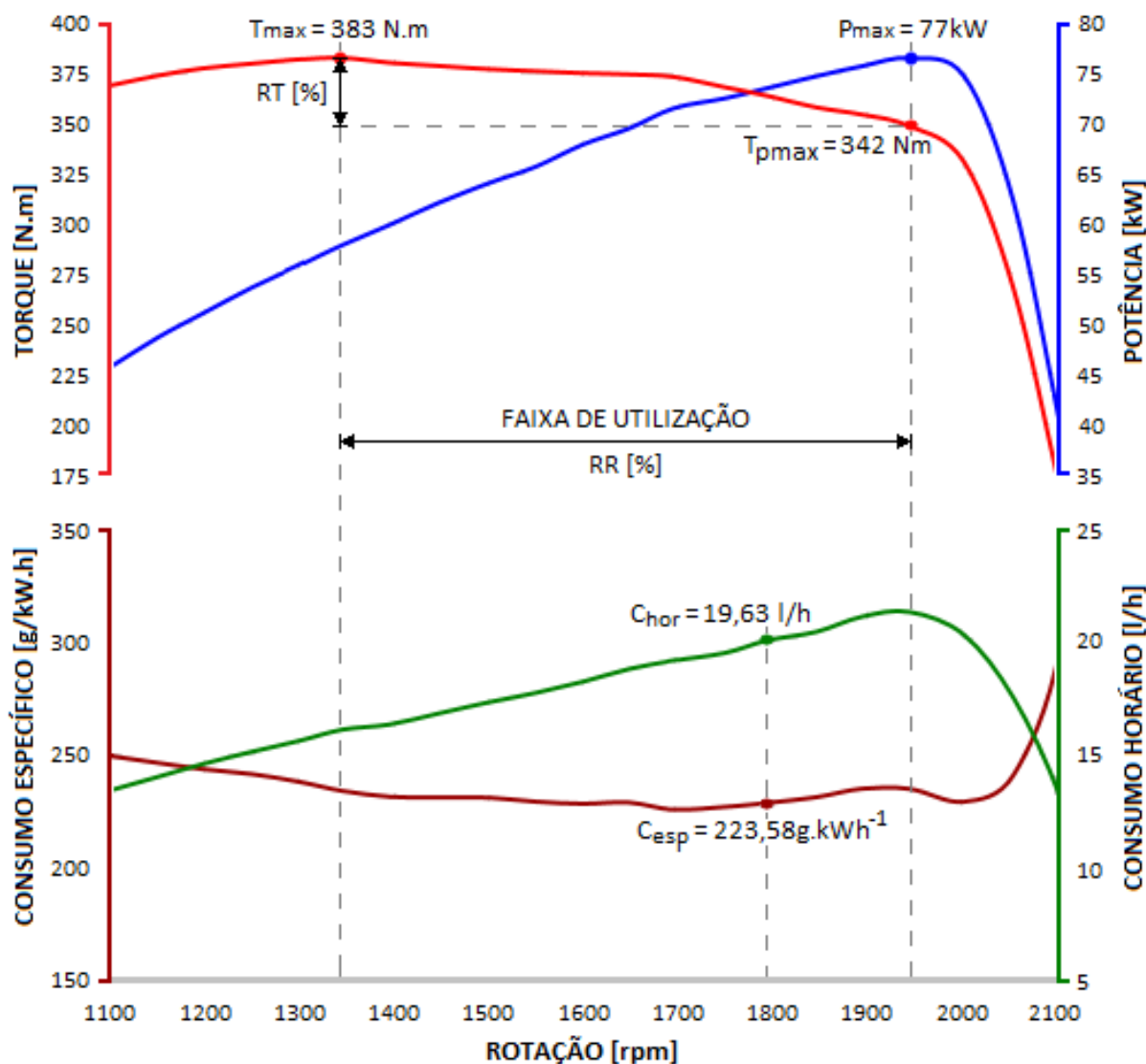


Figura 22 - Curvas de desempenho do trator ensaiado utilizando B0E0 (diesel puro).
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa parte do ensaio apresenta algumas ressalvas, já que a Tabela 4 mostra que os dados do fabricante do trator foram mensurados utilizando a norma NBR 5484, extinta, e que é uma norma diferente da adotada nesta pesquisa (DIN 70020). Também deve-se considerar a idade do trator (21 anos) e que o mesmo estava com 3.196 horas de uso, não sendo possível fazer uma comparação direta entre os valores do fabricante com os mensurados nesta pesquisa.

A potência máxima encontrada foi de 77 kW à 2003 rpm (Norma DIN 70020), sendo este valor 1,6% maior do que a potência informada pelo fabricante (75,8 kW a 2.200 rpm – Norma NBR 5484). Para o torque máximo o valor medido foi 383 N m à 1346 rpm, sendo 5,9% menor do que o indicado pelo fabricante de 407 N m à 1.400 rpm.

Outro valor que foi possível comparar, e que apresentou uma diferença muito significativa, foi a reserva de torque, onde foi calculada uma reserva de 12%, sendo esta 47,8% menor do que o valor informado pelo fabricante de 23%.

4.5 Desempenho dos tratamentos propostos

Para os tratamentos, os resultados encontrados foram contrastados com aqueles obtidos utilizando a mistura combustível com teor de biodiesel normatizado, considerada aqui como Tratamento B7E0, cujo nome comercial é apenas B7 (93% de diesel tipo A e 7% de biodiesel).

4.5.1 Potência (kW)

A análise de variância para os valores de potência máxima não apresentou significância para a interação entre os fatores biodiesel e etanol. A análise independente dos fatores, também não apresentou significância para a adição de biodiesel. O fator etanol, no entanto, mostrou diferença significativa ($p < 0,05$) entre as porcentagens à medida em que a fração deste combustível era aumentada, conforme é possível verificar na Tabela 11.

Tabela 11 - Potência máxima média (kW) da variação das frações de biodiesel no etanol à esquerda e das frações de etanol no biodiesel à direita

%Etanol	Potência máxima média*	%Biodiesel	Potência máxima média*
0	75,94 C	7	75,31 A
1	75,75 C	10	75,25 A
3	75,13 B	15	75,19 A
5	74,06 A	20	75,13 A
DMS: 0,56		CV: 0,79%	

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na COLUNA, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O gráfico da Figura 23 evidencia a tendência de perda de potência na TDP conforme se aumenta a fração de etanol nas misturas, com a máxima potência verificada em B0E0 destacada em vermelho e as menores, com 5% de etanol (B7E5, B10E5, B15E5 e B20E5) destacadas em rosa. Nos tratamentos, a mistura B20E0

obteve o maior valor com 76,25 kW à 1956 rpm, e a menor potência foi encontrada em B15E5 com 73,75kW à 1948 rpm.

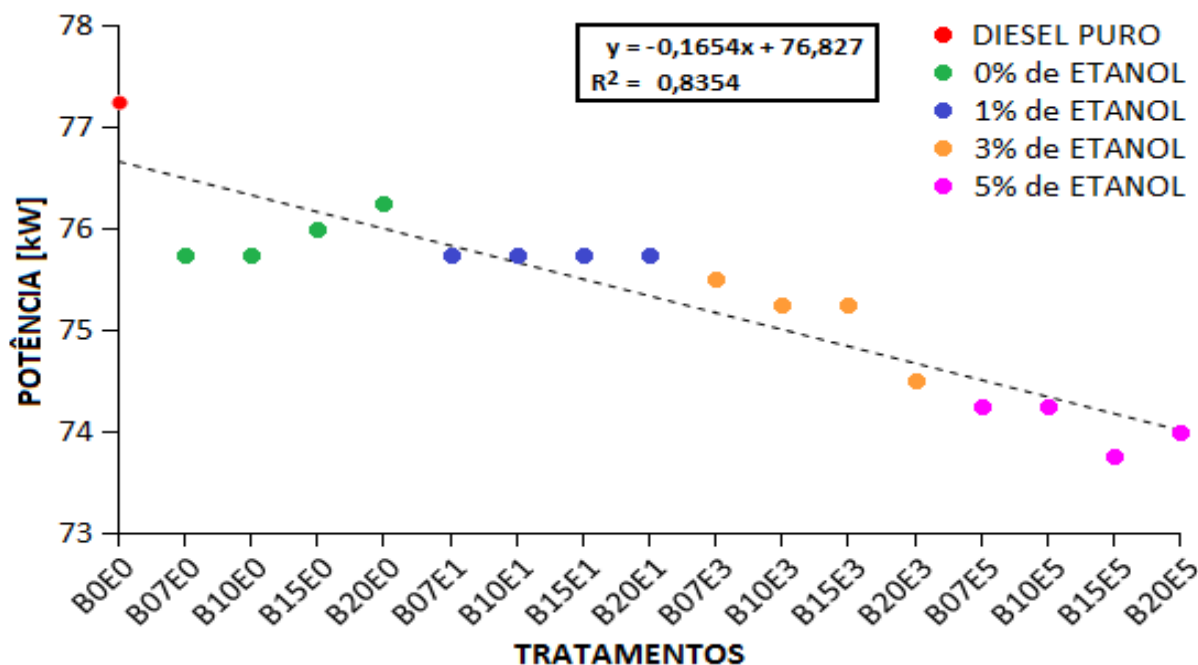


Figura 23 - Valor médio de potência máxima em cada um dos tratamentos.
Fonte: Elaborado pelo autor.

As misturas sem etanol, ou seja, apenas com adição de biodiesel ao diesel puro (B7E0, B10E0, B15E0 e B20E0), tiveram um comportamento, onde houve aumento da potência máxima, conforme se aumentou a porcentagem de biodiesel na mistura (Figura 24). Este comportamento peculiar difere de tudo o que foi observado na pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho.

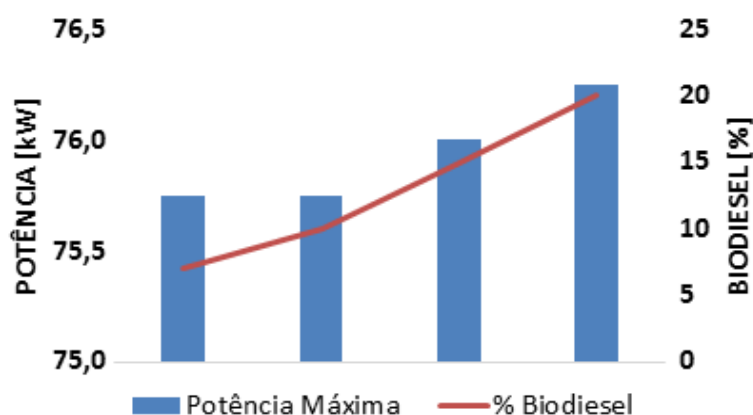


Figura 24 - Potência máxima dos tratamentos B07E0, B10E0, B15E0 e B20E0.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para rotação de potência máxima, os valores mostraram significância ($p < 0,05$) para a interação entre os fatores biodiesel e etanol no teste de análise de variância. A Tabela 12 apresenta esses valores para cada um dos tratamentos.

Tabela 12 - Rotação de potência máxima (rpm)

% Biodiesel	% ETANOL			
	0*	1	3	5
7	1956 Aa	1942 Aa	2002 Bb	1944 Aa
10	1943 Aa	1943 Aa	2003 Bb	1944 Aa
15	1944 Aa	1941 Aa	1943 Aa	1948 Aa
20	1997 Bb	2003 Bb	1944 Aa	1943 Aa

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na COLUNA e médias seguidas de letras minúsculas iguais na LINHA, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Para B0E0 e os tratamentos B20E0, B20E1, B7E3 e B10E3, a faixa de rotação para potência máxima foi de 2000 rpm (± 3 rpm) e nos demais tratamentos a rotação ficou na faixa de 1950 rpm (± 6 rpm). Essas variações podem ser explicadas pelo fato de que as características construtivas do motor (tipos de bicos injetores, ponto de injeção, etc) não serem completamente compatíveis com as misturas ensaiadas.

