

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Rovian Bertinatto

**DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR AGRÍCOLA CICLO  
DIESEL UTILIZANDO MISTURAS DE ÓLEO DIESEL, BIODIESEL E  
ETANOL**

Santa Maria, RS

2021



**Rovian Bertinatto**

**DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR AGRÍCOLA CICLO DIESEL  
UTILIZANDO MISTURAS DE ÓLEO DIESEL, BIODIESEL E ETANOL**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Schlosser

Santa Maria, RS

2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Bertinatto, Rovian

Desempenho e emissões de um motor agrícola ciclo Diesel utilizando misturas de óleo Diesel, biodiesel e etanol / Rovian Bertinatto.- 2021.

242 p.; 30 cm

Orientador: José Fernando Schlosser

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2021

1. Combustíveis renováveis 2. Dinamometria 3. Motor eletrônico 4. Operação bicomcombustível 5. Trator I. Schlosser, José Fernando II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

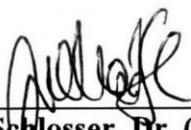
Declaro, ROVIAN BERTINATTO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Rovian Bertinatto**

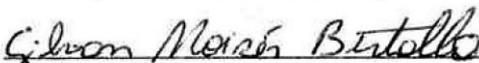
**DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR AGRÍCOLA CICLO DIESEL  
UTILIZANDO MISTURAS DE ÓLEO DIESEL, BIODIESEL E ETANOL**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

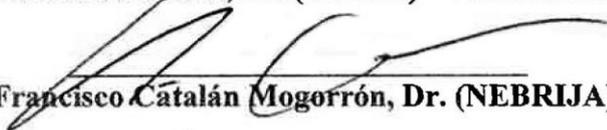
**Aprovado em 29 de janeiro de 2021:**



**José Fernando Schlosser, Dr. (UFSM) - Videoconferência**  
(Presidente/Orientador)



**Gilvan Moisés Bertollo, Dr. (UTFPR) - Videoconferência**



**Heliodoro Francisco Catalán Mogorrón, Dr. (NEBRIJA) - Parecer**



**Valmir Werner, Dr. (UFSM) - Videoconferência**



**Walter Boller, Dr. (UFSM) - Videoconferência**

Santa Maria, RS  
2021



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus avós, pais, irmão, namorada e aos grandes e sinceros amigos. Cheguei aqui graças aos seus bons exemplos, ensinamentos, conselhos, incentivos, dedicação, apoio, carinho e amor. Amo vocês!



## AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo amor, apoio e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Fernando Schlosser, pela paciência, simplicidade e dedicação ao ensinar e orientar. Também pela amizade sincera e parceria em diversos momentos compartilhados. Mais que um orientador, um amigo para a vida toda, assim como sua querida família.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, ao Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas e ao Laboratório de Agrotecnologia, pelas oportunidades e excelentes condições de estudo a mim oferecidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro através de bolsa de doutorado.

À empresa Teccom Tecnologia em Combustão, especialmente ao Srs. Eduardo Abutara, Marcos Marcondes e Emerson Oliveira, pela parceria e o fornecimento dos aditivos Teccom10<sup>®</sup> e Teccom BX Etanol<sup>®</sup>, para promover a mistura entre o óleo Diesel, biodiesel e etanol anidro.

À AGCO do Brasil e à concessionária Massey Ferguson Itaimbé (Santa Maria-RS) pelo empréstimo do trator para a realização do experimento.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Agrotecnologia. Obrigado por estarem sempre presentes e me apoiarem na busca dos meus objetivos e ideais.

A todos os amigos que fiz nesta cidade e universidade.

Muito obrigado!



“Têm coisas que tem seu valor  
avaliado em quilates, em cifras e fins  
em cifras e fins...  
E outras não têm o apreço  
nem pagam o preço que valem pra mim.”

...

“Tenho amigos que o tempo  
por ser indelével, jamais separou.  
E ao mesmo tempo revejo  
as marcas de ausência que ele me deixou.”

...

“Das vozes dos outros eu levo a palavra  
dos sonhos dos outros eu tiro a razão  
eu tiro a razão...  
Dos olhos dos outros eu vejo os meus erros  
das tantas saudades eu guardo a paixão.”

...

“Sempre que eu quero, revejo meus dias  
e as coisas que eu posso, eu mudo ou arrumo.  
Mas deixo bem quietas as boas lembranças,  
vidinha que é minha, só pra o meu consumo!”

*Gujo Teixeira e Luiz Marengo,  
trechos da música “Pra o meu consumo”.*



## RESUMO

### DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR AGRÍCOLA CICLO DIESEL UTILIZANDO MISTURAS DE ÓLEO DIESEL, BIODIESEL E ETANOL

AUTOR: Rovian Bertinatto

ORIENTADOR: José Fernando Schlosser

Misturas de óleo Diesel mineral, biodiesel e etanol formam estratégias de substituição parcial do combustível de origem fóssil, aplicáveis em motores de ignição por compressão, sem a necessidade de grandes adaptações. Neste trabalho foram realizadas duas análises bibliométricas, sobre a utilização de misturas de: óleo Diesel e etanol (D:E) e óleo Diesel, biodiesel e etanol (D:B:E), em motores com gerenciamento eletrônico da injeção e sistema de tratamento de gases com válvula EGR. Além disso, realizaram-se avaliações experimentais em um motor de trator agrícola de ignição por compressão, multi-cilíndrico, turboalimentado com *aftercooler*, com gerenciamento eletrônico da injeção e sistema de tratamento de gases EGR. Foram utilizados óleo Diesel de baixo (BS10 -10 ppm) e alto teor de enxofre (BS500 – 500 ppm), com 10% de biodiesel em sua constituição, em misturas com concentrações de 5%, 10%, 15% e 20% de etanol anidro aditivado, totalizando oito combustíveis em mistura e duas condições de referência (sem etanol). Foram avaliados os valores médios e máximos dos parâmetros de desempenho do motor, o consumo de combustível e as emissões de gases CO, HC, NO<sub>x</sub>, HC + NO<sub>x</sub> e MP segundo a norma ABNT NBR ISO 8178-4. Os resultados encontrados na bibliografia demonstram que somente o aumento do consumo específico de combustível e a redução das emissões de MP ocorrem para a maioria dos trabalhos publicados com misturas D:E. Já os resultados das misturas de D:B:E, demonstram que ocorreu o aumento do consumo específico de combustível, aumento das emissões de CO e HC (principalmente em baixas e médias cargas), e a diminuição das emissões de NO<sub>x</sub> e MP. No ensaio dinamométrico de desempenho do trator do presente estudo, com o incremento das concentrações de etanol constatou-se a diminuição do torque e potência, e aumento dos consumos horários e específicos para ambos os combustíveis (BS10 e BS500). As exceções ocorreram para o BS500 com 5% de etanol, que apresentou resultados 0,62% superiores para torque e 0,57% para potência, em relação ao BS500 puro, e também para o consumo específico de combustível, onde BS10 e BS500 puros não apresentaram diferença para a concentração de 5% de etanol. Para o desempenho máximo do motor, também foram constatados a diminuição do desempenho do torque máximo e potência máxima com o incremento das concentrações de etanol. Já os resultados do consumo nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, ocorreram de forma distinta dos obtidos no ensaio dinamométrico a plena carga, pois não houve relação direta entre o aumento das concentrações de etanol e o aumento dos consumos horário e específico de combustível. Para as emissões de gases, com o incremento das concentrações de etanol nas misturas ocorreu o aumento das emissões de CO, NO<sub>x</sub> e HC+NO<sub>x</sub>, e a redução das emissões de MP. Já as emissões de HC não apresentaram relação direta com o aumento das concentrações de etanol. As emissões de CO e MP não excedem dos valores limites da norma MAR-1, mesmo aos 20% de concentração de etanol, no entanto o HC+NO<sub>x</sub> teve valor abaixo do limite apenas para os combustíveis sem etanol, com emissões acima do limite com a utilização de etanol.

**Palavras-chave:** Combustíveis renováveis. Dinamometria. Motor eletrônico. Operação bicomcombustível. Trator.



## ABSTRACT

### PERFORMANCE AND EMISSIONS OF A DIESEL CYCLE AGRICULTURAL ENGINE USING DIESEL, BIODIESEL AND ETHANOL BLENDS

AUTHOR: Rovian Bertinatto

ADVISOR: José Fernando Schlosser

Blends of mineral diesel oil, biodiesel and ethanol are strategies for partial replacement of fossil fuel, applicable in compression ignition engines, without major adaptations. In this work, two bibliometric analyzes were carried out on the use of blends of: diesel oil and ethanol (D:E) and diesel oil, biodiesel and ethanol (D:B:E), in engines with electronic injection management and gas treatment system with Exhaust Gas Recirculation (EGR) valve. In addition, experimental evaluations were carried out on an agricultural multi-cylindrical compression-ignition engine, turbocharged with aftercooler, electronic injection management and EGR gas treatment system. In the experimental evaluations were used Diesel oil of low (BS10 -10 ppm) and high sulfur content (BS500 - 500 ppm), with 10% biodiesel in its constitution, blended with anhydrous ethanol with additives at concentrations of 5%, 10%, 15% and 20%, totaling eight tested fuels and two reference conditions (without ethanol). The average and maximum values of the engine performance parameters, fuel consumption and gas emissions (CO, HC, NO<sub>x</sub>, HC + NO<sub>x</sub> and MP) were evaluated according to the ABNT NBR ISO 8178-4 standard. The bibliography indicates that for most works published the D:E blends demonstrate an increase in specific fuel consumption and the reduction of PM emissions. On the other hand, the results of the D:B:E mixtures show that there was an increase in specific fuel consumption, an increase in CO and HC emissions (mainly in low and medium loads), and a decrease in NO<sub>x</sub> and PM emissions. As a result of the tractor's performance test, was observed that as the ethanol concentrations increase, torque and power decrease, and hourly and specific consumption increase, for both fuels (BS10 and BS500). The exception occurred for the BS500 with 5% ethanol, which showed 0.62% higher results for torque and 0.57% for power, compared to pure BS500. Besides, the specific fuel consumption showed no difference for the 5% ethanol concentration compared to the BS10 and BS500 pure fuels. When analyzing the maximum performance of the engine, the increase in ethanol concentrations decrease the maximum torque and maximum power. The consumption results in the ABNT NBR ISO 8178-4 operating modes, on the other hand, occurred differently from those obtained in the dynamometer test at full load, as there was no direct relationship between the increase in ethanol concentrations and the increase in consumption time and specific fuel. For gas emissions, as increase ethanol concentrations in the blends, there was an increase in CO, NO<sub>x</sub> and HC + NO<sub>x</sub> emissions, and a reduction in PM emissions. HC emissions were not directly related to the increase in ethanol concentrations. CO and PM emissions do not exceed the limit values of the MAR-1 standard, even at 20% ethanol concentration; however, HC + NO<sub>x</sub> had a value below the limit only for fuels without ethanol, the remaining emissions are above the limit.

**Keywords:** Bi-fuel operation. Dynamometry. Electronic engine. Renewable fuels. Tractor.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo final por fonte de energia – dados de 1970 até 2019.....	44
Figura 2 - Composição setorial do consumo de derivados de petróleo – dados de 1970 até 2019 .....	44
Figura 3 - Estrutura do consumo de combustíveis no setor de transportes – dados de 1975 até 2019.....	45
Figura 4 - Vista esquemática dos principais sistemas de injeção direta de combustível para motores ciclo Diesel: (1) Sistema com bomba injetora convencional; (2) Sistema de bomba unitária – UPS; (3) Sistema de injetor unitário – UIS; (4) Sistema de tubo condutor comum - CR .....	47
Figura 5 - Vista esquemática dos principais componentes de um sistema de injeção de combustível <i>Common Rail</i> para um motor ciclo Diesel .....	48
Figura 6 – Comportamento típico de desempenho de um motor ciclo Diesel, turboalimentado e com sistema de gerenciamento eletrônico da injeção de combustível, e os principais pontos caracterizadores do funcionamento a plena carga.....	55
Figura 7 - Trator agrícola marca Massey Ferguson, modelo MF 6713R Dyna-4, utilizado nos ensaios.....	73
Figura 8 - Estação atmosférica posicionada em frente ao capô do trator. Em detalhe o visor da estação atmosférica .....	73
Figura 9 - Trator MF 6713R Dyna-4 acoplado ao dinamômetro pela árvore cardânica .....	74
Figura 10 - Painel de controle do dinamômetro. Em detalhe o visor que apresenta os valores de torque, rotação da TDP e a potência calculada .....	75
Figura 11 - Tacômetro portátil marca Minipa, modelo MDT-2238A, acessório para leitura de contato e adesivo refletivo .....	75
Figura 12 - Fluxômetro marca EGGERS modelo FM3-100 utilizado para medir o consumo de combustível, mostrador de temperatura do óleo Diesel (A) e pressão do sistema (B).....	76
Figura 13 - Opacímetro Opacilyt ELD (A) e analisador de gases Infralyt ELD (B), acoplados ao <i>software</i> específico para aquisição dos dados. Em detalhe (C) o painel do Infralyt ELD.....	78
Figura 14 - Conjunto de filtros de combustível do motor do trator MF6713R Dyna-4 (A, B, C) e filtro de combustível do fluxômetro EGGERS FM3-100 (D) .....	84
Figura 15 - Conjunto de filtros de combustível do motor do trator MF 6713R Dyna-4 (B, C, D) instalados e identificados.....	84
Figura 16 – Detalhe da localização do filtro do fluxômetro EGGERS FM3-100 (D).....	84
Figura 17 - Recipiente de 20 L sendo utilizado pelo fluxômetro para alimentar o trator .....	86
Figura 18 - Porcentagens de torque em relação ao torque máximo, em dada rotação, para determinar os oito modos de operação para o ensaio de emissões .....	90
Figura 19 - Aplicação do torque e rotação no dinamômetro de forma manual, conforme os dados obtidos no ensaio dinamométrico.....	92

Figura 20 - Aspecto temporal das publicações sobre desempenho e emissões de motores operando com misturas de óleo Diesel e etanol .....	97
Figura 21 – Representação do número de cilindros (A) e tipo de admissão de ar do motor (B), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	98
Figura 22 - Representação do tipo de injeção de combustível dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	98
Figura 23 - Representação do sistema de tratamento de gases (TG) dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	99
Figura 24 - Representação do tipo de acoplamento do motor ao dinamômetro (A) e os trabalhos que utilizaram etanol aditivado (B), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	100
Figura 25 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol no torque (A) e potência (B), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	100
Figura 26 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol no consumo específico de combustível, dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	102
Figura 27 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol para as emissões de monóxido de carbono (CO), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	103
Figura 28 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol para as emissões de hidrocarbonetos (HC), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	104
Figura 29 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol para as emissões de material particulado (MP), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	105
Figura 30 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol para as emissões de óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	106
Figura 31 - Representação das curvas de regressão do torque no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel	

	BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	115
Figura 32 -	Representação das curvas de regressão da potência no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	117
Figura 33 -	Representação das curvas de regressão do consumo horário de combustível no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	119
Figura 34 -	Representação das curvas de regressão do consumo específico de combustível no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	120
Figura 35 -	Representação das curvas de regressão do torque no ensaio dinamométrico, das misturas de etanol com óleo Diesel BS10 e BS500 dentro de cada rotação analisada, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ).....	123
Figura 36 -	Representação das curvas de regressão do consumo horário de combustível no ensaio dinamométrico, das misturas de etanol com óleo Diesel BS10 e BS500 dentro de cada rotação analisada, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	124
Figura 37 -	Representação das curvas de regressão do consumo específico de combustível no ensaio dinamométrico, das misturas de etanol com óleo Diesel BS10 e BS500 dentro de cada rotação analisada, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	124
Figura 38 -	Representação das curvas de regressão do torque máximo no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	129
Figura 39 -	Representação das curvas de regressão da potência máxima no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	131
Figura 40 -	Representação das curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono (CO), das misturas de etanol com óleo Diesel BS10, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 e Euro V .....	137
Figura 41 -	Representação das curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono (CO), das misturas de etanol com óleo Diesel BS500, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 e Euro V .....	139

Figura 42 - Representação das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos (HC), das misturas de etanol com óleo Diesel BS10, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valor limite estabelecido pela Euro V .....	143
Figura 43 - Representação das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos (HC), das misturas de etanol com óleo Diesel BS500, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valor limite estabelecido pela Euro V .....	145
Figura 44 - Representação das curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), das misturas de etanol com óleo Diesel BS10, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 (HC + $\text{NO}_x$ ) e Euro V .....	149
Figura 45 - Representação das curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), das misturas de etanol com óleo Diesel BS500, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 (HC + $\text{NO}_x$ ) e Euro V .....	151
Figura 46 - Representação das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + $\text{NO}_x$ ), das misturas de etanol com óleo Diesel BS10, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 (HC + $\text{NO}_x$ ) e Euro V (HC + $\text{NO}_x$ ) .....	156
Figura 47 - Representação das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + $\text{NO}_x$ ), das misturas de etanol com óleo Diesel BS500, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 (HC + $\text{NO}_x$ ) e Euro V (HC + $\text{NO}_x$ ) .....	158
Figura 48 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de monóxido de carbono nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mpCO}$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da Euro V e MAR-1 .....	162
Figura 49 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de hidrocarbonetos nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mpHC}$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da Euro V .....	164
Figura 50 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de óxidos de nitrogênio nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mpNO_x}$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da Euro V .....	166

Figura 51 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}(HC + NO_x)$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da MAR-1 .....	167
Figura 52 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de material particulado nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}MP$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da Euro V .....	169
Figura 53 - Representação das curvas de regressão do consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CH_{mop}$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 .....	174
Figura 54 - Representação das curvas de regressão do consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CH_{mop}$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 .....	176
Figura 55 - Representação das curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 .....	179
Figura 56 - Representação das curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 .....	181
Figura 57 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}CH_{mop}$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	184
Figura 58 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}CE_{mop}$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	186



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potência nominal (Pn), potência máxima (Pm), potência máxima com <i>Booster</i> (Pmb) e suas diferenças percentuais. Compilado com todos os tratores comercializados no mercado brasileiro no ano de 2020, e que disponibilizam estas informações em seus catálogos.....	58
Tabela 2 - Torque máximo (Tm), torque máximo com <i>Booster</i> (Tmb) e suas diferenças percentuais. Compilado com todos os tratores comercializados no mercado brasileiro no ano de 2020, e que disponibilizam estas informações em seus catálogos .....	60
Tabela 3 - Composição e concentração dos tratamentos a partir das misturas de óleo Diesel, biodiesel e etanol anidro aditivado .....	80
Tabela 4 - Principais informações dos artigos e <i>journals</i> de revisão bibliográfica que abordam os resultados de desempenho e emissões de motores operando com misturas de óleo Diesel e etanol .....	96
Tabela 5 – Resumo dos efeitos da utilização de etanol para as condições específicas <i>Common Rail</i> (CR), tratamento de gases (TG) e <i>Common Rail</i> juntamente com tratamento de gases (CR+TG), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1 .....	101
Tabela 6 – Principais informações dos artigos e <i>journals</i> selecionados para a análise bibliométrica de motores eletrônicos e com válvula EGR operando com misturas de D:B:E .....	107
Tabela 7 – Especificações dos motores e combustíveis utilizados, e resultados dos ensaios de desempenho e emissões de gases dos artigos da análise bibliométrica de motores eletrônicos e com válvula EGR operando com misturas de D:B:E .....	109
Tabela 8 - Massa específica dos combustíveis testados a 20°C .....	112
Tabela 9 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de torque, potência, consumo horário de combustível e consumo específico de combustível no ensaio dinamométrico, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), velocidade angular (rotações) do motor (R), as interações (C x E), (C x R), (E x R) e (C x E x R), o coeficiente de variação (CV) e a média geral .....	114
Tabela 10 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio dinamométrico (C x E), para o torque, potência, consumo horário e consumo específico de combustível, e a diferença percentual entre os combustíveis em cada variável .....	115
Tabela 11 – Resultados do teste de médias do desdobramento de combustíveis dentro de cada nível da velocidade angular do motor (rotação) no ensaio dinamométrico (C x R), para o torque, consumo horário e consumo específico de combustível .....	122

Tabela 12 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de índice de elasticidade (IE), reserva de torque (RT) e faixa de utilização (FU) no ensaio dinamométrico, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), a interação (C x E), o coeficiente de variação (CV) e a média geral .....	125
Tabela 13 - Reserva de torque (RT) nos combustíveis BS10 e BS500 nas diferentes concentrações de etanol.....	126
Tabela 14 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de torque máximo, potência máxima, consumo horário ótimo de combustível e consumo específico mínimo de combustível, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), a interação C x E, o erro, o coeficiente de variação (CV) e a média geral .....	128
Tabela 15 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis dentro de cada concentração de etanol (C x E) no ensaio dinamométrico, para o torque máximo e potência máxima .....	128
Tabela 16 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ), hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + NO <sub>x</sub> ) e material particulado (MP) no ensaio de emissões nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), modos de operação (M), as interações (C x E), (C x M), (E x M) e (C x E x M), o coeficiente de variação (CV) e a média geral .....	134
Tabela 17 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de emissões de gases nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para o monóxido de carbono (CO).....	135
Tabela 18 - Equações das curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono (CO), juntamente com os coeficientes de determinação (R <sup>2</sup> ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4.....	138
Tabela 19 - Equações das curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono (CO), juntamente com os coeficientes de determinação (R <sup>2</sup> ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 .....	140
Tabela 20 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de emissões de gases nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os hidrocarbonetos (HC)	141
Tabela 21 - Equações das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos (HC), juntamente com os coeficientes de determinação (R <sup>2</sup> ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4.....	143