4.5.2 Torque (N.m)

A análise de variância mostrou significância ($p < 0,05$) para a interação biodiesel-etanol. Os valores médios de torque máximo e sua respectiva rotação de torque máximo foram comparados entre si pelo teste de *Tukey* (Tabela 13).

Tabela 13 - Torque máximo (N m) e rotação de torque máximo (rpm)

	%Biodiesel	% ETANOL			
		0*	1	3	5
TORQUE	7	381 Cc	372 Ab	377 Bbc	365 Aa
	10	376 ABc	375 ABbc	371 Ab	365 Aa
	15	373 Ab	375 ABbc	378 Bc	366 Aa
	20	379 BCb	378 Bb	375 ABb	365 Aa
ROTAÇÃO	7	1348 Bc	1300 Ab	1302 Ab	1254 Aa
	10	1298 Aa	1301 Aa	1301 Aa	1300 Ba
	15	1300 Aa	1350 Bc	1306 Ab	1303 Bab
	20	1299 Aa	1302 Aa	1353 Bb	1301 Ba

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na COLUNA e médias seguidas de letras minúsculas iguais na LINHA, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Os valores de torque quando comparados a B7E0, foram inferiores para todos os tratamentos, sendo que os menores valores mensurados ocorreram nas misturas de biodiesel com 5% de etanol (B7E5, B10E5, B15E5 e B20E5), sem diferença estatística entre elas. Os decréscimos de torque variaram para um mínimo de 0,5% em B20E0 ao decréscimo máximo de 4,2% em B7E5 e B20E5. Cheenkachorn e Fungtammasan (2009), comparando o desempenho das misturas diesel-biodiesel-etanol com o diesel fóssil, encontraram valores entre 4,4 a 8,7% de redução na entrega de força.

A Figura 25a demonstra a tendência do comportamento do aumento das frações de etanol (0, 1, 3 e 5%) em cada uma das porcentagens de biodiesel e a Figura 25b, mostra o comportamento contrário com o aumento das frações de biodiesel (7, 10, 15 e 20%), para as quatro porcentagens de etanol.

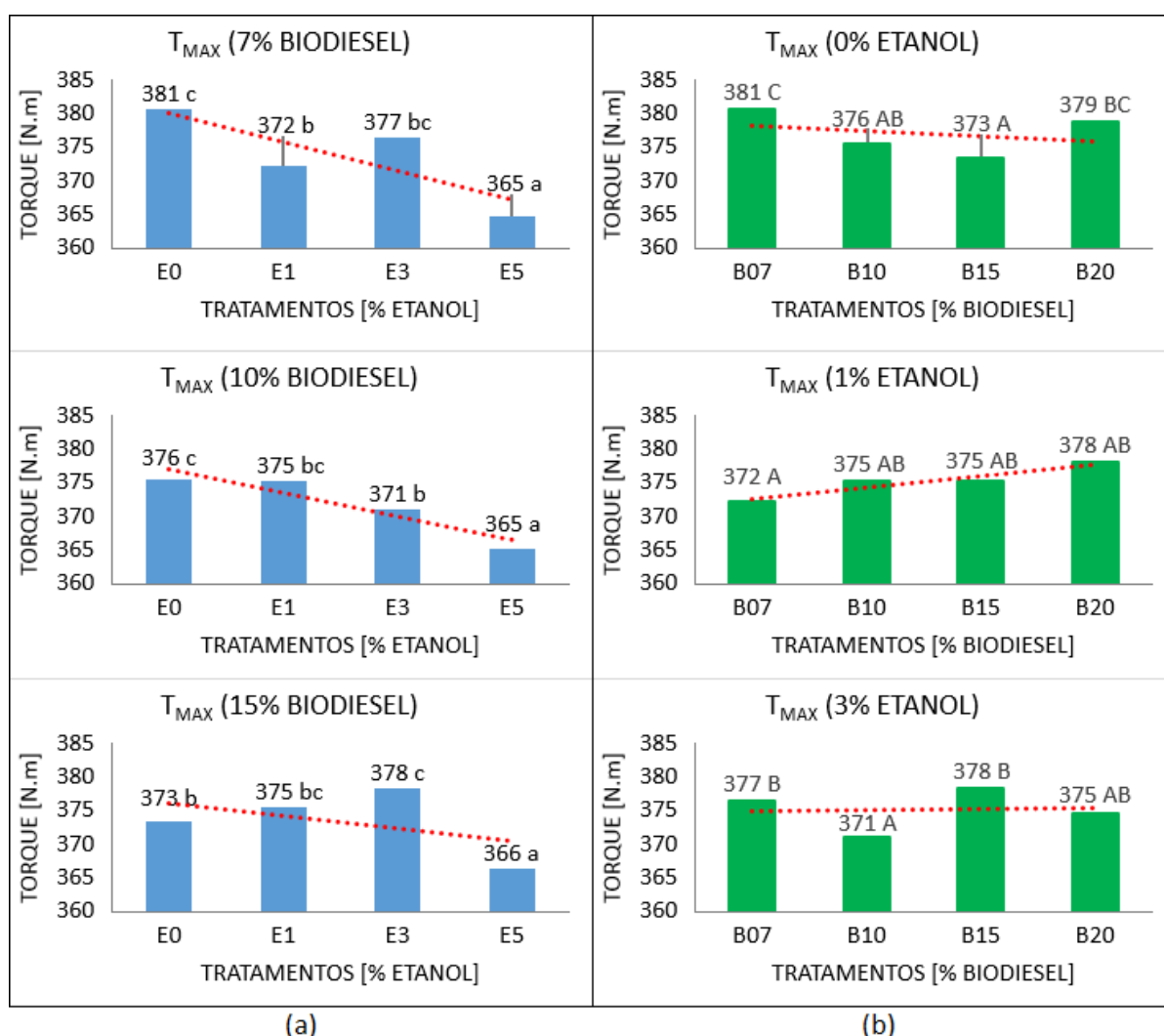


Figura 25 - Tendência dos valores de torque máximo para: (a) observação dos valores variando as frações de etanol; (b) observação dos valores variando as frações de biodiesel.

Fonte: Elaborado pelo autor.

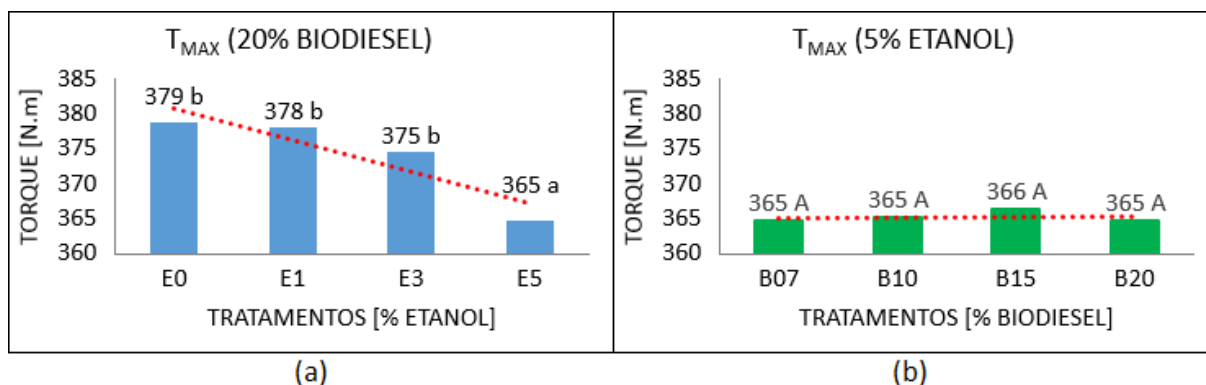


Figura 25 - Continuação.
Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira geral, o comportamento para os valores de torque na Figura 25a foram semelhantes ao que ocorreu com a potência, mostrando que a adição do fator etanol nas misturas diesel-biodiesel apresentou uma tendência de queda nos valores de torque para todas as misturas.

O mesmo comportamento não foi verificado quando considerada a adição do fator biodiesel às misturas com 0, 1, 3 e 5% de etanol (Figura 25b), mostrando comportamento regular de torque nas misturas com 0, 3 e 5% de etanol. Houve exceção nos valores com 1% de etanol (B7E1, B10E1, B15E1 e B20E1), que apresentaram uma tendência de aumento no torque, com um acréscimo de 1,6% de B7E1 (372 N.m) em relação à B20E1 (378 N.m).

O número de cetano do etanol, entre 5% e 7% (ESTRADA, 2015), mesmo que compensado pelo número de cetano mais alto do biodiesel, aproximadamente 6,9% maior do que o do diesel (SAYIN, GUMUS e CANAKCI, 2013), associado ao menor poder calorífico destes combustíveis (etanol e biodiesel) em relação ao diesel puro, são considerados como principais responsáveis pela redução na entrega de força ao motor (HULWAN e JOSHI, 2011; FERREIRA, 2013; LABECKAS, SLAVINSKAS e MAŽEIKA, 2014).

Moretti (2013) afirma que 3% é a maior porcentagem de etanol anidro que pode ser adicionada à uma mistura diesel-biodiesel-etanol para manter o número de cetano dentro dos padrões da Resolução 42 da ANP, 2011.

As rotações de torque máximo incidiram em três níveis: 1250; 1300; e 1350 rpm. Para 12 (doze) dos 16 (dezesseis) tratamentos, o torque máximo foi mensurado à uma rotação na faixa de 1300 rpm, em 3 (três) misturas, e também em B0E0 (diesel

puro) a faixa de rotação de torque máximo foi de 1350 rpm e, para uma única mistura (B7E15), a rotação de torque máximo foi mensurada na faixa de 1250 rpm.

Dentro dessas faixas, os combustíveis que tiveram o torque mensurado na faixa de 1350 rpm (B0E0, B7E0, B15E1, B20E3), foram os que apresentaram comportamento mais linear do motor, sem oscilações durante os ensaios. Estrada (2015), comenta que diferenças encontradas na rotação de torque máximo estão relacionadas com a relação estequiométrica dos combustíveis, visto que a adição de biodiesel e etanol ao diesel incrementa os níveis de oxigênio na combustão.

4.5.3 Consumo específico ($\text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$)

O ponto avaliado para o consumo específico (C_{esp}), é o menor valor encontrado desta variável dentro dos 22 (vinte e dois) pontos de rotação medidos. Segundo Mialhe (1996), este ponto retrata o maior rendimento termo-mecânico do motor, onde a maior quantidade de energia gerada pela combustão é transformada em trabalho mecânico, com menor consumo energético.

O teste de análise de variância mostrou significância ($p < 0,05$) para a interação entre os fatores biodiesel e etanol, portanto, as médias foram comparadas pelo teste de *Tukey* para avaliação das diferenças entre si, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Consumo específico mínimo ($\text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$)

% Biodiesel	% Etanol			
	0*	1	3	5
7	222,05 Aa	231,70 Ab	227,30 Aab	225,65 Aa
10	229,53 Ba	229,85 Aa	238,88 Cb	228,73 ABa
15	227,90 Bab	229,85 Aab	230,78 ABb	225,13 Aa
20	228,95 Ba	234,05 Aa	232,85 Ba	231,33 Ba

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na COLUNA e médias seguidas de letras minúsculas iguais na LINHA, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade de erro.