Tabela 22 - Equações das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos (HC), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4.....	146
Tabela 23 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de emissões de gases nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ).....	148
Tabela 24 - Equações das curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4.....	150
Tabela 25 - Equações das curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4.....	152
Tabela 26 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de emissões de gases nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + $NO_x$ ).....	154
Tabela 27 - Equações das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + $NO_x$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4.....	156
Tabela 28 - Equações das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + $NO_x$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4.....	158
Tabela 29 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os valores médios ponderados de monóxido de carbono ( $V_{mpCO}$ ), hidrocarbonetos ( $V_{mpHC}$ ), óxidos de nitrogênio ( $V_{mpNO_x}$ ), hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio ( $V_{mp} (HC + NO_x)$ ) e material particulado ( $V_{mpMP}$ ) no ensaio de emissões nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), a interação (C x E), o coeficiente de variação (CV) e a média geral.....	160
Tabela 30 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis dentro de cada nível das concentrações de etanol, no ensaio de emissões nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os valores médios ponderados de monóxido de carbono ( $V_{mpCO}$ ), hidrocarbonetos ( $V_{mpHC}$ ), óxidos de nitrogênio ( $V_{mpNO_x}$ ), hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio ( $V_{mp} (HC + NO_x)$ ) e material particulado ( $V_{mpMP}$ ).....	161

Tabela 31 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de consumo horário de combustível ( $CH_{mop}$ ) e consumo específico de combustível ( $CE_{mop}$ ) no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), modos de operação (M), as interações (C x E), (C x M), (E x M) e (C x E x M), o coeficiente de variação (CV) e a média geral.....	171
Tabela 32 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (C x E x M), para o consumo horário de combustível ( $CH_{mop}$ ).....	172
Tabela 33 - Equações das curvas de regressão do consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CH_{mop}$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10.....	174
Tabela 34 - Equações das curvas de regressão do consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CH_{mop}$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500.....	176
Tabela 35 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para o consumo específico de combustível ( $CE_{mop}$ ).....	177
Tabela 36 - Equações das curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10.....	179
Tabela 37 - Equações das curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500.....	182
Tabela 38 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de valor médio ponderado de consumo horário de combustível ( $V_{mp}CH_{mop}$ ) e o valor médio ponderado de consumo específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ ) no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), a interação (C x E), o coeficiente de variação (CV) e a média geral.....	182
Tabela 39 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis dentro de cada nível das concentrações de etanol, no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para o valor médio ponderado de consumo horário de combustível ( $V_{mp}CH_{mop}$ ) e o valor médio ponderado de consumo específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ ).....	183

Tabela 40 – Behavior of the addition of ethanol in mixtures with Diesel oil, specifications and their impact on engine performance and pollutant gas emissions. Results of the main works published worldwide in scientific journals, theses, dissertations and other academic publications.....	203
Tabela 41 - Journals and other places of publication of bibliometric research, the respective number of publications and the impact factor according to the Journal Citation Reports (JCR) of 2019 .....	235



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação de potências ao aplicar diferentes normas de ensaio em um mesmo motor, tomando como referência os resultados obtidos segundo a norma DIN 70020 .....	51
Quadro 2 – Acessórios do motor considerados para a determinação da potência conforme cada norma.....	52
Quadro 3 - Limites máximos de emissões para motores de máquinas agrícolas e rodoviárias segundo o Proconve MAR-1 .....	61
Quadro 4 – Valores limites de emissões de gases poluentes e material particulado das principais normativas mundiais para um motor de trator agrícola com potência de 100 kW.....	62
Quadro 5 - Modos de operação e fatores de ponderação do ensaio de emissões .....	90



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGROTEC	Laboratório de Agrotecnologia
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANOVA	Análise da Variância
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ARLA	Agente redutor líquido de óxido de nitrogênio automotivo
ASABE	<i>American Society of Agricultural and Biological Engineers</i>
ASAE	<i>American Society of Agricultural Engineers</i>
B2	Óleo Diesel mineral com 2% de biodiesel
B5	Óleo Diesel mineral com 5% de biodiesel
B10	Óleo Diesel mineral com 10% de biodiesel
BEN	Balanco Energético Nacional
BS10	Óleo Diesel mineral BS10 - 10 ppm enxofre e com 10% de biodiesel
BS500	Óleo Diesel mineral BS500 - 500 ppm enxofre e com 10% de biodiesel
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CC-CDPF	<i>Closed-couple catalyzed diesel particulate filter</i>
Ce ou CE	Consumo específico de combustível
CE <sub>mop</sub>	Consumo específico de combustível nos modos de operação ISO 8178-4
Ch ou CH	Consumo horário de combustível
CH <sub>mop</sub>	Consumo horário de combustível nos modos de operação ISO 8178-4
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPF	<i>Catalyzed particulate filter</i>
CR	Sistema de tubo condutor comum ( <i>Common Rail system</i> )
CR + TG	Sistema <i>Common Rail system</i> + tratamento de gases
CV	Coeficiente de variação
D:E	Misturas de óleo Diesel e etanol (%)
D:B:E	Misturas de óleo Diesel, biodiesel e etanol (%)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DOC	<i>Diesel oxidation catalyst</i>
DPF	<i>Diesel particulate filter</i>
ECU	<i>Electronic control unit</i>
EGR	<i>Exhaust gas recirculation</i>
FU	Faixa de utilização
Fc	Fator de correção
Fa	Fator de correção atmosférico
Fm	Fator de correção do motor
HC	Hidrocarbonetos

HL	<i>High load</i> – altas cargas
HS	<i>High speed</i> – altas velocidades angulares do motor
IE	Índice de elasticidade do motor
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LL	<i>Low load</i> – baixas cargas
LS	<i>Low speed</i> – baixas velocidades angulares do motor
k	Coefficiente de absorção de luz
M	Torque
mil	Milhões
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MAR-1	Máquinas Agrícolas e Rodoviárias – Fase 1
ML	<i>Medium load</i> – médias cargas
MP	Material Particulado
MS	<i>Medium speed</i> – médias velocidades angulares do motor
NBR	Norma Brasileira
NEMA	Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas
N	Potência
n	Velocidade angular do motor (“Rotação do motor”)
NO	Monóxido de nitrogênio
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrogênio
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogênio (NO + NO <sub>2</sub> )
OBD	<i>On-board diagnose</i>
OCDE	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
O <sub>2</sub>	Gás oxigênio
PFI	<i>Port Fuel Injection</i>
POT	Potência
Pró-Álcool	Programa Nacional do Álcool
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
RT	Reserva de torque
S10	Óleo Diesel com 10 ppm de enxofre
S500	Óleo Diesel com 500 ppm de enxofre
SCR	<i>Selective catalytic reduction</i>
SI	Sistema internacional de unidades
TDA	Tração dianteira auxiliar
TDP	Tomada de potência
TG	Tratamento de gases
TOR	Torque
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
UIS	Sistema de injetor unitário ( <i>unit injector system</i> )
ULSD	Diesel de ultra baixo teor de enxofre ( <i>Ultra-low sulfur Diesel</i> )
UPS	Sistema de bomba unitária ( <i>unit pump system</i> )
WCC	<i>Warm up Catalytic Converter</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

bar	Unidade de pressão atmosférica equivalente a 100.000 Pa
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
cv	Cavalo vapor
g	Gramma
g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	Gramas por quilowatt-hora
h	Hora
kg	Quilograma
kg.kmol <sup>-1</sup>	Quilograma por quilomol
kW	Quilowatt
kW.h	Quilowatt-hora
L	Litro
m	Metro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mbar	Milibar
mL	Mililitro
N.m	Newton metro
nm	Nanômetro
Pa	Pascal – unidade padrão de pressão e tensão no SI
ppm	parte por milhão
rpm	Rotações por minuto
s	Segundo
tep	Tonelada equivalente de petróleo
toe	<i>Tonne of oil equivalent</i>
%	Porcentagem
% vol.	Porcentagem em volume
°C	Grau Celsius
°API	Escala de densidade relativa dos líquidos derivados de petróleo
σ	Massa específica



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>39</b>
1.1	HIPÓTESES .....	41
1.2	OBJETIVOS .....	41
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>41</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>42</b>
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA TESE .....	42
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>43</b>
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO CENÁRIO ATUAL .....	43
2.2	PARÂMETROS DE DESEMPENHO DOS MOTORES CICLO DIESEL .....	46
<b>2.2.1</b>	<b>Sistemas de injeção e tratamento de gases</b> .....	<b>46</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Comportamento típico de desempenho do motor</b> .....	<b>50</b>
2.3	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE NÍVEIS DE EMISSÕES EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS .....	61
2.4	COMBUSTÍVEIS .....	63
<b>2.4.1</b>	<b>Óleo Diesel</b> .....	<b>63</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Biodiesel</b> .....	<b>64</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Etanol</b> .....	<b>66</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Misturas de Diesel/Biodiesel/Etanol</b> .....	<b>67</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>71</b>
3.1	REVISÕES BIBLIOMÉTRICAS .....	71
<b>3.1.1</b>	<b>Revisão bibliométrica 1</b> .....	<b>71</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Revisão bibliométrica 2</b> .....	<b>71</b>
3.2	LOCAL DOS EXPERIMENTOS.....	72
3.3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	72
<b>3.3.1</b>	<b>Motor utilizado</b> .....	<b>72</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Estação atmosférica</b> .....	<b>72</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Bancada dinamométrica móvel</b> .....	<b>74</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Tacômetro</b> .....	<b>75</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Fluxômetro de combustível</b> .....	<b>76</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Analisador de gases</b> .....	<b>77</b>
<b>3.3.7</b>	<b>Analisador de opacidade</b> .....	<b>78</b>
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS .....	79
<b>3.4.1</b>	<b>Parâmetros de desempenho do motor no ensaio dinamométrico</b> .....	<b>80</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Desempenho máximo do motor no ensaio dinamométrico</b> .....	<b>81</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Emissões de gases poluentes e material particulado</b> .....	<b>81</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Consumo de combustível nos modos de operação</b> .....	<b>82</b>
<b>3.4.5</b>	<b>Análise estatística</b> .....	<b>82</b>
3.5	METODOLOGIA UTILIZADA .....	83
<b>3.5.1</b>	<b>Caracterização da massa específica dos combustíveis</b> .....	<b>83</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Parâmetros de desempenho do motor</b> .....	<b>83</b>

3.5.3	<b>Análise das emissões de gases e opacidade.....</b>	<b>89</b>
3.5.4	<b>Consumo horário e específico de combustível nos diferentes modos de operação</b>	<b>94</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>95</b>
4.1	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 1 – MOTORES OPERANDO COM MISTURAS DE ÓLEO DIESEL E ETANOL .....	95
4.1.1	<b>Considerações da revisão bibliométrica 1.....</b>	<b>106</b>
4.2	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 2 – MOTORES ELETRÔNICOS E COM VÁLVULA EGR OPERANDO COM MISTURAS DE D:B:E .....	107
4.2.1	<b>Considerações da revisão bibliométrica 2.....</b>	<b>111</b>
4.3	DESEMPENHO DO MOTOR NO ENSAIO DINAMOMÉTRICO .....	112
4.3.1	<b>Torque, potência, consumo horário e consumo específico de combustível .....</b>	<b>113</b>
4.3.2	<b>Índice de elasticidade, reserva de torque e faixa de utilização.....</b>	<b>125</b>
4.3.3	<b>Considerações do desempenho do motor no ensaio dinamométrico .....</b>	<b>126</b>
4.4	DESEMPENHO MÁXIMO DO MOTOR NO ENSAIO DINAMOMÉTRICO.....	127
4.4.1	<b>Considerações do desempenho máximo do motor no ensaio dinamométrico .....</b>	<b>132</b>
4.5	EMISSÕES DE GASES E MATERIAL PARTICULADO .....	134
4.5.1	<b>Monóxido de carbono (CO).....</b>	<b>135</b>
4.5.2	<b>Considerações das emissões de CO.....</b>	<b>140</b>
4.5.3	<b>Hidrocarbonetos (HC) .....</b>	<b>141</b>
4.5.4	<b>Considerações das emissões de HC.....</b>	<b>146</b>
4.5.5	<b>Óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).....</b>	<b>147</b>
4.5.6	<b>Considerações das emissões de NO<sub>x</sub>.....</b>	<b>152</b>
4.5.7	<b>Hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + NO<sub>x</sub>).....</b>	<b>153</b>
4.5.8	<b>Considerações das emissões de HC + NO<sub>x</sub>.....</b>	<b>158</b>
4.6	RESULTADOS DE EMISSÕES PONDERADOS COMPARADOS COM A MAR-1 E Euro V. ....	160
4.6.1	<b>Valor médio ponderado das emissões de monóxido de carbono (V<sub>mp</sub>CO).....</b>	<b>161</b>
4.6.2	<b>Valor médio ponderado das emissões de hidrocarbonetos (V<sub>mp</sub>HC) .....</b>	<b>163</b>
4.6.3	<b>Valor médio ponderado das emissões de óxidos de nitrogênio (V<sub>mp</sub>NO<sub>x</sub>) .....</b>	<b>165</b>
4.6.4	<b>Valor médio ponderado das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (V<sub>mp</sub>(HC+ NO<sub>x</sub>) .....</b>	<b>166</b>
4.6.5	<b>Valor médio ponderado das emissões de material particulado (V<sub>mp</sub>MP) .....</b>	<b>168</b>
4.7	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL NOS MODOS DE OPERAÇÃO.....	171
4.7.1	<b>Considerações do ensaio de consumo de combustível nos modos de operação ...</b>	<b>186</b>
5	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>188</b>
6	<b>RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>190</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>191</b>
	<b>APÊNDICE A – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 1 - TABELA DE RESULTADOS .....</b>	<b>203</b>
	<b>APÊNDICE B – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 1 – LOCAL, NÚMERO DE PUBLICAÇÕES, E FATOR DE IMPACTO .....</b>	<b>235</b>

<b>ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO ÓLEO DIESEL DO TIPO B SEGUNDO A RESOLUÇÃO ANP Nº 50 DE 23 DE DEZEMBRO DE 2013.....</b>	<b>237</b>
<b>ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DO BIODIESEL SEGUNDO O REGULAMENTO TÉCNICO ANP Nº 3/2014.....</b>	<b>238</b>
<b>ANEXO C – ESPECIFICAÇÃO DO ETANOL ANIDRO E HIDRATADO SEGUNDO A RESOLUÇÃO ANP Nº19 DE 15 DE ABRIL DE 2015.....</b>	<b>239</b>
<b>ANEXO D - BOLETIM DE CONFORMIDADE DOS COMBUSTÍVEIS.....</b>	<b>240</b>
<b>ANEXO E - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TRATOR MF 6713R Dyna-4 .....</b>	<b>241</b>
<b>ANEXO F - MARGEM DE ERRO DO DINAMÔMETRO E FLUXÔMETRO .....</b>	<b>242</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de derivados de petróleo como combustível em motores de combustão interna vem sendo questionada com maior intensidade nas últimas décadas. O principal problema apontado é o ambiental, ocasionado pela queima destes combustíveis fósseis, que emitem gases tóxicos e provocam o aquecimento global.

Diante disso, os combustíveis usados em máquinas agrícolas e rodoviárias estão sujeitos a regulamentações de emissões cada vez mais rigorosas, como exemplo, a implantação da legislação brasileira de limite de emissões de gases poluentes para máquinas agrícolas. O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), em sua fase 1 para Máquinas Agrícolas e Rodoviárias (MAR-1), estabeleceu limites de emissões, que antes não existiam, para as máquinas agrícolas fabricadas a partir de 2017, sendo aplicada de forma escalonada conforme a faixa de potência.

Para atender a estas novas exigências, alternativas aos combustíveis fósseis são pesquisadas a décadas, e fontes provenientes de recursos naturais estão sendo utilizadas. Também, além da adequação a estes novos limites de emissões de gases, é incessante a busca por motores e máquinas mais eficientes, com maior tecnologia embarcada, a exemplo, a utilização da injeção eletrônica nestes motores.

No Brasil, após anos de pesquisa, a utilização do biodiesel em mistura ao óleo Diesel teve início facultativo em 2003, com o enfoque na inclusão social e desenvolvimento regional, sendo que os resultados desta primeira fase de utilização resultaram em um arcabouço legal e regulatório. Com isto, em 2008 entrou em vigor a mistura legalmente obrigatória com 2% (B2) de biodiesel ao óleo Diesel. Dez anos mais tarde, a porcentagem de biodiesel era de 10% (B10), e com planos de crescimento de 1% ao ano, atingindo 15% em 1º de março de 2023. Atualmente, em 2021, a mistura obrigatória é de 12% (B12), mas a partir de 1º de março passará a 13% (B13), sendo esta uma política que fortalece a participação deste combustível na matriz energética brasileira, e contribui para a diversidade das fontes energéticas.

Com o etanol a situação é semelhante. O país é referência na utilização de etanol em sua matriz energética, tanto com o etanol hidratado, quanto em mistura com a gasolina (etanol anidro). A preocupação com a dependência do petróleo no Brasil surgiu na crise da década de 1970, e com a implementação do Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool), iniciado em 1975, desencadeou um processo que resultou na criação de uma infraestrutura de produção e implementação de tecnologias que permitiu a inserção deste combustível no país. Neste período houve o lançamento de tratores e caminhões movidos unicamente a etanol, no entanto não

apresentaram desempenho satisfatório e o consumo elevado, aliado ao preço do combustível, desmotivou a sua utilização.

Além de pioneiro na utilização em larga escala do etanol combustível, o Brasil é um dos países que mais utiliza o produto e o segundo maior produtor mundial, ficando atrás somente dos Estados Unidos, que em 2019 produziu aproximadamente 60 bilhões de litros de etanol enquanto a produção brasileira foi de 35 bilhões de litros (EIA, 2020; EPE, 2020). Cabe destacar que os Estados Unidos produzem seu etanol principalmente através do milho, e o Brasil, apesar de possuir diversas usinas que produzem através do milho, tem a cana-de-açúcar como a principal fonte.

O etanol é um combustível renovável e, ao contrário do óleo Diesel que está armazenado em profundidades e com os seus potenciais gases poluentes retidos, é formado através da fotossíntese desempenhada pelas plantas. Elas retiram o CO<sub>2</sub> da atmosfera e convertem em açúcar que, após a fermentação por bactérias resulta no etanol combustível, ou seja, o etanol também emite gases, no entanto, esses gases foram reciclados da atmosfera.

Embora no Brasil existem alguns estados em que a utilização do etanol é inviabilizada pela distância das usinas, que encarece o valor do produto devido ao custo do frete, na grande maioria o valor do etanol é bem competitivo. Atualmente, os principais estados produtores de etanol são: São Paulo e Minas Gerais (Sudeste); Paraná (Região Sul); Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso (Região Centro-Oeste); Alagoas e Pernambuco (Região Nordeste).

Viabilizar a utilização de misturas de óleo Diesel, biodiesel e etanol (D:B:E) em motores ciclo Diesel, pode ser uma alternativa para reduzir os custos do agronegócio brasileiro, em especial da cadeia da cana-de-açúcar. A possibilidade de utilizar uma parte da sua produção (etanol) em seus equipamentos de ciclo Diesel no campo e no transporte, pode vir a reduzir o custo final de seus produtos, apresentando um valor mais competitivo e maximizando os lucros das usinas canavieiras.

Em geral, a literatura indica que as misturas de D:B:E reduzem significativamente as emissões de material particulado. No entanto, são contraditórios os resultados reportados em relação às emissões de monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio. Enquanto alguns estudos indicam o aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio, outros relataram uma redução dessas emissões. Além disso, enquanto alguns estudos mostraram aumento nas emissões de monóxido de carbono, outros relataram uma diminuição ou nenhuma tendência. Carece também de informações quando da utilização de óleo Diesel mineral com baixo ou alto teor de enxofre.

Em relação ao torque e, conseqüentemente, à potência produzida, a grande maioria encontrou o decréscimo de valores com o incremento da quantidade de etanol na mistura.

Entretanto, para o consumo específico de combustível, alguns relatam pouca diferença, enquanto outros, grandes acréscimos no consumo. Junta-se o fato de que a grande maioria dos trabalhos utiliza motores monocilíndricos, ou motores experimentais, sem sistema de suplementação de ar (turboalimentado) e sem sistema de gerenciamento eletrônico de injeção de combustível. Menor ainda é a utilização de motores com sistemas de tratamento de gases de escape.

Nesta perspectiva, é importante a realização de mais pesquisas quanto a utilização de biocombustíveis, avaliando seu desempenho e viabilidade técnica, além do potencial de redução da emissão de gases poluentes, causadores do efeito estufa.

Diante do exposto, essa pesquisa visa utilizar os combustíveis acessíveis ao mercado brasileiro (etanol anidro, óleo Diesel BS10 e BS500), em um motor de trator agrícola de quatro cilindros, turboalimentado com *aftercooler*, com sistema de gerenciamento eletrônico da injeção de combustível e sistema de tratamento de gases do tipo EGR (*Exhaust Gas Recirculation*). O etanol será aditivado, fornecendo estabilidade e permitindo misturas de etanol em maiores concentrações.

## 1.1 HIPÓTESES

Com a utilização de etanol anidro aditivado em misturas com óleo Diesel e biodiesel, ocorre a diminuição do torque e potência e o aumento do consumo horário de combustível, aumentando, conseqüentemente, o consumo específico de combustível.

Com o acréscimo das proporções de etanol anidro aditivado nas misturas com óleo Diesel e biodiesel, ocorre a diminuição da emissão de gases poluentes e do material particulado.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho, as emissões de gases poluentes e o material particulado de um motor de trator agrícola ciclo Diesel, que possui gerenciamento eletrônico de injeção de combustível, operando com misturas de óleo Diesel com baixo e alto teor de enxofre, biodiesel e etanol anidro aditivado.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Realizar uma revisão bibliométrica sobre publicações que trabalharam com misturas de óleo Diesel e etanol, e seu impacto no desempenho do motor, emissões de gases e material particulado. Após isso, selecionar os trabalhos científicos com características similares ao motor do presente estudo e realizar uma análise específica para motores com essa configuração.

Avaliar e comparar o comportamento experimental de um motor de trator agrícola ciclo Diesel, equipado com gerenciamento eletrônico da injeção de combustível, operando com óleo Diesel de alto e baixo teor de enxofre em misturas de 5, 10, 15 e 20% de etanol anidro aditivado.

Determinar os principais parâmetros de desempenho, na faixa de utilização do motor com todos os combustíveis avaliados, sendo estes: torque, potência, consumo horário e específico de combustível, e calcular a reserva de torque, a faixa de utilização e o índice de elasticidade.

Analisar as emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e de material particulado expelidos pelo escapamento do trator com todos os combustíveis avaliados.

Comparar os dados obtidos nos ensaios de emissões com os limites estabelecidos pela legislação de controle de emissões Proconve MAR-1 e Euro V.

Avaliar o consumo específico de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4.

## 1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Algumas tecnologias aplicadas nos motores agrícolas nos últimos anos são o gerenciamento eletrônico da injeção de combustível e o turbocompressor, implantados com o intuito de atender os novos limites de emissões. Esses sistemas podem contribuir para a utilização de etanol misturado ao óleo Diesel nestes motores, além de serem escassas as pesquisas de utilização destes sistemas com misturas de óleo Diesel mineral e biocombustíveis.

Viabilizar misturas de etanol com o óleo Diesel representa uma alternativa de inserção de um combustível alternativo e renovável na cadeia do óleo Diesel, pois no momento atual, uma substituição do combustível fóssil por um combustível 100% renovável não seria possível. Isso é devido à baixa capacidade de produção de biodiesel no país, como também pelo preço das principais *commodities* utilizadas, que em certos momentos da economia, tornam o valor do biodiesel proibitivo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO CENÁRIO ATUAL

Com a crise do fornecimento de petróleo, desencadeado na década de 1970, o planeta iniciou processos de busca por meios alternativos de geração de energia, dentre eles, destaca-se os combustíveis da biomassa vegetal. Vale ressaltar que a utilização de óleos vegetais em motores de ignição por compressão foi inicialmente considerada por seu próprio inventor, embora o aumento da oferta, no início do século 20, criou uma situação muito favorável ao óleo Diesel de origem mineral. Este é amplamente utilizado no Brasil e no mundo, e a maioria das máquinas agrícolas em operação utilizam este combustível (NIETIEDT et al., 2011).

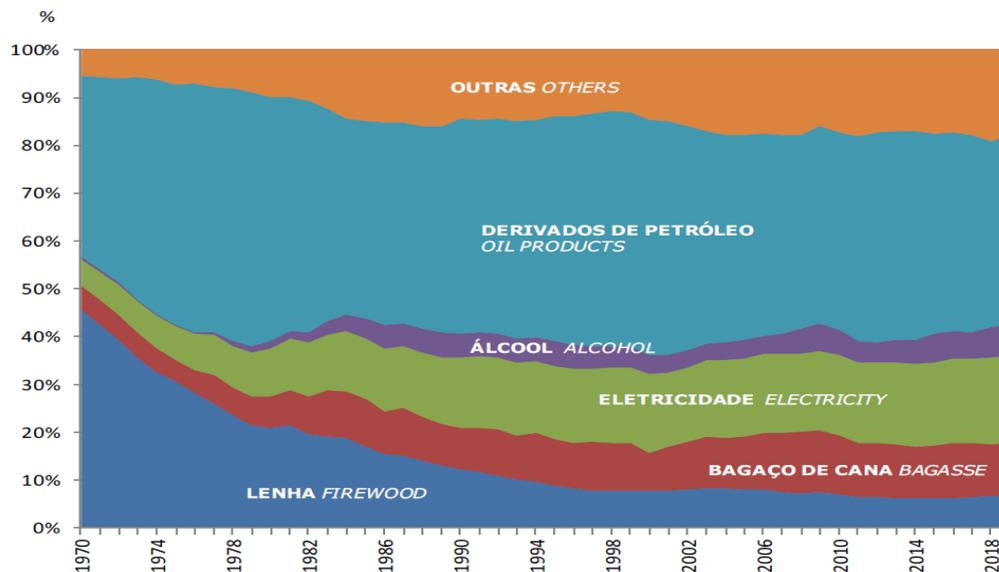
Além disso, a maioria dos cenários desenvolvidos por economistas é baseada em crescimento constante da demanda global de energia nos próximos 20 anos. Nestas projeções, as necessidades globais de energia aumentam mais lentamente do que no passado, mas ainda se expandem em 30% entre hoje e 2040. Isso equivale a adicionar outra China e Índia à demanda global de hoje (SHAHIR et al., 2014; IEA, 2017).

Atualmente, o petróleo ainda é a fonte energética primária dominante no mundo. Na verdade, esta hegemonia do petróleo já perdura há muitos anos, e um reflexo disto é o fato de os seus derivados terem sido os principais combustíveis utilizados nos veículos automotores durante todo o século XX. Apesar disto, tecnologias vêm consolidando combustíveis alternativos e conduzindo a uma tendência de que, progressivamente, a prevalência do petróleo possa ser substituída por outras fontes energéticas (GUEDES et al., 2018).

Os recursos do petróleo como combustível estão diminuindo dia a dia e a crescente demanda de combustíveis, bem como, regulamentações cada vez mais rigorosas, representam um desafio para a ciência e a tecnologia. Com a comercialização da bioenergia, proporcionou-se um meio eficaz de combater o problema da escassez de petróleo e a influência no meio ambiente (XUE et al., 2011).

A utilização de energia no Brasil, segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2020, com dados históricos de 1970 a 2019, está representada na Figura 1. O petróleo é a fonte de energia predominante no consumo energético brasileiro, mas a participação do bagaço de cana e álcool tem crescido nos últimos anos. As projeções indicam que a participação do Brasil, no uso direto e indireto de fontes renováveis em seu consumo final de energia, aumenta de 39% hoje para 45% em 2040, em comparação com uma progressão global de 9% para 16% no mesmo período (IEA, 2017).

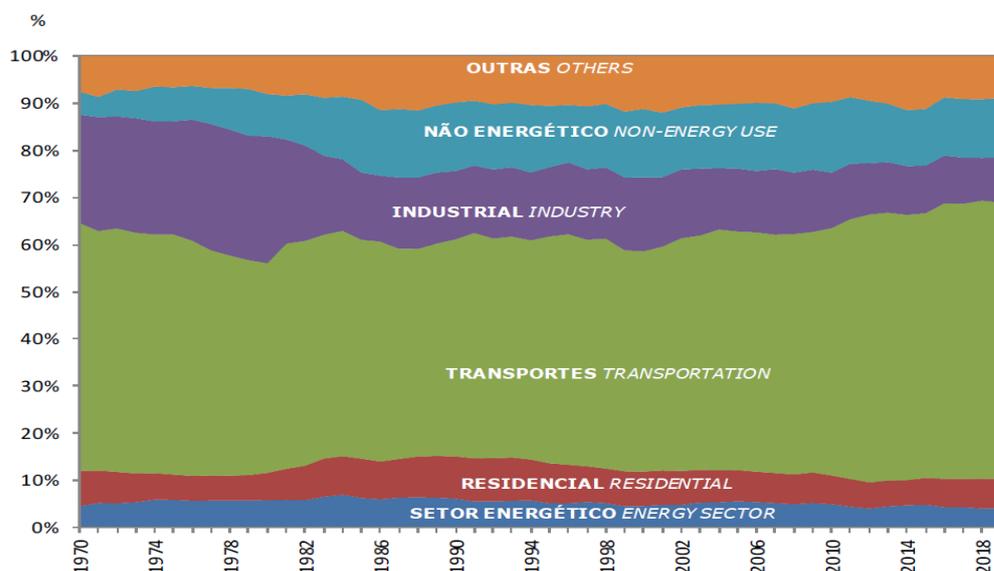
Figura 1 - Consumo final por fonte de energia – dados de 1970 até 2019



Fonte: (EPE, 2020).

O consumo dos produtos derivados do petróleo distribuídos por setor da economia, de 1970 a 2019, pode ser observado na Figura 2. Essa dependência do petróleo é devido, principalmente, ao setor de transportes que em 2019 representou 33% do consumo final de energia e 59,5% do consumo de derivados de petróleo. Já o setor agropecuário representou 4,5% do consumo final de energia e 5% do consumo de derivados de petróleo (EPE, 2020).

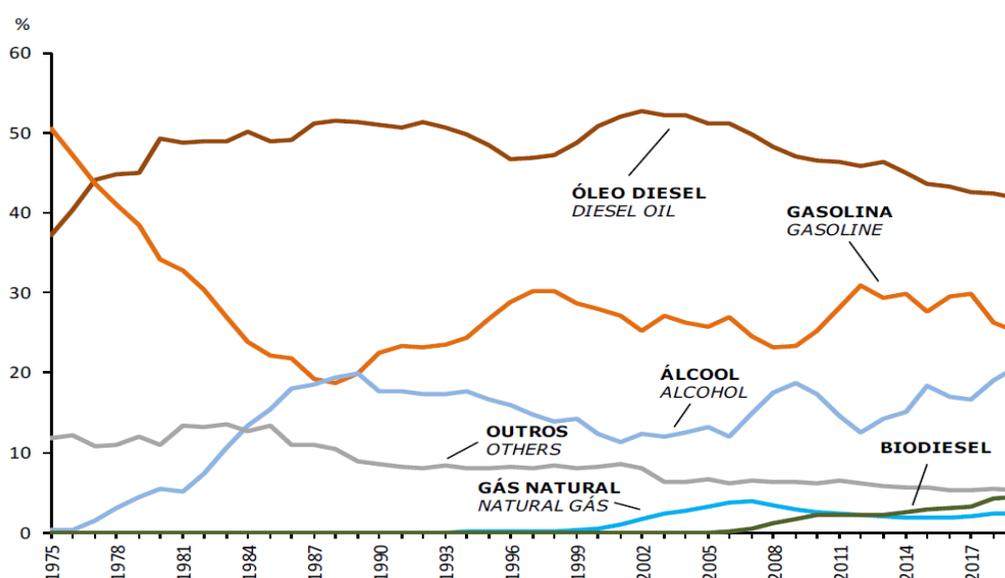
Figura 2 - Composição setorial do consumo de derivados de petróleo – dados de 1970 até 2019



Fonte: (EPE, 2020).

A Figura 3 apresenta a estrutura de consumo de combustíveis utilizados no setor de transportes no período 1975 a 2019. Pode-se observar nesta figura que, entre os derivados de petróleo, o óleo Diesel continua a representar uma fonte essencial para a economia brasileira (45% do setor de transportes em 2014, 43,6% em 2015, 43,3% em 2016, 42,6% em 2017, 42,5% em 2018 e 41,9% em 2019) devido a sua intensa utilização na área de transporte terrestre de cargas e passageiros, mesmo com o decréscimo percentual da sua participação ao longo dos anos (EPE, 2020).

Figura 3 - Estrutura do consumo de combustíveis no setor de transportes – dados de 1975 até 2019



Fonte: (EPE, 2020).

De acordo com o plano decenal (2014-2024) do Ministério de Minas e Energia, a demanda por óleo Diesel deve chegar a quase 72 bilhões de litros em 2024, valor 22,39% superior ao consumo de 2019. Esta projeção do consumo de óleo Diesel combustível é baseada na demanda do setor de transportes com o aumento dos veículos rodoviários (ônibus e caminhões), veículos comerciais leves, transporte aquático e ferroviário (EPE, 2016; PRADELLE, 2017; EPE, 2020).

A instabilidade econômica, que impactou o país a partir de 2014, resultou em uma queda de 6,0% do consumo de óleo Diesel e uma alta de 9,5% do consumo de gasolina automotiva para o ano de 2016. A redução no consumo de Diesel ocorreu em função da queda da atividade econômica em 2015. Para o ano de 2017 o consumo aumentou 1,05% em relação a 2016, 0,78%

em 2018 em relação a 2017 e 2,0% em 2019 em relação a 2018. O setor de transportes respondeu por 81,6% do consumo final energético de óleo Diesel no ano de e 2019 (EPE, 2016; EPE, 2017; EPE, 2018; EPE, 2019; EPE 2020).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de cana-de-açúcar, no ano de 2019, alcançou 639 milhões de toneladas. Este montante foi 2,3% superior ao registrado no ano anterior, quando a moagem foi de 624,5 milhões de toneladas. A produção de etanol anidro registrou um decréscimo de 11,6%, totalizando 10,61 bilhões de litros. Já para o biodiesel, o percentual de B100 (100% biodiesel) adicionado compulsoriamente ao óleo Diesel mineral elevou-se para 10% em 2018 e 11% em setembro de 2019. A principal matéria prima foi óleo de soja, com 61%, seguido pelo sebo bovino, com 10,3% (EPE, 2019; EPE, 2020).

## 2.2 PARÂMETROS DE DESEMPENHO DOS MOTORES CICLO DIESEL

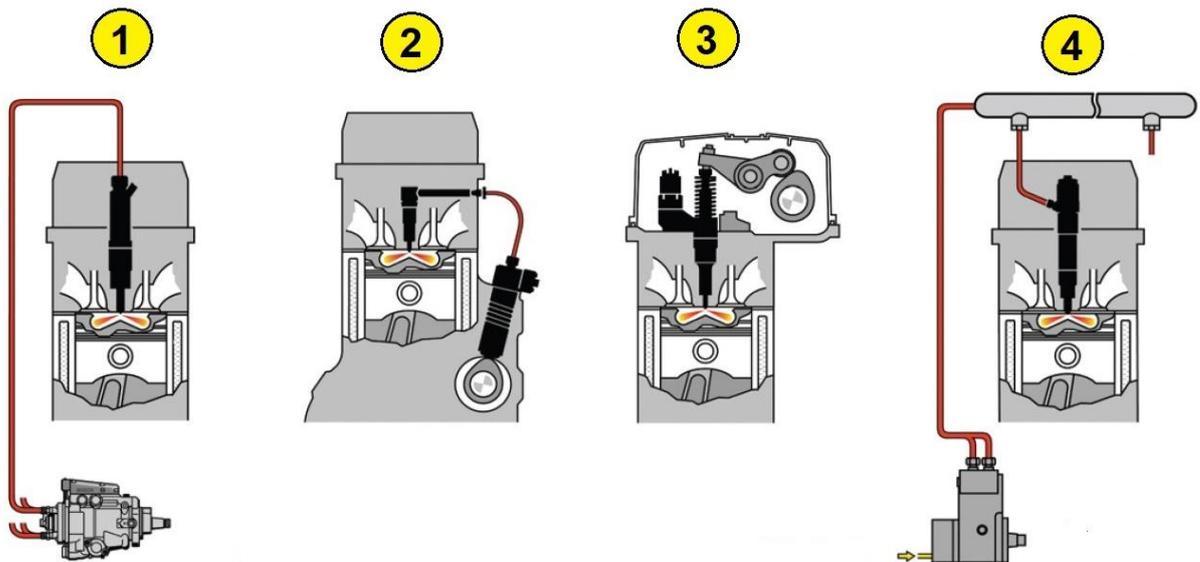
### 2.2.1 Sistemas de injeção e tratamento de gases

A regulagem da quantidade de combustível injetada no motor ocorreu durante muitos anos exclusivamente por um sistema mecânico (bomba injetora convencional), devido a sua simplicidade e menor custo, baseado na força centrífuga que se gerava sobre massas em rotação em torno de um eixo com velocidade proporcional à do motor (governador da bomba injetora). A alavanca do acelerador seleciona o regime que se deve se atuar o regulador de injeção, e cada variação de sua velocidade de giro, faz com que se altere a quantidade injetada pela bomba no motor, aumentando ou reduzindo a injeção para compensar a variação de carga (MÁRQUEZ, 2012).

No entanto, com os limites de emissões de gases poluentes e material particulado cada vez mais rigorosos, exigidos ao longo dos anos principalmente pelas normativas americana e europeia aos veículos leves e pesados, rodoviários e fora de estrada, desenvolveu-se paulatinamente novos sistemas de injeção, especialmente com a introdução da eletrônica para auxiliar no gerenciamento. Segundo Deep, Sandhu e Chander (2017), o gerenciamento eletrônico permite a utilização de várias estratégias para atingir os mais diversos níveis de emissões, o que não seria possível com sistemas mecânicos. Atualmente, existem distintos sistemas de atuação do controle eletrônico da injeção de combustível em motores ciclo Diesel, dentre eles: sistema de bomba unitária (UPS – *unit pump system*), sistema de injetor unitário

(UIS – *unit injector system*) e o sistema de tubo condutor comum (CR – *Common Rail system*) (Figura 4).

Figura 4 - Vista esquemática dos principais sistemas de injeção direta de combustível para motores ciclo Diesel: (1) Sistema com bomba injetora convencional; (2) Sistema de bomba unitária – UPS; (3) Sistema de injetor unitário – UIS; (4) Sistema de tubo condutor comum - CR



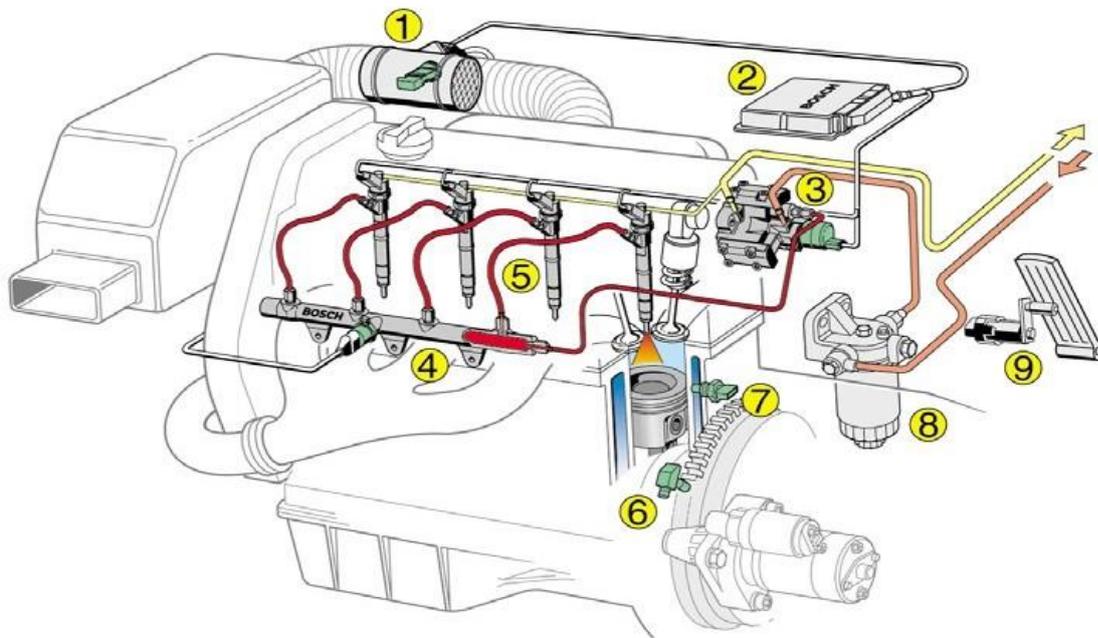
Fonte: Adaptado de REYNOLDS et al. (2007).

O sistema UPS é um sistema de bomba individual, conhecido por bomba/tubo/bico, onde cada unidade injetora possui sua bomba, e é utilizado em motores que utilizam o comando de válvulas no bloco do motor. O sistema UIS, conhecido por bomba/bico, desempenha a função de bomba de alta pressão diretamente no corpo do bico injetor, sendo utilizado em motores com comando de válvulas no cabeçote do motor. Ambos são gerenciados por uma unidade de controle eletrônico (ECU – *eletronic control unit*), que reúne as informações dos diversos sensores instalados no motor, e calcula com precisão a quantidade e o tempo de injeção para cada condição de velocidade angular e carga, garantindo o melhor funcionamento do motor (ORTIZ-CAÑAVATE, 2012; BOSCH, 2016).

O sistema CR destaca-se pela separação dos sistemas de geração de pressão e injeção. A bomba gera a alta pressão, que é conduzida a um tubo condutor comum (do inglês *Common Rail*), e pode ser controlada independente da velocidade angular do motor, tendo controle total sobre o processo de injeção (sequência, momento e tempo de injeção), distinguindo-se dos sistemas anteriores. Permite a possibilidade de injeções múltiplas em um mesmo ciclo (pré-

injeção, injeção principal e pós-injeção), contribuindo para um melhor controle de emissões e maior rendimento térmico, além de menor nível de ruídos (devido à pré-injeção). Trabalha com um sistema de barramento CAN (*Controller Area Network*), que possibilita a troca de dados com outras ECU, como a de gerenciamento do câmbio, do sistema de levante de três pontos e da TDP, além de facilitar o diagnóstico de falhas (BOSCH, 2016). A Figura 5 mostra a vista esquemática de um sistema CR para um motor ciclo Diesel de quatro cilindros, em conjunto aos principais sensores.

Figura 5 - Vista esquemática dos principais componentes de um sistema de injeção de combustível *Common Rail* para um motor ciclo Diesel



Onde: (1) Sensor de massa de ar; (2) ECU; (3) Bomba de alta pressão; (4) Tubo acumulador de pressão e distribuidor de combustível, sensor de pressão do tubo e eletroválvula reguladora de pressão; (5) Bicos injetores; (6) Sensor de velocidade angular do virabrequim; (7) Sensor de temperatura do motor; (8) Filtro de combustível; (9) Sensor do pedal do acelerador

Fonte: Adaptado de BOSCH (2018).

O sistema de injeção por bomba injetora convencional (injeção direta mecânica) é até hoje utilizado nos tratores agrícolas comercializados no Brasil. Segundo Schlosser et al. (2020), de um total de 305 modelos de tratores ofertados no mercado brasileiro no ano de 2020, 53,77% dos modelos (164 un.) possuíam bomba injetora convencional. Embora o sistema trabalhando unicamente não atenda os limites de emissões estabelecidos pela MAR-1, com a associação de sistemas de tratamento de gases, é possível atingir os limites previstos e atender a legislação.

Os motores ciclo Diesel produzem maiores emissões quando comparados com os de ciclo Otto, especialmente  $\text{NO}_x$  e MP, e têm sido a grande preocupação dos órgãos reguladores ambientais (WALSH, 1993; BRIJESH e SREEDHARA, 2013). Mas é o CO o poluente mais perigoso que os motores de combustão interna emitem, sendo venenoso para todas as formas de vida. A inalação deste gás remove o oxigênio do sangue das pessoas e a exposição prolongada pode ser fatal (TORRES et al., 2003).

Essa problemática vai ao encontro com as regulamentações de emissões impostas aos motores ciclo Diesel veiculares, que são cada vez mais rígidas. Estas levaram ao uso de tecnologias de pós-tratamento de gases de escape para reduzir os níveis de emissões de poluentes, principalmente o  $\text{NO}_x$  e MP (GERALD LIU et al., 2010), e a utilização de óleo Diesel com maior número de cetano e menor teor de enxofre (ANFAVEA, 2016). Desde 1995, a tolerância em termos de emissões de poluentes (CO, HC, MP e  $\text{NO}_x$ ) tem sido cada vez mais restritivas (MIRAVAL et al., 2013).