Analisando o aumento do biodiesel para cada fração de etanol, observou-se que nas misturas sem etanol (0%) houve um pequeno aumento do C_{esp} comparando B7E0 com as porcentagens B10E0, B15E0 e B20E0 - sem diferença estatística entre

elas. As misturas com 1% de etanol não apresentaram diferença para o aumento da porcentagem de biodiesel. Em 3% foi observado o maior valor no tratamento B10E3 (238,88 g kW⁻¹ h⁻¹), que é diferente estatisticamente dos demais, e em 5% observou-se um pequeno aumento em B20E5 em relação à B7E5, B10E5 e B15E5, que não se diferem entre si.

Comparando o incremento de etanol às frações de biodiesel, nas misturas com 7%, apenas B7E1 se difere dos demais. Nas misturas com 10% de biodiesel somente B10E3 se diferenciou das demais onde houve o pico de 238,88 g kW⁻¹ h⁻¹ no consumo específico. Nas misturas com 15% de biodiesel, B15E3 e B15E5 se diferenciaram estatisticamente das demais, e as misturas com 20% de biodiesel não apresentaram diferenças estatísticas entre elas.

Diversos autores observaram aumento no consumo específico de acordo com o aumento das frações de biodiesel e etanol, e explicam que isso ocorre devido ao menor poder calorífico das misturas ternárias diesel-biodiesel-etanol (HULWAN e JOSHI, 2011; BARABÁS et al., 2010; YASIN et al., 2014; SHAHIR et al. 2015). No entanto, o resultado estatístico mostrou que vários dados são iguais estatisticamente e essa afirmação não foi comprovada.

4.5.4 Consumo horário (l h⁻¹)

A variável consumo horário foi considerada, pois, usualmente é a que aparece nos sistemas de bordo dos tratores e outras máquinas agrícolas. O valor considerado ótimo, é o ponto de consumo horário correspondente ao menor consumo específico.

Segundo as análises de variância, houve significância ($p < 0,05$) apenas para o fator etanol. A Tabela 15 à seguir apresenta os dados de consumo horário médio de acordo com o aumento da fração de etanol e biodiesel.

Tabela 15 - Consumo horário médio para a variação das frações de biodiesel no etanol à esquerda e das frações de etanol no biodiesel à direita

%Etanol	Consumo horário (l/h)*	%Biodiesel	Consumo horário (l/h)*
0	18,53 AB	7	18,29 A
1	19,41 B	10	19,14 A
3	18,97 AB	15	18,94 A
5	17,69 A	20	18,22 A
DMS: 1,614		CV: 9,2 %	

*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na COLUNA, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Os valores médios não mostraram diferença estatística quando observado apenas o aumento das porcentagens de biodiesel.

Para o aumento das frações de etanol, foram estatisticamente diferentes apenas os valores com 1% e 5%, sendo que a média dos valores com 5% de etanol (B7E5, B10E5, B15E5 e B20E5) foi 8,86% menor do que a média observada nos valores com 1% de etanol (B7E1, B10E1, B15E1 e B20E1).

4.5.5 Eficiência global do motor (%)

Segundo Lapuerta et al. (2008), a eficiência global (rendimento global) do motor (η) é uma variável inversamente proporcional ao consumo específico, e considera que, junto com o poder calorífico, seja um indicador mais conveniente para análise do desempenho de um motor de combustão interna, quando se utilizam diferentes combustíveis. Mialhe (1996) relata que a máxima eficiência é alcançada no ponto de consumo específico mínimo.

Esse comportamento inverso ficou claro nos ensaios, e pode ser visualizado na Figura 26. Quando há picos de consumo específico, também há a queda na eficiência. Em B10E3 por exemplo, que foi o maior consumo específico encontrado ($238,88 \text{ g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$), foi observado a menor eficiência entre os tratamentos (36,94%).

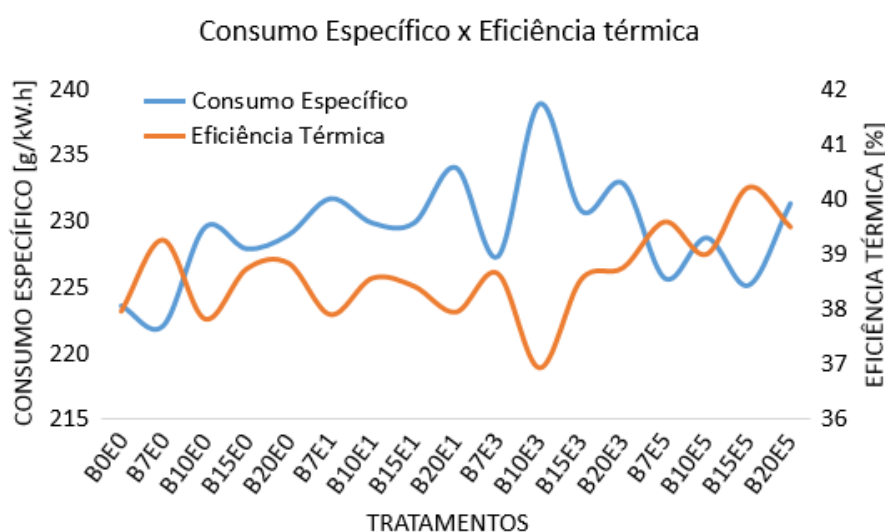


Figura 26 - Consumo específico mínimo e máxima eficiência térmica para cada tratamento.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 16 apresenta os valores de eficiência térmica do motor para as misturas ensaiadas.

Tabela 16 - Eficiência térmica (%) para os tratamentos avaliados

% Biodiesel	% ETANOL			
	0	1	3	5
7	39,27	37,91	38,66	39,60
10	37,83	38,57	36,94	39,01
15	38,74	38,42	38,55	40,22
20	38,84	37,95	38,76	39,50

A eficiência encontrada utilizando a mistura no teor determinado pela legislação (B7E0) foi de 39,27%. Çengel e Boles (2006), afirmam que a taxa de conversão energética (eficiência) característica de motores de combustão interna de ciclo diesel é em torno de 34% a 40%. Segundo dados da Tabela 16, todas as misturas avaliadas tiveram valores calculados dentro desse intervalo, mostrando que o motor apresentou boa eficiência para todas as misturas propostas, em especial o tratamento B15E5, que obteve o maior rendimento entre os tratamentos, passando dos 40% de eficiência.

A Figura 27 apresenta uma característica observada, onde a linha tracejada mostra uma “tendência” de aumento da eficiência térmica com o aumento das frações de biodiesel e etanol.

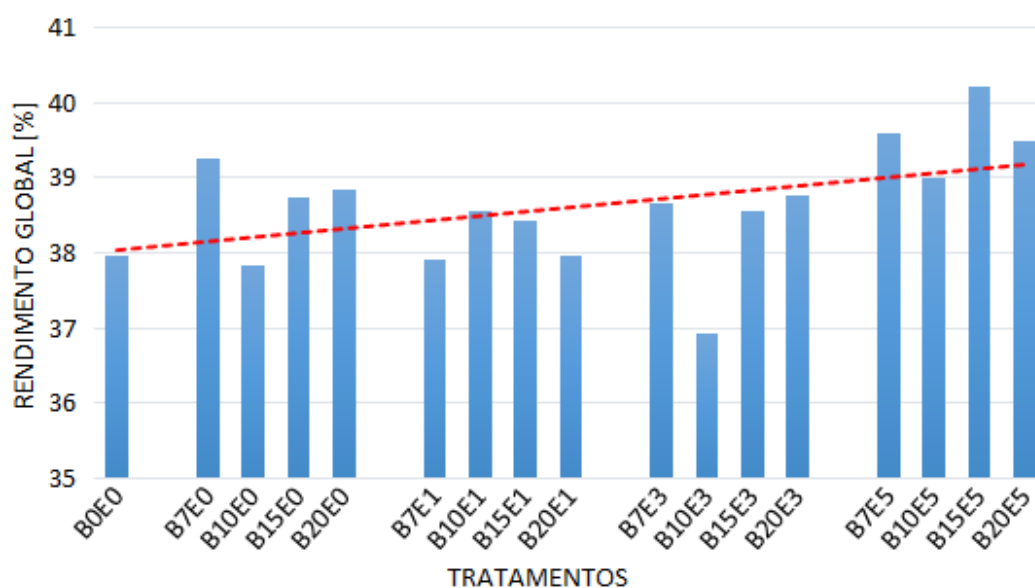


Figura 27 - Eficiência térmica com o incremento de biodiesel e etanol nas misturas.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Diversos autores corroboram com este fato, uma vez que, ao utilizarem biodiesel, misturas diesel-biodiesel, diesel-etanol e diesel-biodiesel-etanol, observaram que a eficiência térmica apresentou valores similares ou superiores ao diesel fóssil (LI et al., 2005; CANAKÇI e USTA et al., 2005; HOSOZ, 2006; LAPUERTA et al., 2008; FERREIRA et al., 2011; ZHU et al., 2011; LABECKAS et al., 2014).

Segundo Barbosa (2006), para que haja aumento da eficiência térmica no motor, uma vez que também foi observado perda de potência no mesmo com a adição de biodiesel e etanol, é necessário que haja melhora significativa na eficiência de combustão, e, segundo Guarieiro et al. (2009), é justamente a adição de combustíveis oxigenados como o etanol e biodiesel, que melhora a eficiência da combustão do diesel no motor.

Ou seja, ao passo que houve perda na entrega de força no motor devido à adição de biodiesel e etanol por razões já descritas anteriormente, esses compostos oxigenados fizeram com que houvesse uma melhora na combustão, o que acarretou no aumento da eficiência térmica do motor.

Subbaiah et al. (2010), constataram o aumento da eficiência térmica com o aumento da fração de etanol nas misturas diesel-biodiesel-etanol. Os autores afirmam ainda que o incremento de 20% de biodiesel de farelo de arroz possibilitou a adição de até 30% de etanol nas misturas, aumentando a eficiência térmica da mistura, quando comparada ao diesel puro.

Alguns autores atribuíram o aumento da eficiência do motor à carga aplicada a eles. Eles observaram que para cargas médias e altas, a eficiência térmica é maior, e nas cargas menores, notaram valores similares ao diesel puro (BARABÁS et al., 2010; KANNAN et al., 2012; FERREIRA et al., 2013).

4.5.6 Parâmetros de desempenho

Os itens tratados nesta pesquisa como índices e parâmetros de desempenho, são variáveis utilizadas para avaliar, especialmente, o comportamento de máquinas agrícolas, pois elas estão sujeitas a algumas barreiras e limitações para desenvolverem seus trabalhos de campo e essas variáveis podem ajudar nas tomadas de decisões. Os valores calculados para esses parâmetros estão expostos na Tabela 17.

Tabela 17 - Índices e parâmetros de desempenho em cada tratamento

Combustível	IE	RT [%]	RR [%]	FU [rpm]
B0E0	1,67	12	49	657
B07E0	1,61	11	45	608
B10E0	1,63	9	50	646
B15E0	1,62	8	50	644
B20E0	1,71	11	54	698
B07E1	1,60	7	49	642
B10E1	1,61	8	49	643
B15E1	1,55	8	44	591
B20E1	1,71	11	54	701
B07E3	1,71	11	54	701
B10E3	1,72	11	54	702
B15E3	1,62	9	49	637
B20E3	1,57	9	44	592
B07E5	1,67	8	55	690
B10E5	1,62	8	50	645
B15E5	1,62	8	49	645
B20E5	1,62	8	49	643

Mialhe (1996), caracteriza o intervalo ótimo de trabalho para o trator como faixa de utilização (FU). Essa faixa é limitada pelas rotações de torque máximo e rotação de torque nominal ou de potência máxima. Para os tratamentos analisados, as faixas de utilização se situaram entre 591 rpm em B15E1 e 702 rpm para B10E3.