As tecnologias para tratamento dos gases em motores de máquinas agrícolas, utilizadas quando o sistema de injeção adotado não atende aos limites de emissões de gases exigidos pela legislação, são, principalmente, o sistema de recirculação dos gases de escape (EGR – *Exhaust Gas Recirculation*) e o sistema de pós-tratamento com a redução catalítica seletiva (SCR – *Selective Catalytic Redution*).

O EGR é uma das estratégias para reduzir as emissões de  $\text{NO}_x$ . Este sistema efetua a recirculação de parte dos gases da combustão, retornando-os à admissão, diminuindo assim a concentração de oxigênio e aumentando a temperatura da carga de ar de admissão. Em alguns casos são utilizados radiadores para resfriar os gases de escape antes de retornar a admissão, reduzindo a temperatura de combustão e conseqüentemente as emissões de  $\text{NO}_x$ . No entanto, o EGR pode aumentar o desgaste do motor, impactar negativamente na potência e consumo de combustível, além de aumentar as emissões de material particulado (REYNOLDS et al, 2007; BRIJESH e SREEDHARA, 2013).

Já na tecnologia de pós-tratamento SCR, um reagente líquido a base de ureia (ARLA 32) é pulverizado nos gases de escapamento, ocorrendo uma reação química no catalisador que praticamente neutraliza a geração de  $\text{NO}_x$ . Nos casos da utilização do SCR, pode haver um mecanismo de avaliação conhecido como OBD (*On-Board Diagnose*), que identifica a presença do ARLA 32 e também registra as falhas causadas pelo não uso do reagente. Além disso, o OBD também poderá reduzir a potência do motor no caso de falta de Arla 32, além de alertar o operador por meio de luzes indicadoras no painel. Quanto ao material particulado (MP), esse poluente é reduzido no próprio motor durante a combustão (ANFAVEA, 2016).

### 2.2.2 Comportamento típico de desempenho do motor

No mercado existem diversos modelos de tratores. No momento da compra a escolha do agricultor se baseia na potência, no conforto, na facilidade de manobra, na manutenção e no preço. Silveira e Gil Sierra (2010) enfatizam que o conhecimento da eficiência energética do trator poderia ser um item a mais a ser considerado em sua seleção. Dentre todos estes, a potência máxima do motor é a mais levada em consideração na aquisição, já que se trata do fator mais relevante para a definição do preço do trator, além de ser a considerada quando se realizam os cálculos de dimensionamento para harmonizar o trator com os equipamentos (SIMONE et al., 2006).

Dados de torque, potência e consumo específico de combustível podem ser obtidos através de ensaios dinamométricos, devendo ser realizados sem interferência comercial (FARIAS; SCHLOSSER, 2018). Os ensaios dinamométricos de motores de tratores agrícolas podem ser realizados diretamente no volante do motor ou através da tomada de potência (TDP) do trator.

Quando o ensaio é realizado através da TDP, os resultados encontrados serão menores, se comparados aos resultados obtidos diretamente no volante do motor, devido as perdas de transmissão. As instruções técnicas ASAE 496.3 e ASAE D497.7 indicam perda aproximada de 10% entre o motor e a TDP (ASABE, 2006, 2015). Já Márquez (2012), em função da complexidade da transmissão e sua relação com a TDP, indica variação destas perdas entre 4 e 12%.

Vsórov (1986) denomina como curva de desempenho de um motor a representação gráfica dos dados, obtida por via experimental, e também a classifica em dois grupos, como típica ou especial. Como exemplo de uma curva típica, Liljedah et al. (1996) destacam que um critério de desempenho é a "capacidade de carga" do motor ou, mais precisamente, a curva de torque. Relatam que sua representação pode ser expressa em percentagem do máximo torque em relação a velocidade angular do motor ( $\text{rpm}^1$ ), como também através da relação do torque do motor em N.m versus a rpm.

Por convenção adotada em normas técnicas, as características de desempenho do motor, obtidas por meio dos ensaios dinamométricos, possuem suas variáveis respostas apresentadas na forma de tabelas e figuras (curvas), rigorosamente especificadas de acordo com o respectivo

---

<sup>1</sup> De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade utilizada para velocidade angular é radianos por segundo ( $\text{rad.s}^{-1}$ ). No entanto, como uma rotação completa do virabrequim é representada por  $2.\pi$ , para facilitar o entendimento utilizamos rotações por minuto (rpm), que representa  $1 \text{ rpm} = 2.\pi.60^{-1} \text{ rad.s}^{-1}$ .

padrão de ensaio utilizado, visto que, as características de funcionamento, para um mesmo espécime, podem variar significativamente dependendo das condições em que foram realizadas as mensurações (MIALHE, 1996; MÁRQUEZ, 2012; FARIAS, 2014).

De acordo com Schlosser, Bertinatto e Herzog (2020), a medida da potência varia com o protocolo estabelecido pela norma oficial que se está utilizando no momento do ensaio ou prova de medição deste parâmetro. Para cada norma se estabelecem procedimentos, que podem provocar resultados diferentes. Os principais protocolos (Quadro 1) estão estabelecidos no Código OCDE, normas ISO 14396, SAE J1995, SAE J1349, DIN 70020 e diretivas europeias 80/1269/CEE e 2000/25/CE e o regulamento ECE R24.

Quadro 1 – Comparação de potências ao aplicar diferentes normas de ensaio em um mesmo motor, tomando como referência os resultados obtidos segundo a norma DIN 70020

Norma	Pressão atmosférica (bar)	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura combustível (°C)	Tipo de combustível (kJ/kg)	Potência obtida (%)
SAE J1995	1	25	40	43300	111
ISO 14396	0,99	25	37-43	CEC RF75T96	107
97/68/CE	0,99	25	33-43	anexo IV	107
SAE J1349	1	25	40	43300	104
ECE R24	0,99	25	40,5	CEC RF03A84	104
DIN 70020	1	25	40	fabricante	100
80/1269/CEE	0,99	25	40,5	fabricante	99
OCDE	> 0,966	16-30	fabricante	fabricante	-

Fonte: Adaptado de MÁRQUEZ (2012).

Ainda segundo Schlosser, Bertinatto e Herzog (2020), entre o que se estabelece nestes protocolos, as principais diferenças de procedimento são o padrão de correção para temperatura ambiente e pressão atmosférica, a referência de temperatura e do tipo do combustível, além da supressão ou não de elementos consumidores de potência (acessórios necessários ao funcionamento do motor) (Quadro 2).

Uma norma menos restritiva não considera a potência demandada pelo filtro de ar, escapamento, bomba de água, radiador e ventilador, podendo apresentar diferenças de até 12,1% no torque e potência em relação ao que se obtém com outra norma ou protocolo citado.

Quadro 2 – Acessórios do motor considerados para a determinação da potência conforme cada norma

Norma	Acessórios do motor							
	Bomba injetora	<i>Aftercooler</i>	Turbocompressor	Filtro de ar	Escapamento	Bomba de água	Radiador	Ventilador
SAE J1995	X	X	X					
ISO 14396	X	X	X	X	X	X		
97/68/CE	X	X	X	X	X	X		
ECE R24	X	X	X	X	X	X	X	X
DIN 70020	X	X	X	X	X	X	X	X
80/1269/CEE	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Adaptado de SCHLOSSER, BERTINATTO e HERZOG (2020).

Nos últimos anos, na busca por incrementar a eficiência dos motores e atender as normativas de emissões de gases poluentes, houve o aumento da oferta de motores sobrealimentados, com *aftercooler* e gerenciamento eletrônico da injeção de combustível. Inclusive, novas tecnologias foram implantadas, como o dimensionamento dos coletores de admissão com melhor aproveitamento das ondas de pressão (ressonância) (MAZZARO et al., 2020), dentre outras. Desse avanço, resultou que as curvas que representam o desempenho são distintas daquelas que se conseguiam com motores clássicos ou antigos, equipados com sistemas de gerenciamento mecânico da injeção e aspiração natural (BERTINATTO et al., 2021).

De uma forma simplificada, a potência (kW) é o produto entre velocidade angular do motor (rpm) e o torque (N.m), significando que para um mesmo torque, uma maior velocidade angular do motor resultará em maior potência. Nos motores clássicos, o comportamento do sistema mecânico é transferido a curva de potência do motor, obtida no ensaio dinamométrico e representada no plano cartesiano, no formato de um pico (ponto máximo), sendo este o ponto de potência máxima, e após isso, com maior imposição de carga o motor tende a desacelerar, diminuindo a potência e a velocidade angular. Nesses motores, o ponto de potência máxima é também conhecido como o de potência nominal (BERTINATTO et al., 2021). Após, conforme Simone et al. (2006), o intervalo entre velocidade angular de potência máxima (ou rotação

nominal) e a velocidade angular máxima do motor, é conhecida como zona de ação do regulador ou governador de rotação.

Atualmente, observa-se a utilização de motores com diferentes regulações no sistema de injeção que permitem aumentar a sua elasticidade fornecendo uma faixa de “potência constante”, devido a forma quase plana da curva de potência e obtenção da potência máxima antes da potência nominal (MÁRQUEZ, 2012). A potência nominal, em geral, é declarada pelo fabricante, e corresponde ao regime de utilização em que o motor desenvolve a sua potência máxima de forma contínua (SIMONE et al., 2006). Nos tratores agrícolas modernos, a potência máxima ocorre, em média, de 100 a 500 rpm antes da potência nominal.

Em motores de injeção direta mecânica e turboalimentados, o intervalo de potência constante é obtido através da utilização de uma bomba de injeção de dois estágios. No primeiro estágio, a injeção se comporta de maneira similar aos motores com bomba injetora convencional. Já no segundo estágio, ocorre a injeção contínua de combustível de forma que a queda da velocidade angular do motor é compensada com o aumento da pressão média de combustão no cilindro, resultando na manutenção ou aumento da potência ao invés de sua diminuição (MÁRQUEZ, 2012).

Desta forma, motores com faixa de potência constante permitem a realização de operações com velocidades angulares menores, buscando a faixa de melhor eficiência energética e, por consequência, o menor consumo de combustível. No entanto, para isto se exige um motor superdimensionado, ao que se limita a potência máxima que se poderia produzir com um sistema de injeção mais aprimorado (BERTINATTO et al., 2021).

Este conceito de potência constante é perceptível também nas famílias de motores adotadas pelos fabricantes, onde um mesmo projeto de motor atende uma ampla gama de potências através do uso de tecnologias como a de quatro válvulas por cilindro, eixo comando de válvulas variável na admissão e/ou escapamento, sobrealimentação, *aftercooler* e sistemas eletrônicos de gerenciamento de motores (BERTINATTO et al., 2021).

O uso de unidades eletrônicas, para o controle da injeção de combustível no motor, permite que os fabricantes desenvolvam mapas de injeção atribuindo a um trator a faixa de potência constante que desejar. Esta concepção também pode ser aplicada às faixas de torque do motor, resultando em um intervalo de torque constante. Importante ressaltar que nas famílias de motores, geralmente, temos duas condições da utilização do motor: uma com o motor superdimensionado nos tratores de menor potência; outra com o motor subdimensionado nos tratores de maior potência. Isto impacta no desempenho, eficiência e durabilidade dos mesmos (BERTINATTO et al., 2021).

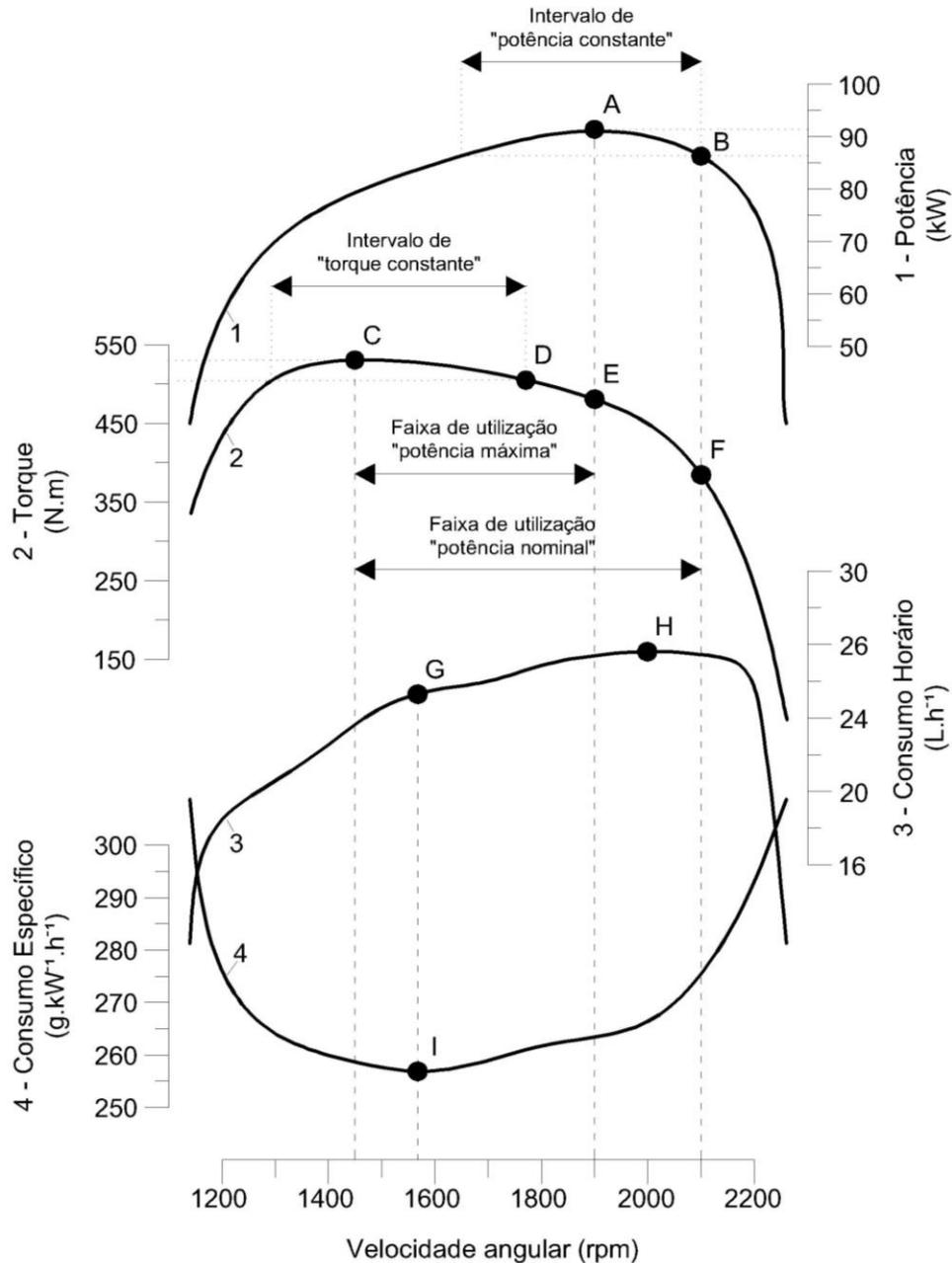
Já os modos *Booster* e *Eco* são exemplos de curvas de torque e potência programadas adicionalmente no mapeamento do motor eletrônico. O modo *Booster* pode ser acionado automaticamente, quando o trator identifica uma sobrecarga no sistema hidráulico, ou também no transporte em alta velocidade, ou ainda, quando é demandada alta potência com a TDP acionada, por exemplo. Porém, é válido salientar ainda que o *Booster* fornece um aumento de torque e potência por um pequeno intervalo de tempo, o suficiente para superar a sobrecarga dos sistemas, retornando na sequência para a condição original. Neste sentido, o valor de potência com *Booster* não deve ser considerado para fins de dimensionamento de conjuntos mecanizados (BERTINATTO et al., 2021).

Já o modo *Eco* é usualmente acionado de forma manual, seja por um botão específico ou através de escalonamentos diferenciados de marchas, em uma integração motor e transmissão que altera os mapas de injeção. Este sistema permite que o operador altere as estratégias do mapeamento do motor ao realizar uma atividade que demande pouco esforço, priorizando assim a eficiência máxima do motor e, conseqüentemente, a economia de combustível. Essas curvas adicionais programadas no motor levam a outros pontos nominais e máximos, por ter um traçado completamente distinto da curva padrão do motor.

Os resultados dos ensaios dinamométricos de motores são normalmente apresentados da forma especificada pela respectiva norma de ensaio. Já os dados apresentados pelos fabricantes são dos pontos de maior interesse (torque máximo, potência máxima e nominal, consumo de combustível, faixa de potência e torque constante, etc.). Juntando o comportamento dos motores equipados com gerenciamento eletrônico da injeção de combustível, que também podem apresentar o comportamento de potência e/ou torque constante, a adoção das famílias de motores, em consonância e inclusão aos trabalhos de Vsórov (1986), Goering (1992), Liljedah et al. (1996), Mialhe (1996), Srivastava, Goering e Rohrbach (1996), Simone et al. (2006) e Márquez (2012), além dos resultados de ensaios de motores obtidos pelo laboratório Agrotec (UFSM) nos anos de 2010 a 2020, e dos dados das principais estações de ensaios mundiais, apresenta-se na Figura 6 as curvas de desempenho típicas e os principais pontos caracterizadores do funcionamento a plena carga para um motor de trator agrícola, quatro cilindros, quatro válvulas por cilindro, volume deslocado de 4400 cm<sup>3</sup>, turboalimentado com *aftercooler*, EGR e sistema de injeção de combustível com gerenciamento eletrônico do tipo *Common Rail* (BERTINATTO et al., 2021).

A curva 1 representa o comportamento da potência, a 2 do torque, a 3 do consumo horário de combustível e a 4 do consumo específico de combustível, sendo os resultados para a velocidade angular momentânea a plena carga. São nove pontos, conforme descritos a seguir:

Figura 6 – Comportamento típico de desempenho de um motor ciclo Diesel, turboalimentado e com sistema de gerenciamento eletrônico da injeção de combustível, e os principais pontos caracterizadores do funcionamento a plena carga



A – Ponto de potência máxima; B – Ponto de potência nominal; C – Ponto de torque máximo; D – Ponto limite superior da faixa de torque constante; E – Ponto de torque de potência máxima; F – Ponto de torque de potência nominal ou torque nominal; G – Ponto de consumo horário ótimo; H – Ponto de consumo horário máximo; I – Ponto de consumo específico mínimo;

Fonte: Bertinatto et al. (2021), baseado nos trabalhos de Vsórov (1986), Goering (1992), Liljedah et al. (1996), Mialhe (1996), Srivastava, Goering e Rohrbach (1996), Simone et al. (2006) e Márquez (2012), dos ensaios dinamométricos do laboratório Agrotec-UFSM dos anos de 2010 a 2020 e dos dados das principais estações de ensaio mundiais.

A – Ponto de potência máxima – representa o máximo valor atingido no ensaio do motor, pelo produto torque *versus* velocidade angular;

B – Ponto de potência nominal – em geral é declarada pelo fabricante, e situa-se em velocidade angular superior a potência máxima;

C – Ponto de torque máximo – expressa a condição operacional onde ocorre o maior valor para a pressão média efetiva capaz de ser desenvolvida nos cilindros do motor. Este ponto marca o limite inferior da faixa de utilização do motor ( $FU_{Pm}$ ) e da faixa de utilização considerando o intervalo de potência constante ou potência nominal ( $FU_{Pn}$ );

D – Ponto limite superior da faixa de torque constante – é o local da curva onde os valores da faixa de torque mantem-se constante desde seu ponto máximo;

E – Ponto de torque de potência máxima – é o torque desenvolvido na velocidade angular do motor que permite a obtenção da potência máxima. Este ponto marca o limite superior da  $FU_{Pm}$ ;

F – Ponto de torque de potência nominal ou torque nominal - é o torque desenvolvido na velocidade angular do motor que permite a obtenção da potência nominal. Este ponto marca o limite superior da  $FU_{Pn}$ ;

G – Ponto de consumo horário ótimo – corresponde ao consumo horário na velocidade angular em que ocorre o consumo específico mínimo;

H – Ponto de consumo horário máximo – condiz ao ponto em que ocorre o máximo consumo de combustível pelo motor;

I - Ponto de consumo específico mínimo – é o ponto em que ocorre o máximo rendimento termodinâmico, sendo assim, a condição operacional ideal em termos de velocidade angular e torque para o motor (MIALHE, 1996).

O conhecimento do consumo específico mínimo e consumo horário máximo de combustível, além da busca por motores mais eficientes, auxilia na gestão de frotas (controlando desvios de combustíveis) e diagnóstico de falhas mecânicas. Alonso (2014) apud Farias et al. (2017b) relata que o consumo de combustível é um dos aspectos mais importantes na utilização de um trator agrícola, devido ao preço de comercialização do óleo Diesel.

Segundo Mialhe (1996), as rotações de torque máximo e potência máxima delimitam a chamada faixa de utilização ( $FU_{Pm}$ ) do motor. Nessa faixa o motor apresenta funcionamento estável, se autorregulando para pequenas variações no torque resistente. A autorregulação é especificada pelo que Garcia e Brunetti (1992) chamam de índice de elasticidade (IE), sendo que quanto maior o torque e maior a  $FU_{Pm}$ , mais alto é este índice e mais elástico será o motor. Simone et al. (2006) definem a elasticidade do motor como a capacidade de absorver

determinada sobrecarga, sem parar ou desligar, permitindo sobrepor e seguir funcionando, sobrecarregado, até cessar a sobrecarga, permitindo retornar ao regime de trabalho inicial.

Mialhe (1996) aponta como outro parâmetro caracterizador da  $FU_{Pm}$  a plena carga, denominado capacidade de sustentação do conjugado ou reserva de torque. Segundo Bertinatto et al. (2021), ela é calculada pela faixa de torque existente entre o Ponto E e o Ponto C, e apresentado os resultados em porcentagem. Nos últimos anos, talvez como estratégia de marketing, os fabricantes de tratores passaram a considerar a potência nominal para cálculo da reserva de torque do motor, ao invés da potência máxima. Assim, considerando a faixa de torque do Ponto F até o Ponto C. Como a potência nominal é determinada pelo fabricante, existe a possibilidade de majorar estes valores, colocando a potência nominal um pouco mais à frente na curva de potência do motor, estabelecendo assim uma maior reserva de torque, e assim justificando valores de 50% ou maiores divulgados por alguns fabricantes.

Desta forma, a  $FU_{Pn}$  passa a ocorrer devido a utilização pelos fabricantes do valor de potência nominal para os cálculos, e/ou pela adoção dos motores de potência constante (incluindo os motores com gerenciamento eletrônico da injeção). A faixa de torque constante passa a ocorrer devido as estratégias de injeção de combustível adotadas pelos fabricantes de motores, limitando a injeção de combustível em alguns pontos e adicionando em outros, ocorrendo assim uma faixa de mesmo torque, muito comum em motores advindos de famílias de motores e com subutilização, ou ainda, por estratégia de marketing das empresas. O mesmo ocorre com a metodologia de cada empresa para o cálculo da reserva de torque, se utiliza ou não os pontos de torque na potência máxima ou torque na potência nominal (BERTINATTO et al., 2021).

Deve ser mencionada também a queda do regime de velocidade angular em que ocorre a potência máxima, com o advento dos motores modernos. Com os motores clássicos, era comum a potência máxima situar entre 2200 a 2400 rpm. Devido a necessidade de redução das emissões de gases poluentes, que ocasionou o *downsizing* de motores, além da busca por redução do consumo e maior durabilidade, hoje os motores modernos apresentam potência máxima em regimes de 1600 a 1900 rpm (BERTINATTO et al., 2021).

Visando melhor representar estas informações fornecidas pelos fabricantes, foi realizado um compilado com os dados de potência nominal, potência máxima, potência máxima com *Booster* (Tabela 1), dos tratores comercializados no Brasil no ano de 2020, e que disponibilizam estas informações em seus catálogos. Foi possível constatar que a diferença percentual entre a potência máxima e a potência nominal de cada modelo de trator pode variar de 1,49% a 11,97% para um mesmo fabricante (fabricante A). Já o fabricante B tem como valor

de referência aproximadamente 9% de diferença entre as potências máxima e nominal em praticamente todos os seus modelos. O fabricante C apresenta apenas um modelo com as informações, e tendo como valores mínimo, médio e máximo 2,91%, e o fabricante D não apresenta diferenças entre potência nominal e a potência máxima. Estas diferenças percentuais, entre a potência máxima e a nominal, revelam que não existe um consenso entre os fabricantes para estipular os pontos de potência nominal, seguindo cada um uma estratégia específica. Para esta relação, o valor mínimo encontrado é 0%, a média geral 7% e a máxima 11,97%.

Tabela 1 - Potência nominal (Pn), potência máxima (Pm), potência máxima com *Booster* (Pmb) e suas diferenças percentuais. Compilado com todos os tratores comercializados no mercado brasileiro no ano de 2020, e que disponibilizam estas informações em seus catálogos

(continua)

Fabricante/ Modelo	Potência (kW)			Diferença (%)		
	Pn	Pm	Pmb	Pm/Pn	Pmb/Pn	Pmb/Pm
A -1	86,79	90,47	-	4,07%	-	-
A -2	97,09	98,56	-	1,49%	-	-
A -3	105,91	111,80	130,18	5,26%	18,64%	14,12%
A -4	115,47	123,56	141,95	6,55%	18,65%	12,95%
A -5	122,83	127,98	143,42	4,02%	14,36%	10,77%
A -6	133,86	143,42	153,72	6,67%	12,92%	6,70%
A -7	144,89	155,93	172,11	7,08%	15,81%	9,40%
A -8	156,66	164,02	175,05	4,48%	10,50%	6,30%
A -9	172,11	177,26	-	2,90%	-	-
A -10	183,87	208,88	234,62	11,97%	21,63%	10,97%
A -11	205,94	231,68	258,16	11,11%	20,23%	10,26%
A -12	228,74	255,22	280,96	10,37%	18,59%	9,16%
A -13	250,07	275,08	301,55	9,09%	17,07%	8,78%
A -14	275,81	302,29	317,00	8,76%	12,99%	4,64%
A -15	313,32	342,74	344,21	8,58%	8,97%	0,43%
A -16	350,83	380,25	385,40	7,74%	8,97%	1,34%
A -17	372,90	403,05	410,41	7,48%	9,14%	1,79%
A -18	398,64	439,83	450,86	9,36%	11,58%	2,45%
A -19	432,47	462,63	475,87	6,52%	9,12%	2,78%
A -20	462,63	492,05	508,23	5,98%	8,97%	3,18%
A -21	372,90	403,05	410,41	7,48%	9,14%	1,79%
A -22	462,63	492,05	508,23	5,98%	8,97%	3,18%
B - 1	147,10	161,81	-	9,09%	-	-
B - 2	158,13	174,31	-	9,28%	-	-
B - 3	169,16	186,08	-	9,09%	-	-
B - 4	198,58	218,44	-	9,09%	-	-
B - 5	216,97	238,30	-	8,95%	-	-
B - 6	235,36	258,90	-	9,09%	-	-

(conclusão)						
Fabricante/ Modelo	Potência (kW)			Diferença (%)		
	Pn	Pm	Pmb	Pm/Pn	Pmb/Pn	Pmb/Pm
B - 7	253,75	279,49	-	9,21%	-	-
B - 8	272,13	300,08	-	9,31%	-	-
B - 9	294,20	324,36	-	9,30%	-	-
B - 10	345,68	380,25	-	9,09%	-	-
B - 11	382,46	420,71	-	9,09%	-	-
B - 12	419,23	461,89	-	9,24%	-	-
B - 13	456,01	492,78	-	7,46%	-	-
B - 14	345,68	380,25	-	9,09%	-	-
B - 15	382,46	420,71	-	9,09%	-	-
B - 16	419,23	461,89	-	9,24%	-	-
B - 17	456,01	492,78	-	7,46%	-	-
C - 1	147,10	151,51	165,49	2,91%	11,11%	8,44%
E - 1	105,91	-	130,18	-	18,64%	-
E - 2	115,47	-	141,95	-	18,65%	-
E - 3	133,86	-	153,72	-	12,92%	-
E - 4	144,89	-	172,11	-	15,81%	-
E - 5	156,66	-	177,99	-	11,98%	-
E - 7	183,87	-	234,62	-	21,63%	-
E - 8	205,94	-	258,16	-	20,23%	-
E - 9	228,74	-	280,96	-	18,59%	-
E - 10	250,07	-	301,55	-	17,07%	-
E - 11	275,81	-	317,00	-	12,99%	-
E - 12	313,32	-	344,21	-	8,97%	-
E - 13	350,83	-	385,40	-	8,97%	-
E - 14	372,90	-	410,41	-	9,14%	-
E - 15	398,64	-	450,86	-	11,58%	-
E - 16	432,47	-	475,87	-	9,12%	-
E - 17	462,63	-	508,23	-	8,97%	-
F - 1	220,65	-	242,71	-	9,09%	-
F - 2	239,04	-	261,10	-	8,45%	-
F - 3	279,49	-	297,88	-	6,17%	-
F - 4	297,88	-	321,41	-	7,32%	-
F - 5	444,98	-	481,75	-	7,63%	-
G - 1	283,17	283,17	-	0,00%	-	-
G - 2	305,23	305,23	-	0,00%	-	-
G - 3	350,10	350,10	-	0,00%	-	-
G - 4	380,25	380,25	-	0,00%	-	-
		Máximo		11,97%	21,63%	14,12%
		Média		7,00%	12,96%	6,47%
		Mínimo		0,00%	6,17%	0,43%

Fonte: Dados de pesquisa. Elaborado pelo Autor.

Quanto a relação entre a potência nominal e a máxima com *Booster*, dois fabricantes (A e E) apresentam o mesmo comportamento, com variação de 8,97% a 21,63%. Para esta relação, o valor mínimo encontrado foi de 6,17%, a média geral 12,96% e a máxima 21,63%.

Os resultados da potência máxima em relação a potência máxima com *Booster* demonstram que um mesmo fabricante (fabricante A) apresenta variação de 0,43% a 14,12% entre todos os seus tratores, sendo estes os valores mínimos e máximos para toda a série. A média de 6,47% representa o incremento nos valores entre a potência máxima e a potência máxima no modo *Booster* para toda a série.

Com a mesma metodologia, este compilado de informações foi realizado para os dados de torque máximo e torque máximo com *Booster* (Tabela 2).

Tabela 2 - Torque máximo (Tm), torque máximo com *Booster* (Tmb) e suas diferenças percentuais. Compilado com todos os tratores comercializados no mercado brasileiro no ano de 2020, e que disponibilizam estas informações em seus catálogos

Fabricante/ Modelo	Torque (N.m)		Diferença (%)
	Tm	Tmb	Tmb/Tm
A -3	643	678	5,16%
A -4	690	748	7,75%
A -5	710	778	8,74%
A -6	760	800	5,00%
A -10	1229	1407	12,65%
A -11	1381	1558	11,36%
A -12	1531	1708	10,36%
A -13	1671	1750	4,51%
C - 1	850	897	5,24%
D - 1	1300	1390	6,47%
D - 2	1390	1500	7,33%
D - 3	1530	1590	3,77%
D - 4	1590	1600	0,62%
E - 1	643	678	5,16%
E - 2	690	748	7,75%
E - 3	760	800	5,00%
E - 4	860	965	10,88%
E - 5	866	984	11,99%
E - 7	1229	1407	12,65%
E - 8	1381	1558	11,36%
E - 9	1531	1708	10,36%
E - 10	1671	1750	4,51%
F - 1	1220	1300	6,15%
F - 2	1390	1500	7,33%
F - 3	1540	1600	3,75%
	Máximo		12,65%
	Média		7,44%
	Mínimo		0,62%

Fonte: Dados de pesquisa. Elaborado pelo Autor.

É possível verificar entre os dados informados de torque máximo e torque máximo com *Booster* que dois fabricantes, que compartilham família de motores, tem incrementos de 4,51% a 12,65% para modelos diferentes. Em toda a série, o menor incremento de torque máximo ao acionar o modo *Booster* foi em um modelo com 0,62%, a média situou em 7,44% e o valor máximo foi 12,65%.

### 2.3 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE NÍVEIS DE EMISSÕES EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS

No Brasil, o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) foi criado em 1986, e veio a definir os limites de emissões para veículos leves e pesados. Em outubro de 1993, a Lei nº 8.723 endossou a obrigatoriedade de reduzir os níveis de emissões veiculares, induzindo o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes de motores, autopeças e combustíveis, estabelecendo um novo padrão de veículos nacionais e importados.

O Proconve possui fases com redução progressiva das emissões de gases poluentes, sendo que a cada nova fase, a indústria automobilística deve desenvolver tecnologias que atendam os padrões estabelecidos. Em sua sétima fase, o Proconve P7 estabeleceu uma significativa diminuição dos níveis de emissões permitidos para a linha de veículos rodoviários leves e pesados a partir de 01 de janeiro de 2012. Já o Proconve MAR-1 (Máquinas Agrícolas e Rodoviárias – Fase 1), é o programa que estende as exigências de controle de emissões às máquinas agrícolas e de construção, sendo bastante similar à legislação norte-americana Tier-3 ou à europeia Euro Stage IIIA (CONAMA, 2011).

O Proconve MAR-1 impõe valores limites de emissões de HC, MP, CO e NO<sub>x</sub>, que podem ser visualizados no Quadro 3.

Quadro 3 - Limites máximos de emissões para motores de máquinas agrícolas e rodoviárias segundo o Proconve MAR-1

Potência Máxima (ISO 14396) (kW)	CO (g.kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	HC + NO <sub>x</sub> (g.kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	MP (g.kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )
130 ≤ P ≤ 560	3,5	4,0	0,2
75 ≤ P < 130	5,0	4,0	0,3
37 ≤ P < 75	5,0	4,7	0,4
19 ≤ P < 37	5,5	7,5	0,6

Fonte: CONAMA, 2011.

A legislação MAR-1 está vigente desde 2015, no primeiro momento impondo reduções nas emissões para máquinas de construção e rodoviárias, e a partir de 01 de janeiro de 2017 para as máquinas agrícolas, sendo aplicada de forma escalonada. Para as máquinas agrícolas fabricadas a partir de 2017, devem-se enquadrar os modelos a partir de 75 kW (101 cv) até 560 kW (761 cv), e a partir de 2019, todos os modelos com potência de 19 kW (25 cv) até 75kW (101 cv) (ANFAVEA, 2016).

Os limites que são estabelecidos pela MAR-1 apresentam valores similares a legislação americana Tier 3 e pela europeia Euro 3 – fase A, tendo em comum a utilização do somatório dos HC + NO<sub>x</sub>, ao invés de tratar ambas as emissões de forma individual, como nas legislações Tier e Euro mais recentes. No Quadro 4 é possível visualizar os limites máximos de emissões de emissões das principais normativas mundiais.

Quadro 4 – Valores limites de emissões de gases poluentes e material particulado das principais normativas mundiais para um motor de trator agrícola com potência de 100 kW

(continua)

Normativa	Referência	Mês/ano de implementação	Limites de emissões (g.kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )				
			CO	HC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	MP
Bharat I (Índia)		10/1999	14	3,5	18		
Bharat II (Índia)		06/2003	9			15	1
Bharat III (Índia)		10/2005	5,5			9,5	0,8
Bharat III-A (Índia)	Euro III A	04/2011	5			4	0,3
Bharat IV (Índia)	Euro IV	10/2020*	5	0,19	0,4		0,025
Bharat V (Índia)	Euro V	04/2024*	5	0,19	0,4		0,015
China I		2007	5	1,3	9,2		0,7
China II		2009	5	1	6		0,3
China III	Euro III A	2016	5			4	0,3
China IV	Euro V	2021*	5	0,19	0,4		0,015
Coréia do Sul	Tier 3	2013	5			4	0,3
Coréia do Sul	Tier 4 B	2015	5	0,19	0,4		0,02
Euro I		01/1999	5	1,3	9,2		0,7
Euro II		01/2004	5	1	7		0,3
Euro III A		2007	5			4	0,3
Euro III B		2012	5	0,19	3,3		0,025
Euro IV		2014	5	0,19	0,4		0,025

(conclusão)

Normativa	Referência	Mês/ano de implementação	Limites de emissões (g.kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )				
			CO	HC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	MP
Euro V		2020	5	0,19	0,4		0,015
MAR-1 (Brasil)	Euro III A/Tier 3	01/2017	5			4	0,3
Tier 1		1997			9,2		
Tier 2		2003	5			6,6	0,3
Tier 3		2007	5			4	0,3
Tier 4 A		2012	5			4	0,02
Tier 4 B		12/2014	5	0,19	0,4		0,02

\* Proposta de implementação.

Fonte: Dados de pesquisa. Elaborado pelo Autor.

## 2.4 COMBUSTÍVEIS

### 2.4.1 Óleo Diesel

O óleo Diesel<sup>2</sup> é composto predominantemente por hidrocarbonetos alifáticos contendo de 8 a 24 átomos de carbono na cadeia. Durante seu processo de produção, o Diesel é destilado do petróleo em temperaturas na faixa de 130 a 370°C. Comercialmente, a composição do Diesel varia de acordo com a origem do petróleo e com os variados processos de refino. No Brasil o consumo de óleo Diesel pode ser dividido em três grandes setores: o de transportes que representa mais de 81,63% do total consumido, o agropecuário representando 14,07% e os setores industrial e energético correspondendo a 4,23% do total de Diesel consumido no país. (MORETTI, 2013; EPE, 2020).

No Brasil são disponibilizados dois tipos de combustível óleo Diesel: o BS10 (10 ppm), com baixo teor de enxofre; e o BS500 (500 ppm), com alto teor de enxofre (PERIN et al., 2015). A letra S seguida do numeral indica a quantidade de enxofre em ppm. A letra B indica a presença de biodiesel, sendo que conforme a Lei nº 13.263/16, a partir de 01 de março de 2018, o óleo Diesel comercializado no mercado brasileiro ao consumidor final deve obrigatoriamente possuir 10% de biodiesel. Já com a resolução nº 789/2019 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), a partir de 01 de março de 2020, o óleo Diesel comercializado no mercado

---

<sup>2</sup> O óleo Diesel recebeu este nome em homenagem ao engenheiro alemão Rudolf Diesel. Por ser um nome próprio, neste trabalho será descrito com a letra inicial maiúscula.

brasileiro ao consumidor final possui 12% de biodiesel, passando para 13% em 01 de março de 2021 e 15% até 2023.

A resolução ANP nº 50, de 23 de dezembro de 2013, classifica dois tipos de óleos Diesel rodoviário no mercado brasileiro. O óleo Diesel tipo A é o combustível produzido nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores, destinado a veículos dotados de motores do ciclo Diesel, de uso rodoviário, sem adição de biodiesel. O óleo Diesel tipo B é o óleo Diesel tipo A acrescido de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente. O artigo 4º desta resolução, em seu parágrafo único, estabelece que para os segmentos agrícola, de construção e industrial somente é permitida a comercialização dos óleos Diesel tipo B de uso rodoviário. No setor agropecuário, a grande maioria das máquinas brasileiras operam com óleo Diesel BS500 (com presença de biodiesel e 500ppm de enxofre). O ANEXO A descreve as principais especificações do óleo Diesel tipo B.

#### **2.4.2 Biodiesel**

O uso de alta tecnologia nos processos mecanizados é importante para eficiência econômica e produtiva da agricultura. Atualmente, a maioria das máquinas utilizadas no meio rural é equipada com motores de ciclo Diesel, devido aos parâmetros técnicos (potência, torque e consumo específico) e confiabilidade. Assim, a melhoria na eficiência desses motores, ou até a adoção de novos combustíveis, é necessária para reduzir os impactos ambientais e os custos das atividades agrícolas (PERIN et al., 2015).

Os biocombustíveis têm atraído grande atenção internacional e nacional, principalmente em razão de instabilidades no preço do petróleo e da discussão mundial sobre a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> pelo uso de energias renováveis (KOHLHEPP, 2010; CHAUHAN et al., 2013). O uso de óleo vegetal em motores de combustão interna não é uma inovação recente. Rudolf Diesel (1858–1913), criador dos motores de ciclo Diesel, usou óleo vegetal de amendoim para demonstrar sua invenção em Paris em 1900 (PANWAR et al, 2010).

Desde 2005, o Brasil fomenta a inclusão gradativa de combustíveis alternativos ao óleo Diesel, com ênfase a óleos e gorduras vegetais e animais (FIORESE et al., 2012). Biodiesel é um combustível alternativo ao óleo Diesel mineral, produzido a partir de óleo vegetal ou gordura animal. É um combustível renovável, biodegradável e oxigenado, e pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa (XUE et al., 2011; ROSA et al., 2012). Pode ser usado em motores ciclo Diesel como combustível único ou como mistura Diesel-biodiesel. Estes exigem

pouca ou nenhuma modificação (AGARWAL, 2007; LAPUERTA, ARMAS e RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, 2008).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), através da Resolução nº 45 de 25 de agosto de 2014, define o biodiesel como sendo o combustível composto de alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de materiais graxos, de gorduras de origem vegetal ou animal, e que atenda a especificação contida no Regulamento Técnico ANP nº 3/2014 (ANP, 2014). No ANEXO B está listado a especificação do biodiesel conforme este regulamento.

O biodiesel é constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos a partir da reação química de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, normalmente metanol ou etanol. Segundo Machado (2008), quase a totalidade do biodiesel produzido no mundo caracteriza-se por ser um éster metílico e, para o caso brasileiro, o processo de obtenção desse combustível pode utilizar a soja, a mamona, o dendê e o girassol. Atualmente, são as oleaginosas de maior potencial para a produção de um biodiesel no Brasil, que geralmente é metílico devido a melhor performance no processo, apesar do preço mais elevado (importado) em relação ao etanol, apresentando assim um melhor custo-benefício.

Os principais materiais utilizados para a produção do biodiesel são óleos vegetais (óleo de soja, girassol, canola, mamona, dendê) e gorduras animais, como sebo bovino e gordura de frango e ainda, o óleo residual de frituras (SILVA et al., 2012). O óleo de soja é um dos óleos vegetais que têm potencial de uso como combustível para motores Diesel, pois é renovável, seguro e de fácil utilização (SCHLOSSER, MACHADO e CAMARGO, 2007).

No Brasil, o uso de biomassa como combustível alternativo para reduzir a dependência de combustíveis e emissões de gases de efeito de estufa tem sido conhecido por décadas. Na indústria, fabricantes de motores de diferentes setores já dominaram o uso do biodiesel nos motores do ciclo Diesel, permitindo uso completo ou parcial como combustível (FARIAS et al., 2017a).

Conforme Pereira et al. (2012), o biodiesel tem sido objeto de grande atenção nos últimos anos, devido ao impacto e passivos ambientais, além dos altos preços do Diesel oriundo de fontes fósseis. O biodiesel ainda possui elevado custo de produção, mas difere do Diesel por diversificar a matriz energética, além de reduzir as importações e a dependência do combustível fóssil. Ao biodiesel prevê-se, a exemplo do que ocorreu com o óleo Diesel convencional, o desenvolvimento de um vasto campo de pesquisas baseadas na utilização da eletrônica para o controle da injeção de combustível (MACHADO, 2003).

A Lei nº 13.263/2016, no 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 (IACONO, 2017).

Estudos anteriores demonstraram que a adição de biodiesel ao óleo Diesel resulta em aumento do consumo específico e maior emissão de óxidos de nitrogênio, redução das emissões de monóxido de carbono, de hidrocarbonetos e de material particulado (PERIN, 2015; SHAHIR et al., 2015a; AGARWAL et al., 2017; DUDA et al., 2018).

### **2.4.3 Etanol**

No Brasil, a decadência do fornecimento de petróleo nas décadas de 1970 e 1980 teve consequências muito fortes, pois o país importava 85% do petróleo consumido. Diante da elevação dos preços, que causou o aumento da dívida externa brasileira, o país optou por desenvolver outros combustíveis para reduzir seu endividamento. O governo, por meio de decretos, decidiu investir na criação de uma indústria voltada para a produção de um combustível renovável, visando reduzir a dependência do país pelo petróleo, sendo o “etanol” o produto escolhido (MORETTI, 2013).