O índice de elasticidade (IE) representa a capacidade do motor do trator de se autorregular para pequenas variações no torque. O IE está relacionado diretamente com a FU e com o torque máximo, portanto, quanto maior o torque e maior a FU, mais alto é este índice e mais “elástico” é o motor. Observou-se que o maior IE aconteceu na mistura B10E3, com índice de 1,72 e o menor índice (1,55) em B15E1, justamente as misturas com maior e menor FU, respectivamente.

Considerando as faixas de RT apresentadas por Mialhe (1996), todos os valores calculados foram considerados regulares ou ruins, sendo o maior valor observado em B0E0, com 12%, e em apenas cinco (B7E0, B20E0, B20E1, B7E3 e B10E3) dos dezesseis tratamentos a reserva de torque ficou dentro da faixa considerada regular, com 11%. Todos os demais tratamentos tiveram valores considerados ruins.

Farias (2014) afirma que, em tese, estes parâmetros deveriam ser levados em consideração na hora da escolha de um trator, já que indicam um melhor desempenho

da máquina, e a RT proporciona a diminuição da necessidade de trocas constantes de marchas, consequentemente, aumentando a capacidade operacional (área trabalhada em função do tempo) do conjunto mecanizado.

Nenhum comparativo será feito com a literatura, pois essas variáveis estão intimamente relacionadas aos aspectos construtivos do trator e só devem ser comparadas com motores e tratores de características semelhantes, operando com combustíveis semelhantes.

4.6 Emissões atmosféricas

Ao final dos testes de desempenho, para cada tratamento, foram mensuradas as emissões atmosféricas através do analisador de combustão portátil Bacharach PCA3. Os valores de emissões foram observados em 5 (cinco) níveis de medição, C1 (100% do torque máximo), C2 (75% do torque máximo), C3 (50% do torque máximo), C4 (25% do torque máximo) e SC (sem carga), medido com o trator na marcha lenta.

4.6.1 Gás oxigênio (O₂ %vol.)

A tabela 18 apresenta as variações dos percentuais médios de O₂ em cada uma das cargas aplicadas para os tratamentos, e também para B0E0.

Tabela 18 - Valores da concentração de O₂ (%vol.) nas cargas aplicadas

TRATAMENTOS	CARGA 1	CARGA 2	CARGA 3	CARGA 4	S/ CARGA
	100%	75%	50%	25%	Lenta
B0E0	7,20	10,40	12,30	14,40	18,70
B07E0	6,60	10,30	12,00	14,50	18,70
B10E0	7,10	10,60	12,30	14,40	18,70
B15E0	6,50	10,40	12,30	14,40	18,90
B20E0	6,60	10,30	12,20	14,40	18,50
B07E1	6,90	10,40	12,10	14,20	18,70
B10E1	7,10	10,50	12,10	14,60	18,70
B15E1	7,10	10,50	12,10	14,10	18,70
B20E1	7,40	10,70	12,20	14,40	18,80

Tabela 18 - Continuação

B07E3	7,00	10,70	12,40	14,40	18,80
B10E3	7,30	10,80	12,40	14,70	18,80
B15E3	7,10	10,70	12,20	14,40	18,70
B20E3	7,30	10,60	12,00	14,30	18,30
B07E5	6,90	10,70	12,40	14,50	18,80
B10E5	7,00	10,70	12,30	14,40	18,80
B15E5	6,90	10,60	12,20	14,40	18,80
B20E5	7,00	10,70	12,30	14,40	18,80
MÉDIA TRATAMENTOS	7,00	10,56	12,22	14,41	18,72
C.V. (%)	3,61	1,49	1,06	0,93	0,74

O comportamento desta variável não foi afetado nem com o aumento das porcentagens de biodiesel, nem com o aumento das porcentagens de etanol nas misturas, conforme é possível observar na Figura 28.

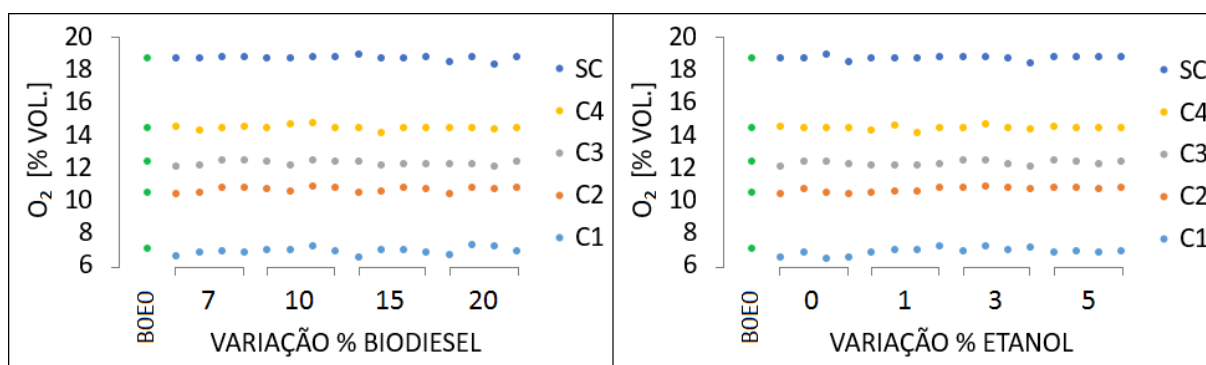


Figura 28 - Variação de O₂ nos fatores biodiesel e etanol para as 5 (cinco) cargas aplicadas.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29 é possível visualizar a tendência linear do decréscimo no volume de oxigênio à medida em que se aumenta a carga de torque, sendo a maior porcentagem de oxigênio medida sem carga (SC) com uma média entre os tratamentos de 18,72 % vol.

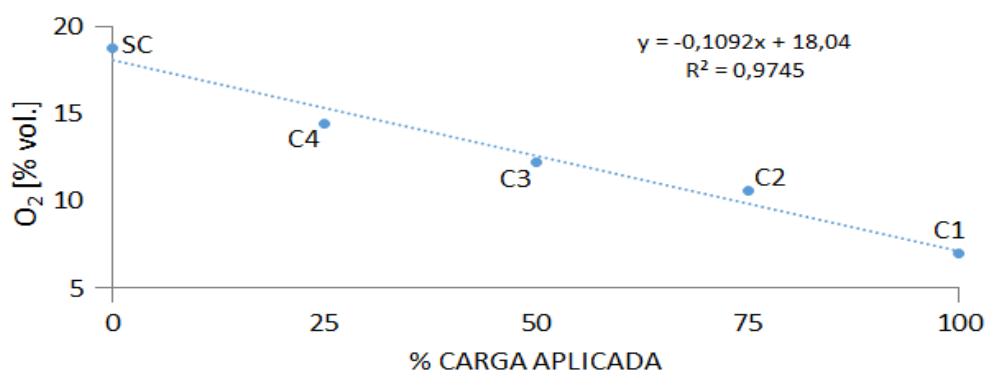


Figura 29 - Decréscimo da % vol. de O₂ excedente no analisador de combustão.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Estrada (2015) utilizando um percentual fixo de 5% de biodiesel (B5) e variando as porcentagens de etanol com incrementos de 3% (3%, 6%, 9%, 12% e 15%), obteve um valor médio de 18,53% vol. entre os tratamentos estudados. O autor explica que este resultado indica que nesse ponto (sem carga) a mistura ar/combustível na câmara de combustão é pobre, sendo a quantidade de combustível injetado, nesse momento, o mínimo necessário para manter funcionando o motor.

O efeito contrário se observa no ponto de maior carga (C1), com a média entre tratamentos de 6,99 %vol. de O₂. Isto indica que o aumento da carga no motor exige do sistema de injeção o enriquecimento da mistura ar/combustível fazendo com que mais O₂ seja utilizado na combustão.

4.6.2 Fração de óxidos de nitrogênio (NO_x ppm)

Os valores obtidos nos ensaios de emissões atmosféricas para os óxidos de nitrogênio (NO_x) estão expostos na Tabela 19, separados pela carga de torque aplicada ao trator.

Tabela 19 - Valores de NO_x (ppm) mensurados nos ensaios de emissões

TRATAMENTOS	CARGA 1	CARGA 2	CARGA 3	CARGA 4	S/ CARGA
	100%	75%	50%	25%	Lenta
B0E0	1222	1288	828	381	222
B07E0	1203	1101	751	336	185
B10E0	1111	1169	796	373	183
B15E0	1074	1156	784	376	175
B20E0	1162	1388	889	388	215
B07E1	1144	1067	731	339	193
B10E1	1000	1053	701	325	179
B15E1	1035	971	690	339	164
B20E1	970	1068	769	362	175
B07E3	916	837	527	279	164
B10E3	889	895	587	262	147
B15E3	873	863	618	293	162
B20E3	911	855	678	298	164
B07E5	727	665	372	241	145
B10E5	738	711	446	187	124
B15E5	741	661	504	237	147
B20E5	736	690	534	238	128

Se avaliarmos a distribuição da Tabela 19, é possível afirmar que com o aumento das frações de biodiesel e etanol, as emissões de NO_x diminuíram em todos os tratamentos de maneira linear. No entanto, assim como realizado com o torque e outras variáveis, analisou-se o aumento das frações de etanol (0, 1, 3 e 5%) em cada fração de biodiesel B7, B10, B15 e B20 (Figura 30a), e separadamente, o aumento das porcentagens de biodiesel (7, 10, 15 e 20%) nas frações de etanol E0, E1, E3 e E5 (Figura 30b).