Um dos principais fatores que viabilizou a produção em larga escala, capaz de abastecer o mercado brasileiro com razoável competitividade foi a cogeração, que permitiu a utilização do bagaço da cana, resultante do processo de extração do caldo, como combustível em termoelétricas que, por sua vez, produzem energia utilizada no próprio processo produtivo do etanol (CAMPOS, 2010).

A crescente necessidade de ampliar de modo sustentável o uso de fontes renováveis de energia, para proporcionar maior segurança ao suprimento energético e reduzir os impactos ambientais associados aos combustíveis fósseis, encontra no etanol de cana-de-açúcar uma alternativa economicamente viável e com significativo potencial de expansão (VANZELLA et al., 2014).

A ANP, por meio da Resolução nº 19 de 15 de abril de 2015, define o etanol como o combustível destinado ao uso em motores de ciclo Otto e que possui como principal componente o etanol, especificado sob as formas de álcool etílico anidro combustível ou etanol anidro combustível e, de álcool etílico hidratado combustível ou etanol hidratado combustível,

produzido e/ou comercializado pelos agentes econômicos, conforme preconiza a regulamentação da ANP (2015). O etanol anidro combustível é destinado ao distribuidor para compor mistura com a gasolina A na formulação da gasolina C, em proporção definida por legislação aplicável. O etanol hidratado combustível é destinado à venda no posto revendedor para o consumidor final. No ANEXO C está listada a especificação do etanol anidro e do etanol hidratado combustível.

#### **2.4.4 Misturas de Diesel/Biodiesel/Etanol**

A produção de biodiesel ainda não é suficiente para suprir a demanda de uma hipotética substituição integral ao óleo Diesel pelo referido combustível renovável. Por isso, dentre os combustíveis renováveis, o etanol desponta como uma boa alternativa de biocombustível, dada sua disponibilidade em larga escala. Não obstante, existem limitações quanto à proporção de etanol misturado ao Diesel devido à diferença de polaridade entre os álcoois e os hidrocarbonetos do óleo Diesel (PIDOL, 2012; GUEDES, 2017).

Segundo Estrada (2015), a utilização do etanol, adicionado ao óleo Diesel, ajudaria a reduzir a dependência deste combustível fóssil e as emissões de gases poluentes nos motores de tratores agrícolas. No entanto, existem dificuldades do ponto de vista técnico, devido ao etanol possuir baixo número de cetano, baixa lubricidade e pouca solubilidade no óleo Diesel mineral, como também, baixo ponto de fulgor.

Devido a estes fatores, utilizar o etanol em mistura ao óleo Diesel mineral, sem aditivos para promover a homogeneização e estabilidade, pode trazer consequências ao funcionamento e durabilidade do motor, além de limitar a porcentagem de mistura. Aditivos emulsificantes e co-solventes vem sendo utilizados, e misturas com até 15% de etanol no óleo Diesel podem ser consideradas seguras, do ponto de vista de durabilidade do motor (LAPUERTA, ARMAS e GARCÍA-CONTRERAS, 2007; RAKOPOULOUS et al., 2011; YILMAZ et al., 2014; SATHIYAMOORTHY e SANKARANARAYANAN, 2017). Pesquisas indicam que a adição de biodiesel no óleo Diesel mineral melhora a solubilidade com o etanol (KWANCHAREON, LUENGNARUEMITCHAI e JAIN-IN, 2007).

Também deve ser analisado o tipo de etanol a ser utilizado, quanto a porcentagem de água, pois ela é considerada uma condição adversa aos motores de ciclo Diesel, além de acelerar a degradação do óleo Diesel mineral e biodiesel, desencadeando o desenvolvimento microbiano e formação de borras. Assim, é mais seguro a utilização do etanol anidro, que possui em sua constituição 0,7% de água, enquanto o etanol hidratado possui até 7,5% (ANEXO C). Mesmo

assim, Rakopoulous et al. (2011) afirmam que a solubilidade do etanol anidro em baixas temperaturas é limitada.

Um motor ciclo Diesel, sem grandes modificações mecânicas, pode utilizar etanol de três formas: A utilização de etanol com a adição de aditivos, aumentando o número de cetano (PENIDO FILHO, 1981; SCHLOSSER et al., 1995; BORETTI, 2012); O uso de misturas de etanol com óleo Diesel, com a adição de aditivos estabilizantes (emulsificantes ou co-solventes) (PRADELLE et al., 2019). Em motores bicombustíveis, onde o óleo Diesel é injetado de maneira convencional e o etanol por meio de um carburador (ou bico injetor no coletor de admissão), sendo a injeção de Diesel a menor possível, somente para manter a chama-piloto. Este último sistema quando dotado de bico injetor é chamado de *Port Fuel Injection* (PFI), sendo a injeção de etanol realizada diretamente no coletor de admissão, logo atrás da válvula de admissão (PEDROZO et al., 2016).

Pang et al. (2006), utilizando uma mistura de Diesel-biodiesel-etanol (D:B:E) em uma proporção de 75:20:5 em volume, investigou as características das carbonilas e emissões de gases em relação ao óleo Diesel fóssil. Em comparação ao Diesel, o combustível misturado apresentou menor emissão de formaldeído. Mas as emissões de acetaldeído da mistura de combustíveis foi significativamente maior do que a do Diesel fóssil, devido a adição do etanol. Embora o uso de biodiesel e etanol possa aumentar ligeiramente as emissões de carbonilas e NO<sub>x</sub>, a mistura reduz significativamente as emissões de MP e HC.

Shi et al. (2006) empregaram uma mistura de D:B:E em uma proporção de 75:20:5 em volume. A adição dos combustíveis oxigenados resultou em redução de 30% de MP em média e redução também na emissão de HC. No entanto houve aumento de 5,6 a 11,4% das emissões de NO<sub>x</sub>. A emissão de CO não foi conclusiva e depende das condições de operação do motor.

Guarheiro et al. (2009) usaram diversas misturas de óleo Diesel e etanol com óleo de soja, óleo de mamona, biodiesel de soja e biodiesel de mamona, enquanto a adição de etanol foi de 7% a 15% em volume. Foi observado que a eficiência de combustão do óleo Diesel pode ser melhorada com a adição de combustíveis oxigenados, como etanol, biodiesel e óleos vegetais, resultando em uma combustão mais completa. Contudo, nenhuma diferença significativa foi observada na emissão de CO.

Jha et al. (2009) avaliaram as características das emissões das misturas ternárias de óleo Diesel, biodiesel e etanol em motores novos e usados de tratores agrícolas. As proporções de D:B:E na mistura foram 70:25:5, 70:20:10 e 70:15:15, em volume. Os resultados demonstraram que com a utilização das misturas houve uma redução das emissões de NO<sub>x</sub> nos dois motores novos, para maior concentração de etanol, enquanto o motor usado apresentou aumento da

emissão de NO<sub>x</sub> na condição semelhante. As emissões de CO aumentaram com o acréscimo da proporção de etanol nas misturas, tanto no motor usado quanto nos dois motores novos.

Cheenkachorn e Fungtammasan (2010) usaram uma mistura de 84% de óleo Diesel, 0,25% de etanol hidratado, 4,75% de etanol anidro e 11% de biodiesel, em volume. Um caminhão leve foi avaliado em um dinamômetro de rolos, e os resultados comparados com a condição de referência, utilizando somente óleo Diesel. Tanto na mistura quanto na condição de referência não houve diferença significativa em emissões de NO<sub>x</sub>. Contudo, na mistura de combustíveis apresentou menores emissões de MP e CO, em comparação com a condição de referência. Além disso, não houve diferença significativa no consumo de combustível dos dois combustíveis.

Hulwan e Joshi (2011) usaram misturas D:B:E com alto teor de etanol, e avaliaram as características de desempenho e emissões de um motor de três cilindros. As misturas de D:B:E consistiram em 70:10:20, 50:20:30, 50:10:40 em comparação com um combustível de referência (óleo Diesel). Os resultados indicaram ligeira melhoria da eficiência térmica e redução da opacidade dos gases em altas cargas. A variação de NO dependeu das condições de operação, e as emissões de CO aumentaram consideravelmente em baixas cargas, em comparação com o combustível de referência.

Em um estudo semelhante com um motor de quatro cilindros, Barabás et al. (2010), utilizaram misturas de D:B:E nas proporções 85:10:5, 80:10:10, 70:25:5, em comparação com uma variável de referência somente com óleo Diesel. Os resultados demonstraram que as emissões de CO diminuíram em altas cargas, onde houve aumento das emissões de CO<sub>2</sub>. A emissão de NO<sub>x</sub> aumentou em cargas médias e altas devido a combustão completa e aumento da temperatura de combustão, que é causado pela presença de maior quantidade de oxigênio no combustível. As emissões de HC diminuíram em todas as condições de operação do motor.

Estrada et al. (2016a), utilizando um motor de trator agrícola, avaliaram misturas de óleo Diesel com alto teor de enxofre (500 ppm) com biodiesel e etanol hidratado (D:B:E), nas proporções 95:5:0 (B5), 92,15:4,85:3 (ED3), 89,3:4,7:6 (ED6), 86,45:4,55:9 (ED9), 83,6:4,4:12 (ED12), 80,75:4,25:15 (ED15). Os resultados dos ensaios dinamométricos indicaram que, utilizando B5 e ED3, os valores de torque e potência do motor não diferiram, além disso, com o ED3, o consumo de combustível foi 5,92% menor. Utilizando ED12, a potência, em relação ao B5, teve redução de 2,97%, sem diferença para o consumo de combustível. Já com o ED15, a potência diminuiu 6,30% e o consumo aumentou 3,77%, em comparação com o B5. Os valores de reserva de torque foram incrementados conforme aumentou o conteúdo de etanol, reduzindo a reserva de rotação e o índice de elasticidade do motor. Por fim, concluíram que, a

mistura de etanol no óleo Diesel S500 (B5) pode ser utilizada como combustível alternativo em motores agrícolas, sem apresentar alterações significativas no seu desempenho, desde que seja utilizado até 12% de etanol.

No mesmo experimento, avaliando as emissões de poluentes, os resultados indicaram que, de forma geral, as misturas de etanol no óleo Diesel, diminuem as emissões de poluentes. A opacidade dos gases foi reduzida à medida que a adição de etanol foi incrementada, bem como devido ao aumento da rotação do motor. Já para os gases  $\text{NO}_x$  e  $\text{CO}_2$ , as reduções de seus níveis foram em menor escala e mais sensíveis as reduções da rotação do motor, que ao incremento da porcentagem de etanol na mistura. Ainda, observou-se uma relação inversa entre a opacidade dos gases e a quantidade de  $\text{O}_2$  emitido pelo motor, e entre os gases  $\text{NO}_x$  e  $\text{CO}_2$  com a temperatura dos gases poluentes. Maiores teores de etanol promovem redução significativa na emissão de  $\text{CO}_2$ . Concluíram que a mistura de etanol hidratado no óleo Diesel S500 (B5) pode ser utilizada como combustível alternativo em motores ciclo Diesel (ESTRADA et al., 2016b).

Farias et al. (2017a) realizaram experimento em bancada dinamométrica, utilizando dois motores de uso agrícola, um com sistema original ciclo Diesel e outro que foi Ottolizado e abastecido com etanol hidratado, retirando a bomba injetora e bicos e adicionado velas de ignição e sistema de gerenciamento de injeção de combustível. A taxa de compressão não foi alterada. O desempenho dos motores foi analisado por meio da tomada de potência dos tratores para cada combustível, conforme estabelece a norma NBR ISO 1585. A partir dos dados obtidos, concluíram que, ao considerar a rotação de trabalho que fornece 540 rpm na tomada de potência, houve alteração no desempenho do motor movido a etanol, com redução da potência máxima e aumento do consumo específico de combustível. O baixo desempenho do motor a etanol é atribuído à falta de modificações em sua estrutura, particularmente em relação à taxa de compressão e ajuste do sistema de injeção de combustível.

Em geral, a literatura indica que as misturas de D:B:E reduzem significativamente as emissões de MP. No entanto, são contraditórios os resultados reportados em relação as emissões de CO e  $\text{NO}_x$ . Enquanto alguns estudos indicam o aumento nas emissões de CO e  $\text{NO}_x$ , outros relataram redução dessas emissões ou nenhuma tendência. Os fatores que podem influenciar podem ser o tipo de combustível utilizado (etanol anidro ou hidratado, presença de biodiesel), a quantidade de etanol, a utilização de aditivos, as especificações do motor (injeção com gerenciamento mecânico ou eletrônico, número de cilindros, tecnologia embarcada), sistemas de tratamento de gases, dentre outros. Assim, são importantes mais pesquisas sobre este tema, como também, a estratificação dos resultados para cada condição específica de teste.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 REVISÕES BIBLIOMÉTRICAS

##### 3.1.1 Revisão bibliométrica 1

Devido aos resultados distintos da bibliografia, como também para posterior análise dos resultados deste trabalho, realizou-se uma revisão e análise bibliométrica do comportamento da adição de etanol ao óleo Diesel, e seu impacto no desempenho, emissões de gases e material particulado do motor. Preliminarmente, efetuou-se uma pesquisa com as revisões bibliográficas já publicadas em revistas científicas e que abordassem os resultados de desempenho do motor e emissões de gases e material particulado. Para isto, a pesquisa bibliométrica utilizou o algoritmo booleano: TI=(*"ethanol"* OR *"alcohol"*) AND *"diesel"* AND *"blend\*"*) AND TS=*"review"*), sendo que *"ethanol"* ou *"alcohol"*, *"diesel"* e *"blend\*"* (e suas variações *blend*, *blended*, etc.) foram pesquisados no campo de título e *"review"* no campo de tópicos.

Em uma segunda análise, realizou-se a procura de outros artigos além dos citados nas revisões bibliográficas acima, além de trabalhos citados por um autor e não citados por outro. Para esta pesquisa de complementação, foram utilizados os portais *Web of Science*, *ScienceDirect*, Portal de Periódicos Capes, *Google Scholar* e através da análise das referências bibliográficas de cada novo artigo inserido.

##### 3.1.2 Revisão bibliométrica 2

Após a realização da revisão bibliográfica 1, foram selecionados os trabalhos científicos com características similares ao motor do presente estudo e realizada uma análise específica para motores com essa configuração. Assim, a análise bibliométrica 2 utiliza apenas os artigos publicados em revistas científicas de alto impacto que trabalharam com misturas de óleo Diesel, biodiesel e etanol anidro e, em motores com injeção gerenciada eletronicamente e com sistema de tratamento de gases apenas com válvula EGR. Nisto, não foram contemplados os trabalhos que utilizaram motores mecânicos de injeção direta e indireta, os que trabalharam com PFI ou fumigação, e com tratamentos de gases adicionais ao sistema EGR.

## 3.2 LOCAL DOS EXPERIMENTOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Agrotecnologia (Agrotec), pertencente ao Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas (NEMA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), situado no município de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul. O local apresenta coordenadas geográficas de 29,723° de latitude sul, e 53,719° de longitude oeste, a uma altitude aproximada de 103 m em relação ao nível médio dos oceanos. A temperatura média anual na região é em torno de 18,8 °C e a pressão atmosférica média anual de 1001,1 hPa.

## 3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

### 3.3.1 Motor utilizado

O motor utilizado nos ensaios foi de ciclo Diesel, marca AGCO POWER, com quatro tempos de combustão, sistema de injeção de combustível da marca Bosch, do tipo *Common Rail*, com gerenciamento eletrônico e 1.800 bar de pressão máxima de injeção, segundo o fabricante. Apresenta volume interno deslocado de 4400 cm<sup>3</sup>, quatro cilindros verticais em linha, turboalimentado e com *aftercooler*. Fornece uma potência nominal, segundo o fabricante (ANEXO E), de 100 kW na velocidade angular de 2000 rotações por minuto (rpm) e torque máximo de 540 N.m a 1500 rpm do motor.

O motor está equipado com sistema EGR de controle de emissões de gases e material particulado, e sistema de gerenciamento eletrônico da injeção de combustível que, segundo o fabricante, atende a legislação MAR-1. O motor foi ensaiado diretamente na árvore cardânica (TDP) de um trator agrícola (Figura 7) da marca Massey Ferguson, modelo MF 6713R Dyna-4, 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA), fabricado no ano de 2016 com aproximadamente 481,3 horas de trabalho no momento da realização dos ensaios.

### 3.3.2 Estação atmosférica

Devido a potência gerada pelo motor ser uma grandeza influenciada pelas questões atmosféricas, é necessário a padronização dos resultados segundo a norma ABNT NBR ISO 1585 (1996). Para isto, foi utilizado uma estação atmosférica desenvolvida por ROSA (2018), que fornece em tempo real dados de temperatura (°C), fator de correção (Fc), umidade relativa do ar (%) e pressão atmosférica (mbar). Utilizando um sensor marca Bosch modelo BMP180,

a faixa de medição da pressão atmosférica é de -500 m a 9000 m em relação ao nível do mar, com acurácia de  $\pm 0,12$  mb. Já para a temperatura e umidade foi utilizado um sensor marca Aosong modelo AM2302.

Figura 7 - Trator agrícola marca Massey Ferguson, modelo MF 6713R Dyna-4, utilizado nos ensaios



Fonte: Autor.

As faixas de medição foram 0% a 99,9% para umidade relativa e  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  para temperatura, com acurácia de  $\pm 2\%$  e  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. As condições atmosféricas foram verificadas no início de cada avaliação para a correção dos resultados conforme preconiza a norma. Para isto, a estação atmosférica foi colocada em frente ao capô do trator, sobre os contrapesos dianteiros, próximo aonde ocorre à admissão de ar pelo motor (Figura 8).

Figura 8 - Estação atmosférica posicionada em frente ao capô do trator. Em detalhe o visor da estação atmosférica



Fonte: Autor.

### 3.3.3 Bancada dinamométrica móvel

Para a avaliação dos parâmetros de desempenho do motor do trator, foi utilizado um dinamômetro móvel. Este possui arrefecimento a ar e opera por meio de freio magnético pelo princípio das correntes parasitas (correntes de Foucault), é da marca EGGERS modelo PT301 MES, com capacidade de frenagem de até 600 kW (Figura 9). A imposição de cargas pode ser de forma manual ou automática, com o auxílio de um *software* específico (*Power Control*), que apresenta conexão via cabo ou *bluetooth*, e permite gerenciar automaticamente o ensaio a partir de um computador portátil. Através deste *software*, foi realizado o controle da frenagem e o registro dos dados de rotação do motor e torque. O dinamômetro foi acoplado à TDP do trator por uma árvore cardânica.

Figura 9 - Trator MF 6713R Dyna-4 acoplado ao dinamômetro pela árvore cardânica



Fonte: Autor.

Antes da realização dos ensaios, o dinamômetro foi calibrado, conforme instruções do fabricante. Para isto, utilizou-se uma haste que permitiu fixar um peso conhecido a 1m de distância do eixo do dinamômetro, ajustando assim o valor da carga aferido pela célula de carga. O dinamômetro EGGERS PT301 MES apresenta margem de erro de 1% do valor final. A tolerância para os ensaios, conforme a norma DIN 3046 é de 2% para torque, 3% para potência e 3% para consumo específico (ANEXO F).

O dinamômetro possui um painel de controle (Figura 10), com comandos para a imposição manual ou automática das cargas, e um visor onde são apresentados os valores de torque (N.m), rotação da TDP (rpm) e a potência calculada (kW e cv).

Figura 10 - Painel de controle do dinamômetro. Em detalhe o visor que apresenta os valores de torque, rotação da TDP e a potência calculada



Fonte: Autor.

### 3.3.4 Tacômetro

Devido ao dinamômetro fazer a leitura somente das rotações do eixo da TDP, é necessário verificar a relação de transmissão entre este e o motor. Utilizar os dados fornecidos pelo tacômetro do trator, segundo Farias (2014), pode incorrer em erros devido a imprecisão dos equipamentos que equipam os tratores. Além disso, a maioria apresenta mostradores analógicos, com escalas amplas, maximizando os erros de leitura. Para isto, foi utilizado um tacômetro portátil de foto/contato da marca Minipa, modelo MDT-2238A (Figura 11).

Figura 11 - Tacômetro portátil marca Minipa, modelo MDT-2238A, acessório para leitura de contato e adesivo refletivo



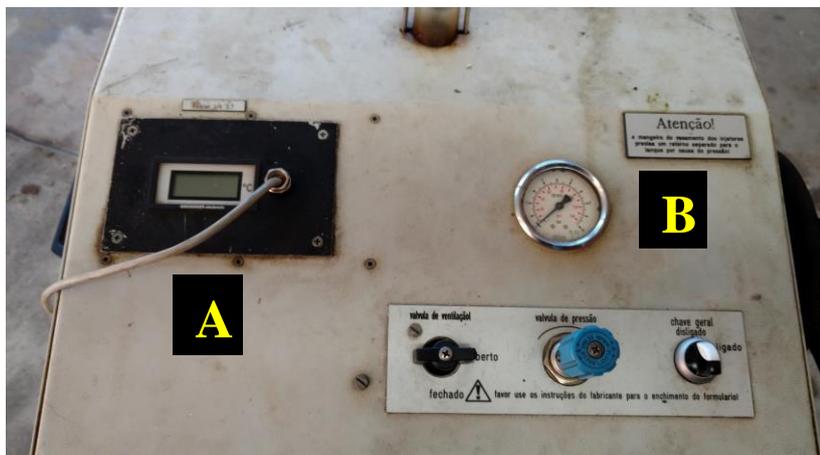
Fonte: Autor.

O tacômetro apresenta faixa de medição de 2,5 a 100.000 rpm no modo foto e de 0,5 a 20.000 rpm no modo contato. A precisão deste equipamento é de  $\pm 0,05\%$ . No sistema de contato, um acessório com uma ponta de borracha é encostado diretamente no eixo em que se deseja medir as rotações. Para as leituras via foto, um elemento refletivo (adesivo refletivo) deve ser colado no eixo ou volante do motor, assim apontando o feixe de laser diretamente neste com o eixo em movimento. O resultado é exposto em um display com cinco dígitos.

### 3.3.5 Fluxômetro de combustível

A avaliação do consumo de combustível foi realizada através de um fluxômetro da marca EGGERS modelo FM3-100 (Figura 12), que mede o consumo instantâneo de combustível, e está integrado ao *software* que controla o dinamômetro.

Figura 12 - Fluxômetro marca EGGERS modelo FM3-100 utilizado para medir o consumo de combustível, mostrador de temperatura do óleo Diesel (A) e pressão do sistema (B)



Fonte: Autor.

A medida do consumo é obtida através da conexão de mangueiras de admissão e retorno do combustível na bomba injetora, e de linhas de sucção e do fluxo de retorno dentro do reservatório de combustível, criando uma circulação com o equipamento ligado. Desta forma, o fluxômetro faz o controle da pressão de combustível necessária para o correto funcionamento do sistema de alimentação do motor do trator.

Para o cálculo do consumo específico é necessário ter o conhecimento da massa específica do combustível utilizado. Como a massa específica varia conforme a temperatura, e o óleo Diesel ao passar pela bomba injetora e retornar ao tanque adquire temperatura do motor,

é preciso ter o controle desta variável. Para isto, o fluxômetro conta com um medidor de temperatura e um *display* em seu painel com esta informação em tempo real. Os dados de temperatura são enviados ao software *Power Control* juntamente com os dados de consumo, sendo assim possível saber o consumo horário em cada ponto de leitura e possibilitar o ajuste da massa específica, permitindo o correto cálculo do consumo específico.

O fluxômetro possui um rotor interno que gira com a passagem do combustível, e a cada 1,0 cm<sup>3</sup> de combustível medido é registrado um pulso elétrico. A margem de erro do fluxômetro EGGERS FM3-100 é de 1% do valor final (ANEXO F).

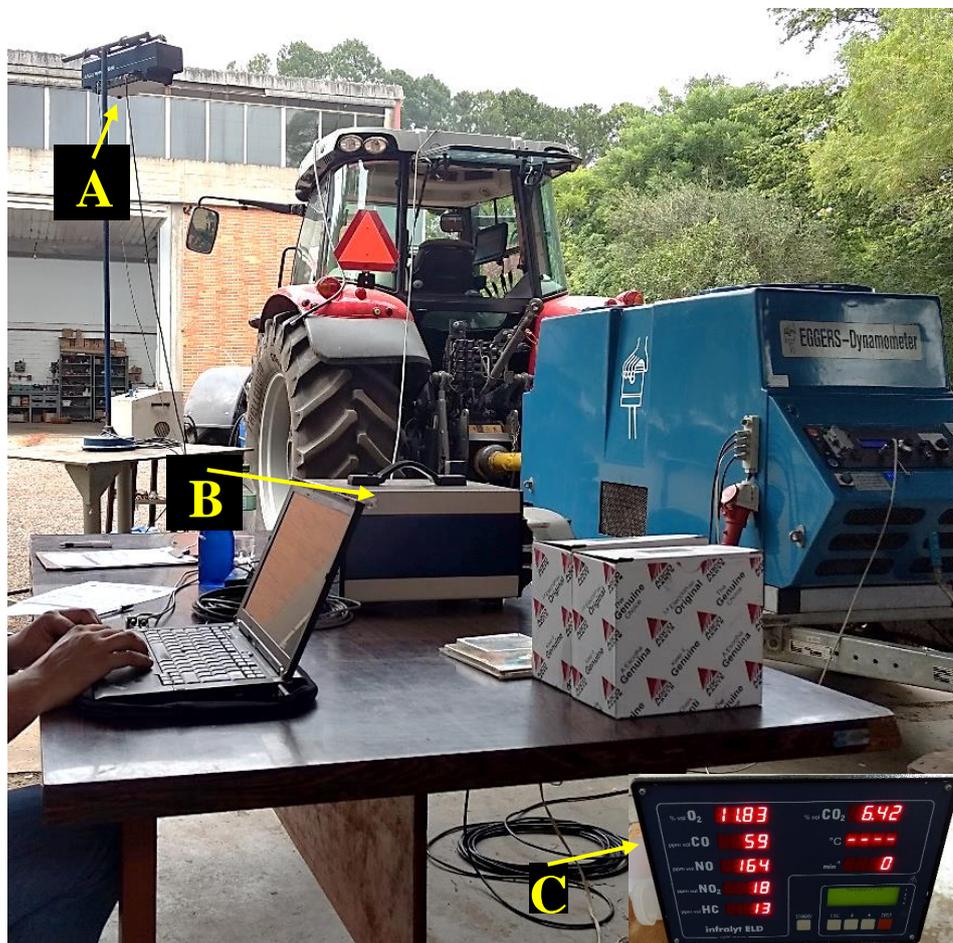
### 3.3.6 Analisador de gases

A análise da emissão dos gases pelo escapamento do motor foi realizada pelo analisador marca Saxon, modelo Infralyt ELD (Figura 13), que possui a capacidade de medir a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (% vol.), oxigênio (O<sub>2</sub>) (% vol.) monóxido de carbono (CO) (ppm), hidrocarbonetos (HC) (ppm), monóxido de nitrogênio (NO) (ppm) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) (ppm), que compõem os principais gases residuais da combustão expelidos por um motor de combustão interna. A amostragem foi realizada através de uma sonda inserida no tubo de descarga do motor, passando inicialmente por um filtro de linha, evitando que partículas indesejadas entrem no equipamento de análise.

Segundo Estrada (2015), a medição de CO<sub>2</sub> (% vol.) é realizada no interior do analisador, através da tecnologia de infravermelho não dispersivo, que utiliza um emissor de infravermelho de banda larga, que cobre todos os comprimentos de onda para medição de um determinado conjunto de gases. Filtros óticos do tipo passa-banda permitem a passagem de comprimentos de onda que podem ser absorvidos por esses gases. Cada filtro passa-banda é conectado a um detector infravermelho. O detector produz um sinal que é proporcional à energia infravermelha absorvida pelo gás de interesse. Este sinal é processado eletronicamente e gera informações com a concentração de gás, representados nas unidades adequadas. Para as medições dos gases NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>) (ppm), assim como, para O<sub>2</sub> (% vol.) são utilizados sensores eletroquímicos.

A aquisição dos dados é realizada pelo *software MW IELD 01030*, instalado em um computador portátil. Assim, além de controlar o equipamento, é possível acompanhar em tempo real a aquisição dos dados, através de valores numéricos e gráficos. Ao final da análise é fornecido um relatório com os valores das emissões em função do tempo, em segundos.

Figura 13 - Opacímetro Opacilyt ELD (A) e analisador de gases Infraclyt ELD (B), acoplados ao *software* específico para aquisição dos dados. Em detalhe (C) o painel do Infraclyt ELD



Fonte: Autor.

### 3.3.7 Analisador de opacidade

A medição da opacidade dos gases foi realizada através de um opacímetro de fluxo parcial da marca Saxon, modelo Opacilyt ELD (Figura 13). Da mesma forma que o Infraclyt ELD, uma sonda é introduzida na tubulação de escape do trator, e uma parte dos gases emitidos pelo motor é desviada para o equipamento. O equipamento permite analisar a opacidade em três medidas diferentes: valor  $k$  ou coeficiente de absorção de luz ( $m^{-1}$ ), porcentagem de opacidade (%) e concentração de fuligem ( $mg.m^{-3}$ ).

Conforme Perin (2014), a câmara graduada do Opacilyt ELD tem comprimento de 430 mm, que é o padrão referencial das medições junto com a luz verde emitida pelos LED's de 560 nm de comprimento de onda. A medição ocorre por um feixe de luz que é emitido na direção perpendicular aos gases de escape. Devido as partículas existentes no gás de escape, a

radiação emitida será enfraquecida pela dispersão das partículas e/ou pela absorção no interior das mesmas. A opacidade é a diferença de intensidade do feixe de luz emitido e recebido, determinando assim a quantidade de partículas existentes nos gases de escape.

A coleta dos dados da emissão de particulados ocorre ao mesmo tempo que a coleta dos gases analisados pelo Infralyt ELD, sendo ambos processados pelo software *MW IELD 01030*. Para a análise de temperatura dos gases de escape, foi utilizado um sensor termopar tipo k, instalado no mesmo ponto da sonda do opacímetro.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Para a realização do presente trabalho, foram utilizadas oito diferentes misturas de etanol com óleo Diesel, mais duas condições de referência. Os ensaios foram realizados entre os dias 16 a 20 de abril de 2018.

Foram utilizados como condições de referência dois tipos de óleo Diesel fornecidos pelo mercado brasileiro ao consumidor final no período do estudo, BS10 e BS500. Os teores máximos de enxofre foram 10 ppm e 500 ppm de enxofre, respectivamente. Já a quantidade de biodiesel presente em ambos os tipos óleo Diesel utilizados representou 10% do volume.

O óleo Diesel foi adquirido na data de 11 de abril de 2018, diretamente da distribuidora de combustíveis Itaimbé Combustíveis Ltda, situada no município de Santa Maria, visando assim um combustível novo, minimizando os riscos de oxidação, envelhecimento e contaminação do óleo Diesel. Este combustível foi recebido pela distribuidora no dia 10 de abril de 2018, conforme boletim de conformidade (ANEXO D).

O etanol anidro foi fornecido pela empresa Etil Rio Indústria e Comércio Ltda, sendo que o mesmo atende as especificações da Agência Nacional do Petróleo (ANP), através da resolução ANP nº 19 de 15 de abril de 2015, que estabelece teor de etanol mínimo de 98% vol.

Para promover a mistura foram utilizados dois aditivos: o Teccom10<sup>®</sup>, que tem as funções de antioxidante, homogeneizante e lubrificante, adicionado na concentração de 1.000 ppm no óleo Diesel; o Teccom BX Etanol<sup>®</sup>, que tem as funções de antioxidante, estabilizante, e lubrificante, adicionado na concentração de 20.000 ppm no etanol anidro.

As misturas foram realizadas no laboratório no dia anterior ao início dos ensaios. Para isto, foram utilizadas provetas graduadas de 100, 500 e 1000 mL. A composição dos tratamentos está descrita na Tabela 3:

Tabela 3 - Composição e concentração dos tratamentos a partir das misturas de óleo Diesel, biodiesel e etanol anidro aditivado

Tratamentos	Óleo Diesel (enxofre)		Biodiesel	Etanol anidro aditivado
	(10 ppm)	(500 ppm)		
	(%)			
BS10 – 0% etanol	90	0	10	0
BS10 – 5% etanol	85,5	0	9,5	5
BS10 – 10% etanol	81	0	9	10
BS10 – 15% etanol	76,5	0	8,5	15
BS10 – 20% etanol	72	0	8	20
BS500 – 0% etanol	0	90	10	0
BS500 – 5% etanol	0	85,5	9,5	5
BS500 – 10% etanol	0	81	9	10
BS500 – 15% etanol	0	76,5	8,5	15
BS500 – 20% etanol	0	72	8	20

Fonte: Autor.

Os combustíveis a serem ensaiados foram acondicionados em recipientes plásticos com capacidade volumétrica de 20 L, devidamente limpos e identificados, sendo que cada mistura de combustível utilizou três recipientes (60 L).

Os experimentos da presente tese estão divididos em quatro etapas: parâmetros de desempenho do motor no ensaio dinamométrico; desempenho máximo do motor no ensaio dinamométrico; consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4; emissões de gases poluentes e material particulado nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4.

### 3.4.1 Parâmetros de desempenho do motor no ensaio dinamométrico

Para os parâmetros de desempenho do motor, são consideradas como variáveis resposta o torque (N.m), a potência (kW), o consumo horário de combustível ( $L.h^{-1}$ ) e o consumo específico de combustível ( $g.kW^{-1}.h^{-1}$ ), em relação a velocidade angular do motor (rpm). O delineamento experimental utilizado é inteiramente casualizado, com três repetições, caracterizando um arranjo experimental 2 x 5 x 11. As variáveis foram analisadas como um experimento trifatorial, proveniente da interação entre os dois tipos de combustíveis (óleo Diesel BS10 e BS500), das cinco concentrações de etanol (0%, 5%, 10%, 15% e 20%) e das 11

rotações do motor analisadas (desde 1400 a 1900 rpm) (faixa de utilização do motor), com dados coletados a cada 50 rpm de variação da rotação, com três repetições.

A faixa de utilização de 1400 a 1900 rpm foi definida após um ensaio piloto, sendo considerado para análise somente os dados dentro dessa faixa. Esta faixa engloba os resultados de todos os combustíveis, tanto no limite inferior (rotação de torque máximo) como no limite superior (rotação de potência máxima). Utilizar os dados superiores e inferiores a esta faixa pode incorrer a erros de interpretação, pois as cargas não estão devidamente estabilizadas, apresentando assim uma grande variância nos valores.

Foram calculados também a reserva de torque (%), o índice de elasticidade (IE) e a faixa de utilização (FU) do motor. O delineamento experimental utilizado é o inteiramente casualizado, caracterizando um arranjo experimental 2 x 5, proveniente da interação dos dois tipos de combustíveis (óleo Diesel BS10 e BS500) e das cinco concentrações de etanol (0%, 5%, 10%, 15% e 20%), com 3 repetições (uma para cada ensaio dinamométrico).

### **3.4.2 Desempenho máximo do motor no ensaio dinamométrico**

O desempenho máximo do motor no ensaio dinamométrico teve como variáveis resposta o torque máximo (N.m), a potência máxima (kW), o consumo horário ótimo de combustível ( $L.h^{-1}$ ) e o consumo específico mínimo de combustível ( $g.kW^{-1}.h^{-1}$ ). O delineamento experimental utilizado é o inteiramente casualizado, caracterizando um arranjo experimental 2 x 5, provenientes da interação dos dois tipos de combustíveis (óleo Diesel BS10 e BS500) e das cinco concentrações de etanol (0%, 5%, 10%, 15% e 20%), com 3 repetições (uma para cada ensaio dinamométrico).

### **3.4.3 Emissões de gases poluentes e material particulado**

Para as emissões de gases poluentes e material particulado, foram analisadas como variáveis resposta os níveis de emissões de CO, HC,  $NO_x$ ,  $HC+NO_x$ , e material particulado, todos na unidade de  $g.kW^{-1}.h^{-1}$ . Os resultados foram comparados com os limites estabelecidos pela legislação brasileira de controle de emissões Proconve MAR-1 e internacional Euro V. O delineamento é inteiramente casualizado em um experimento trifatorial 2 x 5 x 8, com resultados da interação dos dois tipos de combustíveis (óleo Diesel BS10 e BS500), cinco concentrações de etanol (0%, 5%, 10%, 15% e 20%) e oito modos de operação, com 60 repetições.

Foi calculado o valor médio ponderado das emissões de gases e material particulado nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, e os resultados também comparados com os limites estabelecidos pela legislação brasileira de controle de emissões Proconve MAR-1 e internacional Euro V. O delineamento experimental utilizado é inteiramente casualizado, caracterizando um arranjo experimental bifatorial 2 x 5, sendo as variáveis analisadas proveniente da interação dos dois tipos de combustíveis (óleo Diesel BS10 e BS500) e das cinco concentrações de etanol (0%, 5%, 10%, 15% e 20%) com 60 repetições.

#### **3.4.4 Consumo de combustível nos modos de operação**

Já para o consumo de combustível, nos oito modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, as variáveis resposta foram o consumo horário ( $CH_{mop}$ ) ( $L.h^{-1}$ ) e o consumo específico ( $CE_{mop}$ ) ( $g.kW^{-1}.h^{-1}$ ) nos modos de operação. O delineamento utilizado é inteiramente casualizado em um experimento trifatorial 2 x 5 x 8, sendo dois tipos de combustíveis (óleo Diesel BS10 e BS500), das cinco concentrações de etanol (0%, 5%, 10%, 15% e 20%) e dos oito modos de operação, com sete repetições.

Também foi calculado o valor médio ponderado do consumo horário ( $V_{mp}CH_{mop}$ ) e consumo específico ( $V_{mp}CE_{mop}$ ) nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, com metodologia idêntica ao cálculo de emissões. O delineamento experimental utilizado é inteiramente casualizado, caracterizando um arranjo experimental bifatorial 2 x 5, proveniente da interação dos dois tipos de combustíveis (óleo Diesel BS10 e BS500) e das cinco concentrações de etanol (0%, 5%, 10%, 15% e 20%), com 7 repetições.

#### **3.4.5 Análise estatística**

Os dados dos experimentos foram tabulados e submetidos à análise de variância, e quando significativos, os valores qualitativos das médias foram comparados pelo teste de Tukey e os valores quantitativos pela análise de regressão, a 5% de probabilidade (95% de confiança), utilizando o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014).

## 3.5 METODOLOGIA UTILIZADA

### 3.5.1 Caracterização da massa específica dos combustíveis

A massa específica dos combustíveis testados foi aferida conforme a norma ABNT NBR 7148/13 – “Petróleo e derivados de petróleo - Determinação da massa específica, densidade relativa e °API – método do densímetro”.

### 3.5.2 Parâmetros de desempenho do motor

A avaliação iniciou-se através da determinação da relação de transmissão entre o motor e a TDP do trator. Para isto, um adesivo refletivo foi colado na polia do virabrequim, situada na frente do motor. Na sequência, houve o acoplamento do adaptador para leitura direta no eixo da TDP ao tacômetro digital. Colocou-se em funcionamento o trator, acionando a TDP e acelerado o trator até o momento em que a TDP atingisse 540 rpm, rotação padronizada que foi utilizada nos ensaios. Logo após, utilizando o modo foto do tacômetro digital, foi apontado para o volante do motor do trator, verificando a rotação do motor que condiz com 540 rpm na TDP. Em seguida, o motor foi colocado em aceleração máxima, e novamente aferida a rotação do mesmo.

A rotação máxima atingida pelo motor do trator foi de 2.238 rpm, e a rotação que o motor deve estar, para o eixo da TDP atingir 540 rpm, é de 1.920 rpm. Assim, a relação de transmissão deste trator é de 3,556:1.

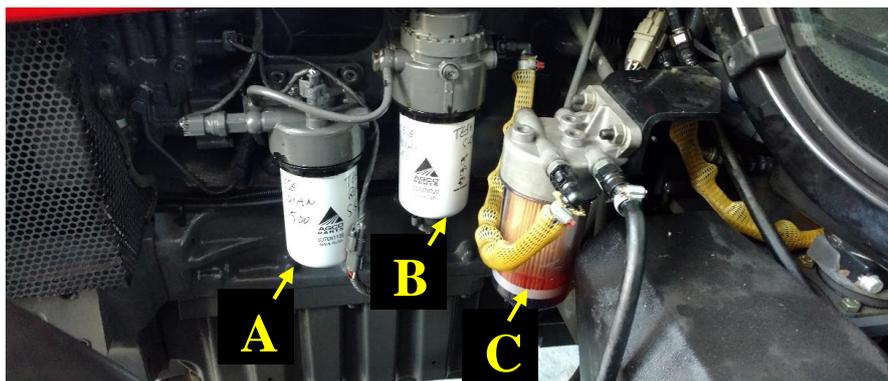
O sistema de alimentação de Diesel do trator foi completamente drenado e substituído o conjunto de filtros de combustível (Figura 14 e Figura 15). Este sistema foi acoplado ao fluxômetro, sendo que a alimentação do fluxômetro foi conectada ao recipiente externo (tambor plástico com capacidade volumétrica de 20 L). O fluxômetro teve seu filtro interno substituído e suas mangueiras drenadas e limpas (Figura 16).

Figura 14 - Conjunto de filtros de combustível do motor do trator MF6713R Dyna-4 (A, B, C) e filtro de combustível do fluxômetro EGGERS FM3-100 (D)



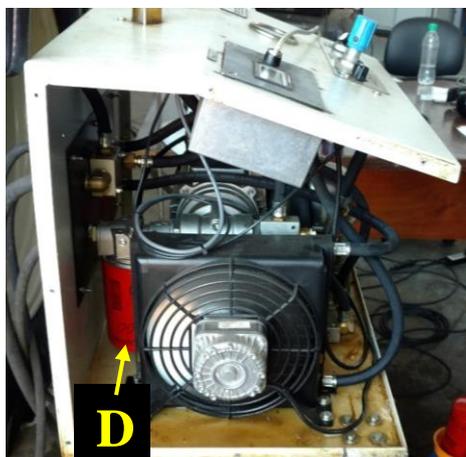
Fonte: Autor.

Figura 15 - Conjunto de filtros de combustível do motor do trator MF 6713R Dyna-4 (B, C, D) instalados e identificados



Fonte: Autor.

Figura 16 – Detalhe da localização do filtro do fluxômetro EGGERS FM3-100 (D)



Fonte: Autor.

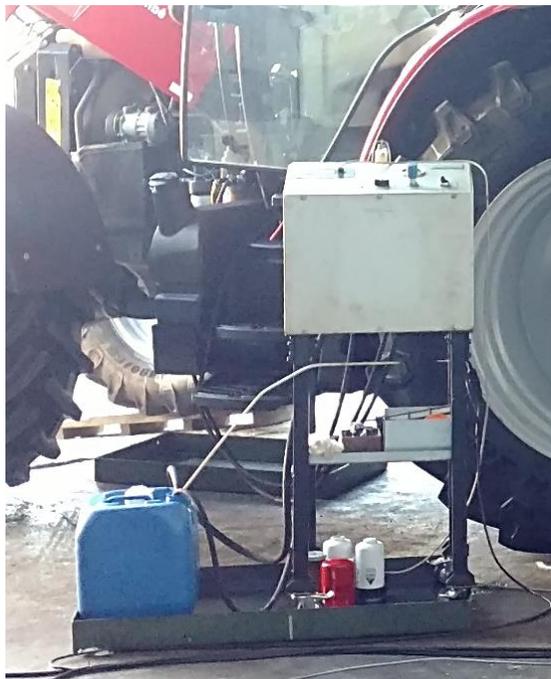
Primeiramente, foi avaliado o combustível óleo Diesel BS10 com a concentração de 0% de etanol, seguido dos combustíveis com o aumento gradual do etanol, 5%, 10%, 15% e 20% de etanol, respectivamente. Entre cada ensaio, todo o processo de drenagem e limpeza do sistema de combustível do trator e do fluxômetro foi feito. Quando da troca para o combustível BS500, além do processo anterior, foi substituído novamente o conjunto de filtros do trator e do fluxômetro. Em seguida, prosseguiu-se com os ensaios de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de etanol, procedendo somente com o processo de drenagem e limpeza entre os ensaios, sem a substituição dos elementos filtrantes.