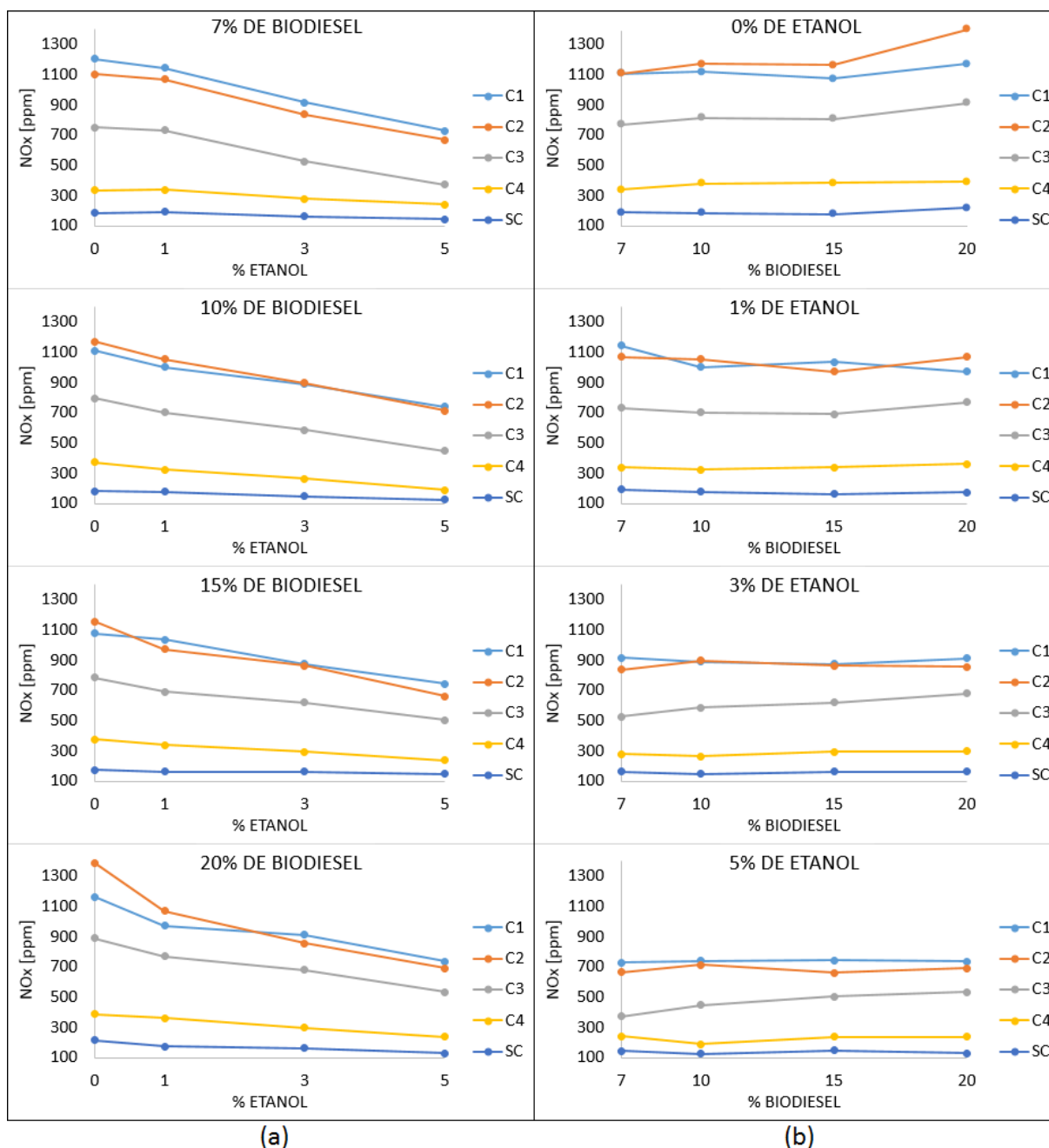


Figura 30 - Comportamento das emissões de NO_x (ppm) em cada carga. (a) observação dos valores variando as frações de etanol; (b) observação dos valores variando as frações de biodiesel.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 31 mostra claramente os efeitos do etanol (Figura 31a) e do biodiesel (Figura 31b) na mistura. Verifica-se que, na verdade, foi o aumento apenas do etanol nas porcentagens de biodiesel (B7, B10, B15 e B20), que causou a diminuição nas emissões de NO_x , pois, quando é considerado o acréscimo de biodiesel nas frações de etanol E0, E1, E3 e E5 (Figura 31b), as emissões de NO_x aumentam conforme aumenta a porcentagem de biodiesel à mistura.

Inúmeros autores estudaram misturas binárias diesel-biodiesel em motores sem modificação, e relataram que as emissões de NO_x aumentaram com a utilização de ésteres, considerando esse um dos grandes problemas quanto ao uso deste biocombustível em motores diesel (REIS et al., 2013; LABECKAS e SLAVINSKAS, 2009; Parada, Fabiani e Velázquez, 2012).

Os decréscimos observados foram de: 1,55 a 40,5% na carga C1; 14,52 a 46,42% na carga C2; 9,30 a 35,5% em C3; 11,57 a 37,36% em C4; e, 16,67 a 42,34% na marcha lenta (SC).

Os autores Randazo e Sodré (2011), encontraram um comportamento similar, onde as emissões de NO_x aumentaram com o uso do biodiesel, no entanto, esse aumento foi diminuído com a adição de etanol às misturas.

Jha et al. (2009), estudaram as emissões de motores novos e um usado, sob condições similares, utilizando misturas ternárias diesel-biodiesel-etanol (B25E5, B20E10 e B15E15). As misturas mostraram uma redução significativa nas emissões de NO_x nos motores novos conforme se aumentou a concentração de etanol. Já nos motores usados, houve aumento nas emissões de NO_x .

Guarieiro et al. (2009) avaliaram seis misturas ternárias diesel-biodiesel-etanol, com porcentagens de biodiesel de 7% e 15% e etanol com 3% e 5%. Em todos os tratamentos houve decréscimo nas emissões de NO_x . Comparado ao diesel puro, as emissões de NO_x representaram um decréscimo de 4 a 85%. Os autores afirmam que a eficiência de combustão do diesel, é melhorada com a adição de combustíveis oxigenados como etanol, biodiesel e óleos vegetais, resultando numa combustão mais completa em termos de emissões de NO_x .

Yasin et al., (2014), utilizando metanol como aditivo para a mistura diesel-biodiesel verificaram um aumento de mais de 13% nas emissões de NO_x .

4.6.3 Gás dióxido de carbono (CO₂ %vol.)

Watanabe et al. (1998), explicam que as emissões de CO₂ são produzidas pela combustão completa do combustível e que a forma ideal de combustão de hidrocarbonetos (diesel) deveria produzir apenas CO₂ e água (H₂O). Na prática, como o ar admitido no motor contém outros gases além de oxigênio, temos portanto, emissões de outros gases além do CO₂, como óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado.

Os dados coletados referentes as emissões de dióxido de carbono (CO₂), foram organizados na Tabela 20, de acordo com a carga de torque aplicada ao motor. Os baixos valores de CV mostram que os dados estão muito próximos dos valores médios, e que portanto, não houveram grandes variações.

Tabela 20 - Valores da concentração de CO₂ (% vol.) nas cargas aplicadas

TRATAMENTOS	CARGA 1	CARGA 2	CARGA 3	CARGA 4	S/ CARGA
	100%	75%	50%	25%	Lenta
B0E0	10,30	7,90	6,50	4,90	3,00
B07E0	10,70	8,00	6,70	4,80	2,80
B10E0	10,70	7,70	6,50	4,90	2,90
B15E0	10,80	7,90	6,40	4,90	2,70
B20E0	10,70	7,90	6,50	4,90	2,80
B07E1	10,50	7,90	6,60	5,00	3,10
B10E1	10,40	7,80	6,60	4,80	2,90
B15E1	10,40	7,80	6,60	5,10	3,20
B20E1	10,10	7,70	6,50	4,80	3,00
B07E3	10,40	7,70	6,40	4,90	2,90
B10E3	10,30	7,60	6,40	4,70	2,80
B15E3	10,40	7,70	6,50	4,90	2,90
B20E3	10,20	7,70	6,70	4,90	3,10
B07E5	10,50	7,60	6,40	4,80	2,80
B10E5	10,40	7,60	6,50	4,90	2,80
B15E5	10,50	7,70	6,50	4,90	2,80
B20E5	10,40	7,70	6,40	4,90	2,80
MÉDIA TRATAMENTOS (% vol.):	10,45	7,76	6,51	4,88	2,90
C.V. (%):	1,79	1,58	1,52	1,81	4,72

Ficou claro que houve decréscimo na porcentagem do volume amostrado de CO₂ conforme a carga aplicada ao motor foi decrescendo, sendo os maiores valores

observados para a carga C1, e decrescendo sucessivamente até zerar a carga na marcha lenta.

A Figura 31, mostra a tendência linear dos valores em aumentar conforme a carga aplicada, onde a equação de regressão com $R^2 = 0,98$ responde quase a totalidade dos dados.

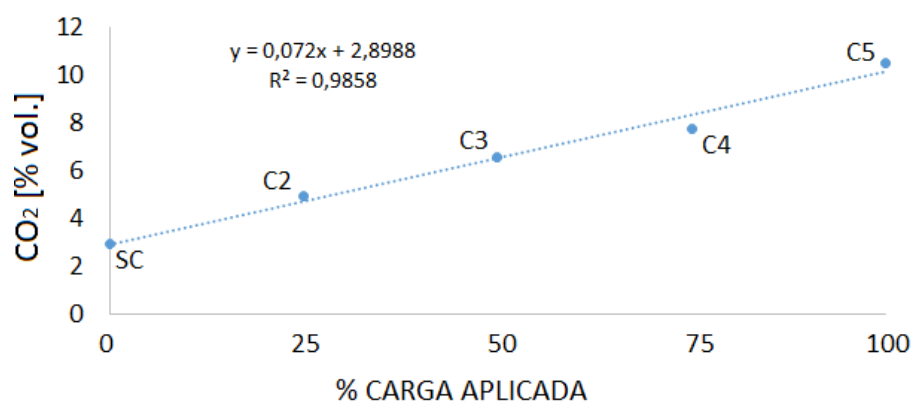


Figura 31 - Aumento na % vol. de CO₂ com aumento da carga aplicada.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Sayin et al (2013) o aumento das emissões de CO₂ com o aumento da carga é um comportamento esperado, o autor atribui esse comportamento ao aumento da temperatura de combustão e das taxas de oxidação devido ao aumento da pressão efetiva média no motor.

4.6.4 Fração de monóxido de carbono (CO ppm)

O monóxido de carbono (CO) é um gás tóxico. Trata-se de um subproduto da combustão de combustíveis à base de hidrocarbonetos, resultado de uma combustão incompleta. As emissões de CO estão diretamente ligadas à relação ar/combustível, pois, quanto mais rica a mistura, maior o percentual de CO produzido.

Visto que os motores diesel operam com misturas pobres (mais ar, menos combustível), uma alta taxa de CO no escapamento indica excesso de combustível ou falta de oxigênio na mistura; ou seja, presença de mistura rica (MOREIRA, 2008; CHALLEN e BARANESCU, 1999).

As emissões de CO estão normalmente abaixo dos valores limite legislados, não sendo motivo de atenção especial, desta forma, a análise do nível de CO para misturas pobres (cargas baixas), não tem utilidade (MOREIRA, 2008).

Os valores mensurados de CO (ppm), separados pela carga aplicada estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores de CO [ppm] mensurados nos ensaios de emissões

TRATAMENTOS	CARGA 1	CARGA 2	CARGA 3	CARGA 4	S/ CARGA
	100%	75%	50%	25%	Lenta
B0E0	2678	255	242	161	92
B07E0	2616	339	214	159	95
B10E0	2303	230	175	95	41
B15E0	2232	124	34	89	38
B20E0	2228	250	95	70	16
B07E1	2181	199	125	127	61
B10E1	2111	179	91	58	51
B15E1	1821	197	103	109	64
B20E1	1538	224	129	79	44
B07E3	2015	209	145	113	64
B10E3	1932	295	189	109	83
B15E3	2043	306	209	151	76
B20E3	1740	296	153	126	81
B07E5	1866	240	171	142	87
B10E5	1514	213	156	143	69
B15E5	1691	234	153	122	72
B20E5	1677	237	154	129	81

Para as cargas baixas e médias (SC, C4-25%, C3-50% e C2-75%), as emissões de CO das misturas não foram muito diferentes do que foi mensurado no diesel puro. No entanto, à plena carga (C1-100%), as emissões de CO apresentaram uma queda significativa. A redução do maior valor (2678 ppm), mensurado em B0E0, para o menor (1514 ppm), observado em B10E5, foi de 43,47%.

A Figura 32 mostra o comportamento das emissões de CO para a carga mais contundente (C1), comparando os 16 (dezesseis) tratamentos com o diesel puro. Em B7 e B10, o decréscimo foi praticamente linear, pois, quanto maior a fração de etanol, menores foram as emissões. Para B15, houve um pico de emissão em B15E3, e em B20, um pico de queda em B20E1, que foi o menor valor observado.

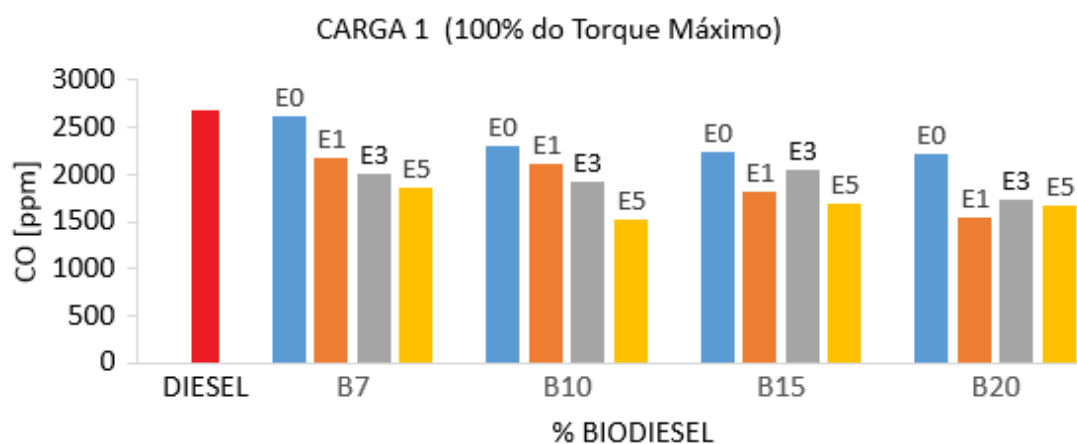


Figura 32 - Emissões de CO para a Carga 1 em cada porcentagem diesel-biodiesel.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Li et al. (2005) avaliaram 5 (cinco) composições diesel-etanol comparando-as com diesel convencional e aplicando cargas 10%, 50%, 75% e 100%. Os autores encontraram 49% de decréscimo nas emissões de CO nos valores à plena carga. Yasin et al. (2014) utilizando a mistura binária diesel-biodiesel com aditivação de metanol, encontraram até 18% de redução, comparada a mistura combustível ao diesel puro.

Já Barabás et al. (2010) utilizando misturas ternárias diesel-biodiesel-etanol, reportaram decréscimos nas emissões de CO de até 59% nas cargas mais altas.

Kwanchareon et al. (2007) também avaliaram misturas ternárias diesel-biodiesel-etanol, e afirmam que a adição de combustíveis oxigenados ao diesel resultou em um efeito pequeno em baixa e média carga, mas reduziu significativamente as emissões de CO nas cargas altas e à plena carga. Eles salientam que o impacto dessa mistura nas emissões de CO varia de acordo com as condições operacionais do motor e consideram o resultado obtido inconclusivo.

Agarwal (2007) relata que as pesquisas mostram que reduções acima de 30% dependem do tipo e idade do motor/veículo, do sistema de controle de emissões utilizado, e das condições atmosféricas em que se está operando.

No entanto, ao avaliar a carga mais contundente (C1), houve a constatação de que o aumento das frações de biodiesel e etanol provocou a redução nas emissões de CO para essa mesma carga.

Baseado na premissa de que a emissão de CO está ligada à qualidade da combustão, e que os combustíveis oxigenados melhoram este fator, o resultado é uma redução substancial nas emissões de CO (GUARIEIRO e GUARIEIRO, 2013).

4.6.5 Temperatura dos gases de exaustão (°C)

Assim como ocorreu com o oxigênio, o comportamento desta variável foi estável tanto para o aumento das porcentagens de biodiesel, quanto para o aumento das porcentagens de etanol nas misturas (Figura 33).

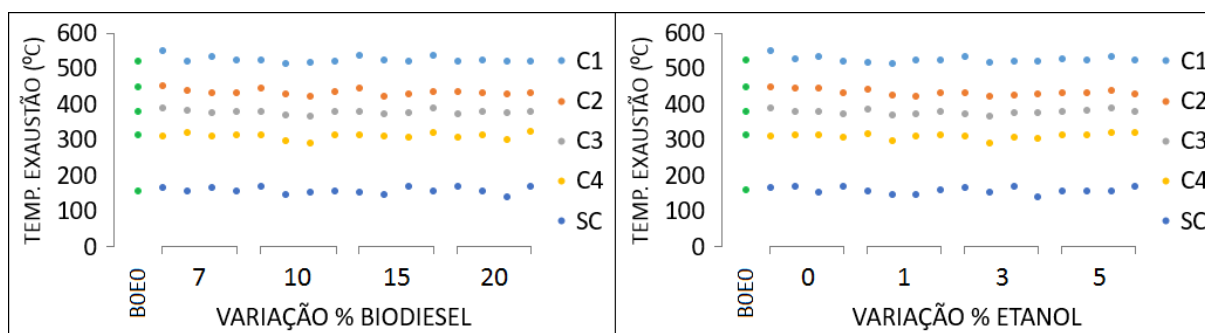


Figura 33 - Variação da temperatura de exaustão nos fatores biodiesel e etanol para as 5 (cinco) cargas aplicadas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao operar em plena carga (100% do torque), foram verificados os maiores valores da temperatura de exaustão. À medida em que a carga aplicada ao motor do trator foi diminuindo, os valores foram decrescendo linearmente. Esse efeito está exposto no gráfico da Figura 34, que apresenta os valores médios para cada carga.

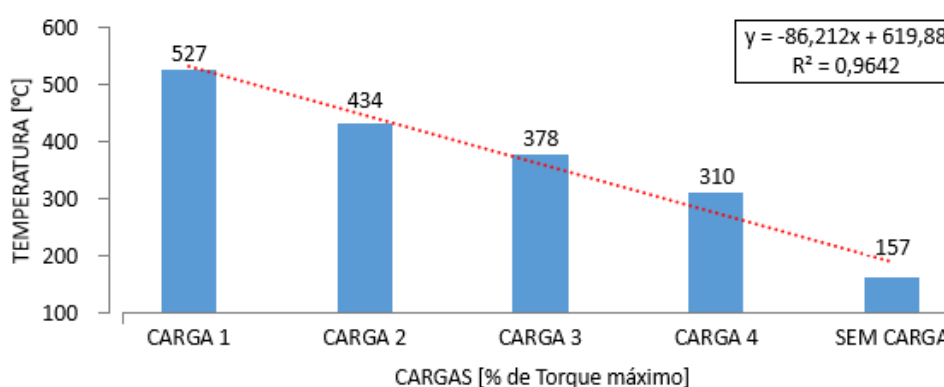


Figura 34 - Comportamento da temperatura dos gases de exaustão com a diminuição da carga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 22 mostra os dados de temperatura dos gases de exaustão (°C) de acordo com a carga de torque aplicada ao motor.

Tabela 22 - Temperatura dos gases de exaustão para as cargas aplicadas

TRATAMENTOS	CARGA 1	CARGA 2	CARGA 3	CARGA 4	S/ CARGA
	100%	75%	50%	25%	Lenta
B0E0	524	448	381	314	158
B07E0	559	449	389	311	164
B10E0	526	444	381	313	168
B15E0	535	444	380	313	152
B20E0	522	433	373	307	168
B07E1	519	441	386	318	155
B10E1	514	426	369	296	146
B15E1	525	422	372	310	146
B20E1	525	432	378	313	158
B07E3	533	431	374	310	164
B10E3	517	421	365	291	151
B15E3	522	426	375	307	169
B20E3	520	429	375	304	138
B07E5	527	432	380	314	155
B10E5	524	433	382	314	156
B15E5	535	437	388	320	157
B20E5	524	430	379	321	169
MÉDIA TRATAMENTOS	527	434	378	310	157
C.V. (%)	1,93	1,98	1,72	2,51	5,73

O fato da temperatura aumentar com a carga imposta ao motor do trator, indica que está ocorrendo o enriquecimento da mistura ar/combustível, ou seja, mais combustível está sendo utilizado na combustão. Os baixos valores de CV mostram que os dados estão muito próximos dos valores médios, e deste modo, não houveram grandes dispersões nos dados coletados.

He et al. (2003) ensaiaram misturas diesel-etanol e diesel-etanol-aditivo, aplicando seis cargas ao motor à rotação constante de 1700 rpm. Nas cargas baixas, a adição de etanol não provocou efeito na temperatura dos gases de exaustão, porém, nas cargas altas, foi verificado aumento da temperatura.

Estrada (2015) estudou misturas binárias diesel-etanol com um percentual fixo de 5% de biodiesel (B5), variando as porcentagens de etanol com incrementos de 3% (3%, 6%, 9%, 12% e 15%). O autor verificou que a adição de etanol à mistura, diminuiu

a temperatura dos gases em relação ao diesel puro. Os percentuais de decréscimo para B5E9, B5E12 e B5E15 foram 3,42 e 5,28%, e 8,20%, respectivamente.

Özener et al. (2014) utilizando como combustíveis misturas diesel-biodiesel de soja, afirmam que a adição de biodiesel resultou no decréscimo da temperatura dos gases de exaustão. Quando comparadas ao diesel puro, os autores verificaram que as temperaturas foram 1,46%, 2,92%, 3,02% e 5,03% mais baixas nas misturas B10, B20, B50 e B100 respectivamente.

Os resultados de temperatura dos gases de combustão encontrados nesse trabalho, não foram semelhantes ao que foi encontrado na pesquisa bibliográfica.

5. CONCLUSÕES

De maneira geral, as misturas mostraram um comportamento estável, com as características de homogeneidade preservadas mesmo após um longo período de estocagem, comportamento referendando com a análise visual das amostras.

Tanto a adição de etanol, quanto de biodiesel provocou redução nos valores de poder calorífico, sendo B10E0 o tratamento com o maior valor e B20E5 o menor.

Os ensaios de desempenho do trator ocorreram dentro da normalidade, não sendo encontrado nenhum fator que pudesse interferir significativamente em algum dos tratamentos, com os seguintes resultados:

- Foi verificado que os valores de potência se mantiveram estáveis com a adição de biodiesel, mas diminuíram com a adição de etanol para todas as misturas. Houve destaque para o fator 0% etanol (B7E0, B10E0, B15E0 e B20E0), pois o incremento do fator % biodiesel aumentou a potência máxima, sendo a potência em B20E0 maior do que em B7E0.
- Assim como na potência, o torque também teve seus valores reduzidos, à medida em que a fração de etanol foi adicionada às misturas. Comparados ao B7E0, os decréscimos de torque variaram para um mínimo de 0,5% em B20E0 ao decréscimo máximo de 4,2% em B7E5 e B20E5.
- O consumo específico não apresentou explicitamente um aumento com a adição de biodiesel e/ou etanol, tendo muitas misturas com valores iguais estatisticamente
- O biodiesel não provocou efeito significativo na eficiência térmica, no entanto, foi observado aumento da eficiência com a adição das frações de etanol. Houve destaque para o tratamento B15E5 que apresentou eficiência acima de 40%.
- Os índices e parâmetros de desempenho apresentaram valores considerados normais pela literatura, exceto para os valores de reserva de torque. Esses valores podem ter influência pela idade do trator e as condições de desgaste do seu motor, que não foram avaliados.

As emissões de gases provenientes da combustão apresentaram comportamento semelhante ao que foi encontrado nas pesquisas bibliográficas em trabalhos semelhantes, sendo que:

- A presença de oxigênio (O_2) nos gases diminuiu com o aumento da carga aplicada, uma vez que, quanto maior a carga mais oxigênio é necessário para a combustão.
- Comportamento inverso ocorreu com o dióxido de carbono (CO_2) – que está ligado à combustão de hidrocarbonetos (diesel). Quanto mais rica foi a mistura ar/combustível (cargas mais altas), maior foi a presença de CO_2 nos gases.
- Nos óxidos de nitrogênio, ficou evidente que o etanol causou diminuição das emissões desse gás em todos os tratamentos, com decréscimos de até 42%.
- As emissões de monóxido de carbono (CO) foram muito baixas para cargas baixas e médias. À plena carga porém, foi verificado que a adição de biodiesel e etanol, reduz a emissão de CO , sendo que o etanol tem efeito mais contundente.
- A temperatura dos gases de exaustão aumentou com o aumento da carga. Um fato reconhecido pela literatura de que a adição de combustíveis oxigenados (biodiesel e etanol), reduz a temperatura desses gases, não foi verificado neste trabalho.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

As características de desempenho tiveram decréscimo considerados toleráveis com o uso das misturas propostas. Os resultados de emissões foram satisfatórios, mostrando que essas misturas têm, no mínimo, um apelo ambiental. Cabe aqui, propor um estudo aprofundado de viabilidade econômica para estas misturas, considerando custos de produção, logística, disponibilidade desses biocombustíveis – principalmente o etanol, que tem oferta limitada devido as entressafras –, entre outros fatores, para entender se os mesmos são viáveis economicamente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, A. K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 3, p. 233–271, 2007.

ALCOFORADO, F. A. G. **Energia no mundo e no Brasil: energia e mundaça climática catastrófica no século XXI**. 1. ed. Curitiba: CRV, 2015.

ANFAVEA. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Tabelas Estatísticas**. São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/docs/site_maquinasagricolas2016.xlsx>. Acesso em: 30 jan. 2017.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 50, de 23 de dezembro de 2013**. Regulamenta as especificações do óleo diesel de uso rodoviário contidas no Regulamento Técnico ANP nº 4/2013. Rio de Janeiro: ANP, 2013.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2015**. Rio de Janeiro: ANP, 2016.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, **Seminário de Avaliação do Mercado de Combustíveis 2016 (Ano-Base 2015)**. Rio de Janeiro: ANP, 2016a.

ASAE. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEER. **SAE EP496.2: Agricultural Machinery Management**. St Joseph, 2003. p.367-372. ASAE EP496.2 (2003).

BACHARACH. Portable Combustion Analyzer PCA3. **Operation and Maintenance Manual. Instruction 0024-9472**. Rev. 3 – August 2014. 100p.

BARABÁS, I.; TODORUT, I. Utilization of biodiesel-diesel-ethanol blends in CI engine. In: **Biodiesel-Quality, Emissions and By-Products**. Cluj-Napoca: InTech, 2011. p. 21.

BARABÁS, I.; TODORUT, I.; BALDEAN, D. Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends. **Fuel**, v. 89, n. 12, p. 3827–3832, 2010.

BARBOSA, R. L. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel**. 2006. 55 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

BHALE, P. V.; DESHPANDE, N. V.; THOMBRE, S. B. Improving the low temperature properties of biodiesel fuel. **Renewable Energy**, v. 34, n. 3, p. 794–800, 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Resolução CONAMA Nº 18, de 6 de maio de 1986**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res1886.html>>. Acesso em 06 jul. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030 – Combustíveis Líquidos**. Brasília: MME/EPE, 2007. 98p

BRASIL, Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília: MME/EPE, 2014, 434p.

BRASIL. Congresso Nacional. **Lei n. 13.263, de 23 de março de 2016**. Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, que dispõe sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional. Brasília, DF, 2016.

BRIDI, C. D.; COSTA, C. A.; WANDER, P. R. Análise das expectativas sobre a implantação da Euro V no setor de transporte de passageiros. **Revista dos Transportes Públicos - ANTP**, p. 25–38, 2012.

BUNCE, M. et al. Optimization of soy-biodiesel combustion in a modern diesel engine. **Fuel**, v. 90, n. 8, p. 2560–2570, 2011.

CAN, Ö.; ÇELIKTEN, İ.; USTA, N. Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection Diesel engine running at different injection pressures. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 15–16, p. 2429–2440, 2004.

CASTANHEIRA, É. G. et al. Environmental sustainability of biodiesel in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 680–691, 2014.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo, SP: Mcgraw Hill, 2006.

CEZAR, G. V. **Desenvolvimento de uma bancada de testes para motores a combustão interna**. 2012. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CHALLENG, B.; BARANESCU, R. **Diesel Engine Reference Book**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

CHEENKACHORN, K.; FUNGTAMMASAN, B. Biodiesel as an additive for diesohol. **International Journal of Green Energy**, v. 6, n. 1, p. 57–72, 2009.

D'AGOSTO, M. DE A. et al. Evaluating the potential of the use of biodiesel for power generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 807–817, 2015.

DUNHAM, F. B.; BOMTEMPO, J. V.; FLECK, D. L. A Estruturação do Sistema de Produção e Inovação Sucroalcooleiro como Base para o Proalcool. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 10, n. 1, p. 35–72, 2011.

ESTRADA, J. S. **Desempenho e emissões de um motor de trator agrícola operando com misturas de óleo diesel e etanol**. 2015. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

FARIAS, M. S. **Avaliação de motores de tratores agrícolas utilizando dinamômetro móvel**. 2014. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014

FERNANDO, S.; HANNA, M. Development of a novel biofuel blend using ethanol-biodiesel-diesel microemulsions: EB-Diesel. **Energy & Fuels**, v. 18, n. 6, p. 1695–1703, nov. 2004.

FERREIRA, V. P. **Uso de misturas de diesel e biodiesel em motores de ignição por compressão suportado por aditivação de etanol**. 2013. 186p. Tese (Doutorado em Energia e Ambiente). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

GARCIA, O.; BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 2. ed. São Paulo: FEI (apostila), 1992.

GOLLO, S. S.; MEDEIROS, J. F.; PADILHA, A. C. M. **Configuração da cadeia produtiva do biodiesel, a partir da matéria-prima soja, no rio grande do sul/Brasil**. In: Estudos na cadeia produtiva do Biodiesel. Jaguarão/RS: Unipampa, 2012. p. 15–38.

GOME, S; GAUER, M. A.; SCHIRMER, W. N.; SOUZA, S. N. M. Análise da concentração mássica de materiais particulados provenientes da combustão de diesel e biodiesel. **Revista Ambiência**, v. 9, n. 2, p. 335–348, 2013.

GOODSTEIN, D. **Out of gas: the end of the age of Oil**. New York: W. W. Norton & Company, 2004.

GUARIEIRO, L. L. N.; PEREIRA, P. A. de P.; TORRES, E. A.; ROCHA, G. O.; ANDRADE, J. B. Carbonyl compounds emitted by a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel-diesel blends: Sampling optimization and emissions profile. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 35, p. 8211–8218, 2008.

GUARIEIRO, L. L. N.; SOUZA, A. F.; TORRES, E. A.; ANDRADE, J. B. Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO₂, and NO_x emitted by a diesel engine fuelled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 17, p. 2754–2761, 2009.

GUARIEIRO, L. L. N.; GUERREIRO, E. T. de A.; AMPARO, K. K. dos S.; TORRES, E. A.; ANDRADE, J. B. Estudo do perfil de distribuição de tamanho e número de partículas emitidas na queima de misturas de diesel/biodiesel/etanol. **XXII SIMEA**. Anais...São Paulo: XXII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, 2014

GUARIEIRO, L. L. N.; GUARIEIRO, A. L. N. Vehicle Emissions: What Will Change with Use of Biofuel? In: *Biofuels - Economy, Environment and Sustainability*. [s.l.] InTech, 2013. p. 31.

HALLIDAY, D. **Fundamentos da Física - Mecânica**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

HANSEN, A. C.; ZHANG, Q.; LYNE, P. W. L. Ethanol-diesel fuel blends: a review. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 3, p. 277–285, 2005.

HE, B.-Q. et al. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. **Atmospheric Environment**, v. 37, n. 35, p. 4965–4971, 2003.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. 1. ed. McGraw-Hill, 1988.

HULWAN, D. B.; JOSHI, S. V. Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 5042–5055, 2011.

JHA, S. K. et al. A comparative study of exhaust emissions using diesel-biodiesel-ethanol blends in new and used engines. **Transactions of the ASABE**, v. 52, n. 2, p. 375–381, 2009.

KLAJN, F. F. **Avaliação comparativa de diferentes proporções da mistura diesel-biodiesel-etanol e diesel-biodiesel frente ao diesel tipo “a”: Análises físico-químicas e de desempenho de um conjunto motor**. 2016. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016.

KWANCHAREON, P.; LUENGNARUEMITCHAI, A.; JAI-IN, S. Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. **Fuel**, v. 86, n. 7–8, p. 1053–1061, 2007.

LABECKAS, G.; SLAVINSKAS, S. Study of exhaust emissions of direct injection diesel engine operating on ethanol, petrol and rapeseed oil blends. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 3, p. 802–814, 2009.

LABECKAS, G.; SLAVINSKAS, S.; MAŽEIKA, M. The effect of ethanol-diesel-biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine. **Energy Conversion and Management**, v. 79, p. 698–720, 2014.

LAPUERTA, M. et al. Stability, lubricity, viscosity, and cold-flow properties of alcohol-diesel blends. **Energy & Fuels**, v. 24, n. 8, p. 4497–4502, 2010.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; GARCÍA-CONTRERAS, R. Stability of diesel-bioethanol blends for use in diesel engines. **Fuel**, v. 86, n. 10, p. 1351–1357, 2007.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; GARCÍA-CONTRERAS, R. Effect of ethanol on blending stability and diesel engine emissions. **Energy & Fuels**, v. 23, n. 9, p. 4343–4354, 17 set. 2009.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; HERREROS, J. M. Emissions from a diesel-bioethanol blend in an automotive diesel engine. **Fuel**, v. 87, n. 1, p. 25–31, 2008.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, n. 2, p. 198–223, 2008.

LI, D.; ZHEN, H.; XINGCAI, L.; WU-GAO, Z.; JIAN-GUANG, Y. Physico-chemical properties of ethanol-diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines. **Renewable Energy**, v. 30, n. 6, p. 967–976, 2005.

LILJEDAHN, J. B.; TURNQUIST, P. K.; SMITH, D. W.; HOKI, M. **Tractors and their Power Units**. 4. ed. New York: Avi Books, 1989.

LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. DA. Biodiesel: Parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1596–1608, 2009.

MACHADO, A. L. T.; REIS, Â. V. DOS; MACHADO, R. L. T. **Tratores para agricultura familiar: guia de referência**. 1. ed. Pelotas: Ed. Universitária UFPEL, 2010.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2006.

MARTYR, A. J.; PLINT, M. A. **Engine Testing: Theory and Practice**. 3rd. ed. Oxford: SAE International, 2007.

MASUM, B. M.; KALAM, M. A.; MASJUKI, H. H.; PALASH, S. M.; RIZWANUL FATTAH, I. M. Performance and emission analysis of a multi cylinder gasoline engine operating at different alcohol–gasoline blends. **RSC Advances**, v. 4, n. 53, p. 27898–27904, 2014.

MENEZES, E. W. de; SILVA, R.; CATALUÑA, R.; ORTEGA, R. J. C. Effect of ethers and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel fuel and on engine tests. **Fuel**, v. 85, n. 5–6, p. 815–822, 2006.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EDUSP, 1980. 367p.

MIALHE, L. G. **Introdução ao estudo da avaliação do desempenho de máquinas agrícolas**. Piracicaba, SP: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Cadernos da disciplina LEB, 466), 1987.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaio e certificação**. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996.

MOFIJUR, M.; RASUL, M. G. G.; HYDE, J.; AZAD, A. K. K.; MAMAT, R.; BHUIYA, M. M. K. Role of biofuel and their binary (diesel-biodiesel) and ternary (ethanol-biodiesel-diesel) blends on internal combustion engines emission reduction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 265–278, 2016.

MOREIRA, S. M. dos S. R. Influência do Biodiesel nas emissões poluentes de um motor turbo diesel. 2008. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto – Portugal, 2008.

MORETTI, R. R. Mistura Diesel, biodiesel e etanol anidro: uma possibilidade para reduzir o custo da cadeia de produção da cana-de-açúcar. 2013. Xx'p. Dissertação (mestrado em xxx) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Conferência Quadro sobre Mudanças Climáticas das Nações Unidas. Acordo de Paris. 21ª Conferências das Partes.** Paris, França: 2015.

ÖZENER, O.; YÜKSEK, L.; ERGENÇ, A. T.; ÖZKAN, M. Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. **Fuel**, v. 115, 2014.

PARADA, C.; FABIANI, M.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. O biodiesel na matriz energética Brasileira. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 12, n. 1, p. 94–111, 2012.

PARENTE, E. J. **DE S. Biodiesel: Uma aventura tecnológica num país engraçado.** 1. ed. Fortaleza: Tecbio, 2003.

PEREIRA, P. A. de P. SANTOS, E. T. S.; FERREIRA, T. de F.; ANDRADE, J. B. Determination of methanol and ethanol by gas chromatography following air sampling onto florasil cartridges and their concentrations at urban sites in the three largest cities in Brazil. **Talanta**, v. 49, n. 2, p. 245–252, 1999.

PINTO, A. C.; GUARIEIRO, L. L. N.; REZENDE, M. J. C.; RIBEIRO, N. M.; TORRES, E. A.; LOPES, W. A.; PEREIRA, P. A. de P.; ANDRADE, J. B. E. Biodiesel: an overview. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 16, n. 6b, p. 1313–1330, nov. 2005.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. dos S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, p. 100–106, 2005.

RAHIMI, H.; GHOBADIAN, B.; YUSAF, T.; NAJAFI, G.; KHATAMIFAR, M. Diesterol: An environment-friendly IC engine fuel. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 335–342, 2009.

RAKOPOULOS, C. D.; ANTONOPOULOS, K. A.; RAKOPOULOS, D. C. Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol–diesel fuel blends. **Energy**, v. 32, n. 10, p. 1791–1808, 2007.

RANDAZZO, M. L.; SODRÉ, J. R. Exhaust emissions from a diesel powered vehicle fuelled by soybean biodiesel blends (B3–B20) with ethanol as an additive (B20E2–B20E5). **Fuel**, v. 90, p. 98–102, 2011.

REIS, Â. V. dos.; MACHADO, A. L. T.; TILLMANN, C. A. da C.; MORAES, M. L. B. de. **Motores, tratores, combustíveis e lubrificantes**. 1. ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária - UFPel, 1999.

REIS, E. F. dos.; CUNHA, J. P. B.; MATEUS, D. L. S.; DELMOND, J. G.; COUTO, R. F. Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 5, p. 565–571, 2013.

REYES, Y. et al. Action Principles of Cosolvent Additives in Ethanol-Diesel Blends: Stability Studies. **Energy & Fuels**, v. 23, n. 5, p. 2731–2735, 21 maio 2009.

RIBEIRO, N. M. et al. The role of additives for diesel and diesel blended (ethanol or biodiesel) fuels: A review. **Energy and Fuels**, v. 21, n. 4, p. 2433–2445, 2007.

ROBERTS, P. **The end of oil: on the edge of a perilous new world**. New York: Houghton Mifflin Company, 2004.

ROCHA, G. O. et al. Química sem fronteiras: o desafio da energia. **Química Nova**, v. 36, n. 10, p. 1540–1551, 2013.

SAYIN, C.; GUMUS, M.; CANAKCI, M. Influence of injector hole number on the performance and emissions of a di diesel engine fueled with biodiesel-diesel fuel blends. **Applied Thermal Engineering**, v. 61, n. 2, p. 121–128, 2013.

SHAHIR, S. A. A. et al. Performance and emission assessment of diesel-biodiesel-ethanol / bioethanol blend as a fuel in diesel engines: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 62–78, 2015.

SHI, X. et al. Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine. **Fuel**, v. 84, n. 12, p. 1543–1549, 2005.

SOBRAL, S. P. et al. Determinação do índice de acidez total em bioetanol por titulação potenciométrica automatizada. **V Congresso Brasileiro de Metrologia**. Anais...Salvador: Livro de Resumos, 2009.

SRIVASTAVA, A.; PRASAD, R. Triglycerides-based diesel fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 4, n. 2, p. 111–133, 2000.

SUBBAIAH, G. V.; GOPAL, K. R.; HUSSAIN, S. A. The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on the performance and emission characteristics of a direct injection diesel engine. **Iranica Journal of Energy & Environment**, v. 1, n. 3, p. 211–221, 2010.

THOMAS, C. A. K. **Análise de veículos para atividades agrícolas por meio do consumo de combustível e torque na tomada de potência**. 2010. 151p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

TORRES-JIMENEZ, E.; SVOLJAK-JERMAN, M.; GREGORC, A.; LISEC, I.; DORADO, M. P.; KEGL, B. Physical and chemical properties of ethanol-biodiesel blends for diesel engines. **Energy & Fuels**, v. 24, n. 3, p. 2002–2009, 18 mar. 2010.

VOLPATO, C. E. S.; CONDE, A. do P.; BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N. Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B100). **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 33, n. 4, p. 1125–1130, 2009.

WATANABE, H.; TAHARA, T.; TAMANOUCI, M.; IIDA, J. Study of the effects on exhaust emission in direct injection diesel engines: effects of fuel injection system, distillation properties and cetane number. **JSAE Review**, v. 19, n. 1, p. 21–26, 1998.

YASIN, M. H. M.; YUSAF, T.; MAMAT, R.; YUSOP, A. F. Characterization of a diesel engine operating with a small proportion of methanol as a fuel additive in biodiesel blend. **Applied Energy**, v. 114, p. 865–873, 2014.

ZHU, L.; CHEUNG, C. S.; ZHANG, W. G.; HUANG, Z. Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol-biodiesel blends. **Fuel**, v. 90, n. 5, p. 1743–1750, 2011.

APÊNDICES

Apêndice A - Resultados da análise de variância

Potência máxima

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	0.312500	0.104167	0.294	0.8296
F2_ETA	3	34.312500	11.437500	32.294	0.0000
F1_BIO*F2_ETA	9	3.312500	0.368056	1.039	0.4237
erro	48	17.000000	0.354167		
Total corrigido	63	54.937500			
CV (%) =	0.79				
Média geral:	75.2187500	Número de observações:		64	
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 0,56015128503427 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 0,148779758927976					

Rotação de potência máxima

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	6242.296875	2080.765625	36.382	0.0000
F2_ETA	3	6419.421875	2139.807292	37.414	0.0000
F1_BIO*F2_ETA	9	26276.390625	2919.598958	51.048	0.0000
erro	48	2745.250000	57.192708		
Total corrigido	63	41683.359375			
CV (%) =	0.39				
Média geral:	1958.7031250	Número de observações:		64	
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 7,11822687728337 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 1,89064652191607					

Torque máximo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	45.000000	15.000000	2.933	0.0428
F2_ETA	3	1360.625000	453.541667	88.676	0.0000
F1_BIO*F2_ETA	9	269.875000	29.986111	5.863	0.0000
erro	48	245.500000	5.114583		
Total corrigido	63	1921.000000			
CV (%) =	0.61				
Média geral:	373.1250000	Número de observações:		64	
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 2,12866159208939 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 0,565386114379663					

Rotação de torque máximo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	3090.171875	1030.057292	95.311	0.0000
F2_ETA	3	6964.421875	2321.473958	214.806	0.0000
F1_BIO*F2_ETA	9	25624.390625	2847.154514	263.448	0.0000
erro	48	518.750000	10.807292		
Total corrigido	63	36197.734375			
CV (%) =	0.25				
Média geral:	1307.1406250	Número de observações:	64		
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 3,0942822837655 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 0,821861137398932					

Torque na potência máxima

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	181.671875	60.557292	13.349	0.0000
F2_ETA	3	554.796875	184.932292	40.766	0.0000
F1_BIO*F2_ETA	9	499.390625	55.487847	12.232	0.0000
erro	48	217.750000	4.536458		
Total corrigido	63	1453.609375			
CV (%) =	0.62				
Média geral:	341.5781250	Número de observações:	64		
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 2,00474877959423 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 0,532474079963836					

Reserva de torque

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	23.815317	7.938439	7.877	0.0002
F2_ETA	3	52.239955	17.413318	17.279	0.0000
F1_BIO*F2_ETA	9	65.007452	7.223050	7.167	0.0000
erro	48	48.373625	1.007784		
Total corrigido	63	189.436348			
CV (%) =	10.86				
Média geral:	9.2476563	Número de observações:	64		
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 0,944898572126465 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 0,25097109571705					

Reserva de rotação

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	89.063780	29.687927	60.887	0.0000
F2_ETA	3	28.567267	9.522422	19.529	0.0000
F1_BIO*F2_ETA	9	641.231427	71.247936	146.122	0.0000
erro	48	23.404425	0.487592		
Total corrigido	63	782.266898			
CV (%) =	1.40				
Média geral:	49.8998438	Número de observações:	64		
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 0,657248893835135 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 0,174569503976926					

Índice de elasticidade

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	0.025313	0.008438	21.039	0.0000
F2_ETA	3	0.010812	0.003604	8.987	0.0001
F1_BIO*F2_ETA	9	0.125525	0.013947	34.777	0.0000
erro	48	0.019250	0.000401		
Total corrigido	63	0.180900			
CV (%) =	1.22				
Média geral:	1.6387500	Número de observações:	64		
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 0,0188493441076664 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 0,00500650618362412					

Consumo específico

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	309.781250	103.260417	12.670	0.0000
F2_ETA	3	336.341250	112.113750	13.756	0.0000
F1_BIO*F2_ETA	9	262.820000	29.202222	3.583	0.0018
erro	48	391.215000	8.150313		
Total corrigido	63	1300.157500			
CV (%) =	1.24				
Média geral:	229.6562500	Número de observações:	64		
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 2,68712967490072 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 0,713718804046804					

Consumo horário

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	10.287500	3.429167	1.166	0.3326
F2_ETA	3	25.976250	8.658750	2.943	0.0423
F1_BIO*F2_ETA	9	20.076250	2.230694	0.758	0.6546
erro	48	141.220000	2.942083		
Total corrigido	63	197.560000			
CV (%) =	9.20				
Média geral:	18.6500000	Número de observações:	64		
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 1,61446628298769 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 16					
Erro padrão: 0,428812556174995					

Poder calorífico

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
F1_BIO	3	4.997203	1.665734	11.287	0.0000
F2_ETA	3	7.141322	2.380441	16.129	0.0000
F1_BIO*F2_ETA	9	1.133761	0.125973	0.854	0.5744
erro	32	4.722743	0.147586		
Total corrigido	47	17.995030			
CV (%) =	0.95				
Média geral:	40.5507917	Número de observações:	48		
Teste Tukey para a FV F1_BIO					
DMS: 0,425086716618103 NMS: 0,05					
Média harmonica do número de repetições (r): 12					
Erro padrão: 0,110900003444044					

Apêndice B - Checklist para realização dos ensaios

[illegible]