Por medida preventiva, após o funcionamento do motor com o novo combustível a ser avaliado, foi realizado a passagem de 20 L de cada combustível pelo sistema, sendo que o retorno da bomba injetora foi desviado para um recipiente externo para ser posteriormente descartado. Após esse procedimento o retorno da bomba injetora foi ligado ao fluxômetro para a realização dos ensaios.

Na sequência, foi efetuado o acoplamento do trator ao dinamômetro pela árvore cardânica, mantendo os mesmos alinhados horizontal e verticalmente. Foi realizado o aquecimento do motor do trator por um período de 20 min. Para realizar este aquecimento, o motor foi acelerado até a sua rotação máxima e após isto, o dinamômetro exerceu uma frenagem reduzindo sua rotação para 75% da rotação máxima do motor. Este procedimento auxiliou também para a total homogeneização dos combustíveis no sistema, sendo que o combustível não consumido pelo trator retornava ao recipiente de combustível, promovendo a mistura (Figura 17). Todos os recipientes de 20 L foram limpos e identificados antes da utilização, sendo que cada combustível utilizou três recipientes, o primeiro para a limpeza, o segundo para o aquecimento e uniformização do sistema e o terceiro para os ensaios.

Após o aquecimento do motor, foram inseridos os dados com as condições atmosféricas e a massa específica do combustível no software *Power Control*, e acelerado o trator até atingir sua rotação máxima. A avaliação ocorreu através da imposição de cargas ao motor do trator fazendo com que sua rotação decaísse 50 rpm em relação a rotação anterior, realizando leitura em cada ponto dessa escala. A última rotação avaliada foi a de 1200 rpm onde nesta situação, já era possível determinar os pontos máximos das variáveis analisadas. O ensaio dinamométrico foi realizado com 3 repetições para cada combustível utilizado.

Figura 17 - Recipiente de 20 L sendo utilizado pelo fluxômetro para alimentar o trator



Fonte: Autor.

Nos ensaios dinamométricos somente os valores de torque produzido pelo motor a cada rotação são lidos pelo dinamômetro. A variável potência é obtida de forma indireta, através da multiplicação dos valores de torque e rotação do motor por uma constante, que está expressa na equação (1):

$$N = M \times n \times \pi \times 30000^{-1} \quad (1)$$

Onde:

$N$  – Potência efetiva (kW);

$M$  - Torque (N.m);

$n$  – Rotações do motor (rpm).

O *software* do dinamômetro já fornece os dados torque e potência corrigidos pelas condições atmosféricas, de acordo com a norma DIN 70020 (1986). Segundo a norma, a potência corrigida do motor, conforme a equação (2), é calculada utilizando-se o fator de correção de potência ( $F_c$ ). Segundo a equação (3), o  $F_c$  é resultante da potência calculada do motor multiplicada pelo fator de correção atmosférico ( $F_a$ ) elevado ao fator de correção do motor ( $F_m$ ) que, segundo a norma DIN 70020 (1986), para os motores de ciclo Diesel é 1,0.

$$N_o = N \times F_c \quad (2)$$

Onde:

$N_o$  – Potência corrigida do motor (kW);

$N$  – Potência efetiva (kW);

$F_c$  – Fator de correção do motor.

$$F_c = (F_a)^{F_m} \quad (3)$$

Onde:

$F_c$  – Fator de correção da potência;

$F_a$  – Fator de correção atmosférico;

$F_m$  – Fator de correção do motor.

Já para o cálculo do fator atmosférico, a norma utiliza como referência uma pressão de 1.013 mbar e temperatura ambiente de 20°C. O fator é calculado automaticamente pelo *software* no início de cada ensaio, de acordo com a equação (4):

$$F_a = \left( \frac{1013}{p} \right) \times \left( \frac{273 + t}{273 + 20} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Onde:

$F_a$  – Fator de correção atmosférico;

$p$  – Pressão atmosférica (mbar);

$t$  – Temperatura ambiente (°C).

Existem limitações na utilização da fórmula de correção, somente deve ser aplicado o fator de correção quando o valor for entre  $0,9 < F_c < 1,1$ . Se o fator de correção estiver fora desta faixa, o ensaio deve ser realizado em outro momento, em condições atmosféricas oportunas.

Após, os dados de potência e torque foram convertidos para a norma ISO 14396 (acréscimo de 7%), pois este é o formato mais utilizado para especificar a potência dos tratores no mercado brasileiro. Também permitindo o enquadramento para a análise de dados segundo a MAR-1, que estabelece os valores limites nas faixas de potência conforme a respectiva norma.

Devido ao ensaio dinamométrico ser realizado na TDP do trator, foi considerado uma perda de potência por transmissão entre o motor e a TDP de 10% (acrécimo) (ASAE EP496.3, 2006; MÁRQUEZ, 2012; ASAE 497.7, 2015).

Também são fornecidos, pelo *Power Control*, os dados de consumo horário e específico de combustível, em cada rotação analisada do motor. A partir do conhecimento da massa específica dos combustíveis a 20°C (dato proveniente da análise em laboratório), e da temperatura do combustível admitido pelo motor (dato fornecido pelo fluxômetro), o software calcula o consumo específico de combustível conforme a equação (5):

$$C_e = \frac{C_h \times \sigma}{N_o} \quad (5)$$

Onde:

$C_e$  – Consumo específico de combustível ( $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ );

$\sigma$  – Massa específica ( $\text{g.L}^{-1}$ )

$C_h$  – Consumo horário ( $\text{L.h}^{-1}$ );

$N_o$  – Potência corrigida do motor (kW).

Foi calculado a média das três repetições para cada combustível, das quatro variáveis fornecidas no ensaio dinamométrico: potência, torque, consumo horário e consumo específico de combustível. A partir dos valores destas variáveis obtidos nos ensaios, foram calculados os seguintes parâmetros de desempenho do motor: reserva de torque, faixa de utilização e o índice de elasticidade.

A reserva de torque do motor (RT) foi calculada segundo Mialhe (1996), conforme a equação (6):

$$\Delta M = \left( \frac{M_m - M_N}{M_N} \right) \times 100 \quad (6)$$

Onde:

$\Delta M$  ou  $RT$  – Reserva de torque do motor (%);

$M_m$  – Torque máximo (N.m);

$M_N$  – Torque na potência máxima ou torque nominal (N.m);

Já a faixa de utilização do motor foi calculada conforme a equação (7), proposta por Márquez (2012):

$$FU = n_N - n_M \quad (7)$$

Onde:

$FU$  – Faixa de utilização (rpm);

$n_N$  – Rotação de potência máxima ou rotação nominal (N.m);

$n_M$  – Rotação de torque máximo (N.m).

Para o cálculo do índice de elasticidade é utilizado a equação (8), também proposta por Márquez (2012):

$$IE = \left( \frac{M_m}{M_N} \right) \times \left( \frac{n_N}{n_M} \right) \quad (8)$$

Onde:

$IE$  – Índice de elasticidade;

$M_m$  – Torque máximo (N.m);

$M_N$  – Torque na potência máxima ou torque nominal (N.m);

$n_N$  – Rotação de potência máxima ou rotação nominal (N.m);

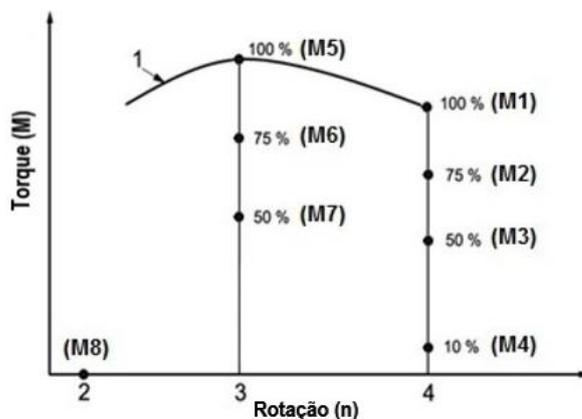
$n_M$  – Rotação de torque máximo (N.m).

### 3.5.3 Análise das emissões de gases e opacidade

A medição da opacidade e emissões dos gases de escape, foi baseada na norma ABNT NBR ISO 8178-4 (2012), que trata da mensuração de gases de exaustão, em motores alternativos de combustão interna, utilizando um ciclo de ensaio em regime constante, com diferentes aplicações de carga no motor. Para realizar esta avaliação foram necessárias as curvas dinamométricas de torque e potência do motor.

Na Figura 18 são apresentadas as porcentagens de torque aplicado ao motor para uma determinada rotação. Cada ponto desta figura é denominado como modo de operação. Estes modos fazem parte dos veículos classificados pela norma ABNT NBR ISO 8178-4 (2012) como do tipo C1, que são os veículos fora de estrada (*off-road*) e equipamentos industriais movidos a Diesel, onde se enquadra o trator agrícola.

Figura 18 - Porcentagens de torque em relação ao torque máximo, em dada rotação, para determinar os oito modos de operação para o ensaio de emissões



Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 8178-4 (2012).

Complementando a informação que se apresenta na Figura 18, tem-se que a variável apresentada no eixo y (M) é o torque e a apresentada no eixo x (n) é o regime de rotações. A curva 1 é a tendência apresentada pelo torque do motor, com aceleração máxima e variação de carga. O ponto 2 corresponde a rotação de marcha lenta do motor, o ponto 3 à rotação intermediária que é a rotação de torque máximo e, o ponto 4, a rotação nominal ou rotação de potência máxima.

As rotações em que devem ser realizadas as coletas (rotações 2, 3 e 4) são fixas, ou seja, nos pontos M1, M2, M3 e M4 deve ser utilizada a mesma rotação, e variar a porcentagem de aplicação de torque em cada modo. Para isto, durante a aplicação da carga e procura do modo de operação, deve-se atuar na aceleração do trator para localizar os pontos corretos para as coletas. A norma também indica a sequência que deve ser seguida no ensaio, segundo os modos de operação, sendo determinado para cada modo o seu respectivo fator de ponderação para calcular a opacidade e a emissão média dos gases emitidos. No Quadro 5 se apresentam os modos de operação e os fatores de ponderação para um motor ciclo Diesel de um trator agrícola.

Quadro 5 - Modos de operação e fatores de ponderação do ensaio de emissões

Modo de operação	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Rotação (n)	n de potência máxima				n de torque máximo			Marcha lenta
Torque (%)	100	75	50	10	100	75	50	0
Fator de ponderação	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15

Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 8178-4 (2012).

O valor médio ponderado de emissões é calculado segundo a equação (9).

$$V_{mp}E = 0,15 \times (M1 + M2 + M3 + M8) + 0,1 \times (M4 + M5 + M6 + M7) \quad (9)$$

Onde:

$V_{mp}E$  – Valor médio ponderado de emissões nos modos de operação ( $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ );

$Mx$ – Valor de cada modo de operação ( $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ).

Segundo Weronka (2015), as legislações brasileiras e europeias referentes às emissões de motores Diesel adotam a unidade de medida para os poluentes em  $\text{g/kWh}$ , a qual consiste em ponderar a emissão em  $\text{g/h}$  pela potência em  $\text{kW}$ , permitindo assim a comparação. No entanto, a potência desempenhada no M8 da ABNT NBR ISO 8178-4 (2012) é na marcha lenta, não ocorrendo a aplicação de cargas pelo dinamômetro, inclusive, a tomada de potência neste modo é desligada.

Neste sentido, para a correta realização do cálculo é necessário estimar o consumo de energia na marcha lenta. Segundo o Quadro 2, a norma ISO 14396 utilizada na ABNT NBR ISO 8178-4 (2012) e também nos valores limites de emissões de gases poluentes, os acessórios acoplados ao motor durante a determinação da potência são a bomba injetora, o *aftercooler*, o turbocompressor, o conjunto de filtros de ar, o escapamento e a bomba de água. Também devem ser considerados o alternador, radiador, ventilador, e os sistemas de tratamento de gases (EGR, SCR, misto, etc), se presentes no motor e não desacoplados durante o ensaio (para descontar este valor do resultado final). Neste sentido, em consulta a escassa bibliografia que trata sobre o assunto, encontrou-se o valor de quatro por cento da potência máxima do motor para a situação de marcha lenta – modo oito da ABNT NBR ISO 8178-4 (PAN et al., 2014), valor que foi adotado no presente estudo para estimar o consumo de energia do motor na marcha lenta

O aquecimento do motor, foi realizado conforme preconiza a ABNT NBR ISO 8178-4 (2012). Foram identificados, através das curvas de torque e potência, as rotações e o torque a serem impostos no dinamômetro para realização das avaliações de emissões de gases e opacidade, em cada modo de medição, utilizando uma planilha no *software Excel*. As medições em cada modo de operação, por meio do escape do motor, foram realizadas durante três minutos utilizando o opacímetro e o analisador de gases. Os ajustes das cargas ocorreram de forma manual, ajustando diretamente no painel de controle do dinamômetro (Figura 19). Já o controle da aceleração do motor ocorreu de forma automática, programando no painel do trator a rotação desejada durante o ensaio, atuando na aceleração de forma autônoma.

Figura 19 - Aplicação do torque e rotação no dinamômetro de forma manual, conforme os dados obtidos no ensaio dinamométrico



Fonte: Autor.

Para a análise da emissão dos gases foram descartados os primeiros dois minutos de avaliação, devido a estabilização da leitura de dados, considerando para a avaliação o minuto final que correspondeu a 60 dados (uma coleta por segundo).

Devido aos valores limites previstos pela MAR-1 serem estabelecidos na unidade de  $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , e os valores lidos pelos equipamentos de análise de gases e opacidade estarem em outras unidades, é necessário realizar as conversões para permitir a comparação dos resultados. Segundo a norma, os níveis de emissões devem ser proporcionais a potência gerada, sendo assim coletado os dados de potência instantânea juntamente com os dados de emissões.

Como a norma MAR-I prevê a quantidade total de emissões, ao invés da concentração de gases poluentes, foi necessário realizar o cálculo da massa total de ar admitida pelo motor e juntamente com a quantidade de combustível consumida, foi estimada a massa total de gases expelidos pelo escapamento. O cálculo da massa de ar admitida pelo motor foi realizado através do balanço estequiométrico da combustão, considerando o fluxo mássico de combustível medido pelo fluxômetro e a concentração dos gases de escapamento. Devido os gases sofrerem grande expansão com o aumento da temperatura, para os cálculos de material particulado foram considerados os dados de temperatura de um termopar tipo k, instalado no mesmo ponto da sonda do opacímetro.

Para o equipamento analisador da opacidade (material particulado) Opacilyt, a conversão dos resultados, da unidade de opacidade ( $\text{m}^{-1}$ ) para  $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , ocorreu através das equações apresentadas por Pilusa et al. (2012).

Para a conversão das unidades de medida dos gases poluentes coletados pelo Infralyt, foi considerada a metodologia apresentada no trabalho de Hesending et al. (2010). Sendo assim, para a conversão dos gases CO de ppm para  $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  deve-se utilizar a equação (10), em base úmida. Já para a conversão dos gases HC, NO e  $\text{NO}_2$ , é utilizado a equação (11), em base úmida.

$$EP_i = EV_{i,d} \times \left( \frac{M_i}{M_{Exh,d}} \right) \times \left( \frac{m_{Exh,d}}{P_{eff}} \right) \quad (10)$$

Onde:

$EP_i$  - Massa do poluente i, referenciado a  $P_{eff}$  ( $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ );

$EV_{i,d}$  - Valor de emissão de escape dos componentes, i, volume (ppm);

$M_i$  - Massa molar dos componentes, i ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ );

$M_{Exh,d}$  - Massa molar do escape ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ );

$m_{Exh,d}$  - Fluxo de massa do escape ( $\text{kg.h}^{-1}$ );

$P_{eff}$  - Potência (kW).

$$EP_i = EV_{i,w} \times \left( \frac{M_i}{M_{Exh,w}} \right) \times \left( \frac{m_{Exh,w}}{P_{eff}} \right) \quad (11)$$

Onde:

$EP_i$  - Massa do poluente i, referenciado a  $P_{eff}$  ( $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ );

$EV_{i,w}$  - Valor de emissão de escape dos componentes, i, volume (ppm);

$M_i$  - Massa molar dos componentes, i ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ );

$M_{Exh,w}$  - Massa molar do escape ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ );

$m_{Exh,w}$  - Fluxo de massa do escape ( $\text{kg.h}^{-1}$ );

$P_{eff}$  - Potência (kW).

Assume-se, respectivamente para os componentes: CO; HC;  $\text{NO}_2$ ;  $\text{CO}_2$ ; as massas molares: 28,0104; 13,876; 46,006; 44,01; em  $\text{kg.kmol}^{-1}$ . E para as massas molares dos escapes 30,21  $\text{kg.mol}^{-1}$  em base seca e 28,84  $\text{kg.mol}^{-1}$  em base úmida. Além disso, com 5% de  $\text{O}_2$  residual, correspondente a um excesso da relação de O 1,3:1, e consumo específico de combustível de 210  $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , assume-se: “ $(m_{Exh,d}) \times (P_{eff})^{-1}$ ” igual a 3.873  $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  e “ $(m_{Exh,w}) \times (P_{eff})^{-1}$ ” igual a 4.160  $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ .

### 3.5.4 Consumo horário e específico de combustível nos diferentes modos de operação

Esta metodologia proposta permite estabelecer um mapa de consumo horário e consumo específico do motor, e um valor médio para cada combustível, podendo servir de orientação para o dimensionamento de atividades com este motor e tipos de combustíveis utilizados.

Utilizar os dados provenientes do ensaio de parâmetros e desempenho do motor, com a determinação das curvas de torque, potência e consumo horário, pode levar a erros devido ao tempo de estabilização dos equipamentos para a leitura dos dados (em média de 1 a 3 segundos por ponto de coleta). Sendo os resultados muito próximos entre cada combustível, justifica-se a implementação desta metodologia, para maior confiabilidade dos dados e pela facilidade de aplicação, podendo ser realizada durante o ensaio de emissões. Com isso, tem-se a economia de insumos, menor desgaste de equipamentos e tempo de mão-de-obra.

Durante os três minutos de ensaio das emissões de gases, em cada modo de operação avaliado, foram coletados os dados de consumo horário de combustível, temperatura do combustível e potência pelo *software* do dinamômetro. As coletas dos dados ocorreram a cada 30s (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 segundos), totalizando 7 repetições.

Para o cálculo do consumo específico foi empregado a equação 05, utilizando os dados de temperatura do combustível (para conversão da massa específica), consumo horário e carga aplicada pelo dinamômetro (kW), no momento de avaliação de cada modo de operação. O valor médio ponderado do consumo horário e consumo específico, nos modos de operação, serão calculados conforme as equações (12) e (13):

$$V_{mp}CH_{mop} = 0,15 \times (M1 + M2 + M3 + M8) + 0,1 \times (M4 + M5 + M6 + M7) \quad (12)$$

Onde:

$V_{mp}CE_{mop}$ —Valor médio ponderado do consumo horário nos modos de operação (L.h<sup>-1</sup>);

$Mx$ — Valor de consumo horário em cada modo de operação (L.h<sup>-1</sup>).

$$V_{mp}CE_{mop} = 0,15 \times (M1 + M2 + M3 + M8) + 0,1 \times (M4 + M5 + M6 + M7) \quad (13)$$

Onde:

$V_{mp}CE_{mop}$ —Valor médio ponderado do consumo específico nos modos de operação (g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>);

$Mx$ — Valor de consumo específico em cada modo de operação (g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 1 – MOTORES OPERANDO COM MISTURAS DE ÓLEO DIESEL E ETANOL

Na base de dados do *Web of Science* foram detectados 13 resultados no total, sendo que, após uma análise criteriosa, apenas sete artigos de revisão bibliográfica tratavam sobre desempenho e/ou emissões com a utilização de misturas de óleo Diesel e etanol, e estavam publicados em revistas científicas (*journals*) de alto impacto.

Foram considerados, nesta primeira análise, os resultados dos artigos e trabalhos já citados nas revisões bibliográficas de Hansen et al. (2005), Giakoumis et al. (2013), Kumar et al. (2013), Shahir et al. (2015b), Mofijur et al. (2016), Zaharin et al. (2017) e Niculescu et al. (2019). Em uma segunda análise, foram encontrados outros artigos além dos citados nas revisões bibliográficas acima, além de trabalhos que foram citados por um autor e não foram citados por outros. Para esta pesquisa de complementação, foram utilizados os portais *Web of Science*, *ScienceDirect*, Portal de Periódicos Capes, *Google Scholar* e através da análise das referências bibliográficas de cada novo artigo inserido.

A Tabela 4 apresenta as principais informações destes artigos e dos *journals* em que foram publicados. No aspecto temporal, percebe-se que estas revisões bibliográficas foram publicadas entre os anos de 2005 a 2019, com uma maior concentração de publicações a partir do ano 2015, ocorrendo uma por ano até 2019. Sobre os países dos autores, se distribuem em África do Sul, Austrália, Coreia do Sul, Estados Unidos, França, Grécia, e Irã, Malásia e Romênia.

Sobre os *journals* em que foram publicados, são cinco artigos da revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, publicada pela Elsevier, um na *Bioresource Technology*, também publicado pela Elsevier e outro na *Energies*, revista de acesso aberto publicada pelo MDPI (*Multidisciplinary Digital Publishing Institute*). Todas as revistas apresentam alto fator de impacto, segundo os dados JCR<sup>®</sup> (*Journal Citation Reports*) do ano de 2019 (Tabela 4).

Tabela 4 - Principais informações dos artigos e *journals* de revisão bibliográfica que abordam os resultados de desempenho e emissões de motores operando com misturas de óleo Diesel e etanol

Autores Ano da publicação	País dos autores	<i>Journal</i>	Número de citações	Fator de impacto JCR <sup>®</sup> <i>Category</i> (2019)
Hansen et al. (2005)	África do Sul e Estados Unidos	<i>Bioresource Technology</i>	613	7.539
Giakoumis et al. (2013)	Grécia	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	161	12.110
Kumar et al. (2013)	Coreia do Sul	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	221	12.110
Shahir et al. (2015b)	Malásia	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	92	12.110
Mofijur et al. (2016),	Austrália e Malásia	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	126	12.110
Zaharin et al. (2017)	Austrália, Irã e Malásia	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	61	12.110
Niculescu et al. (2019)	França e Romênia	<i>Energies</i>	19	2.702

Fonte: Autor.

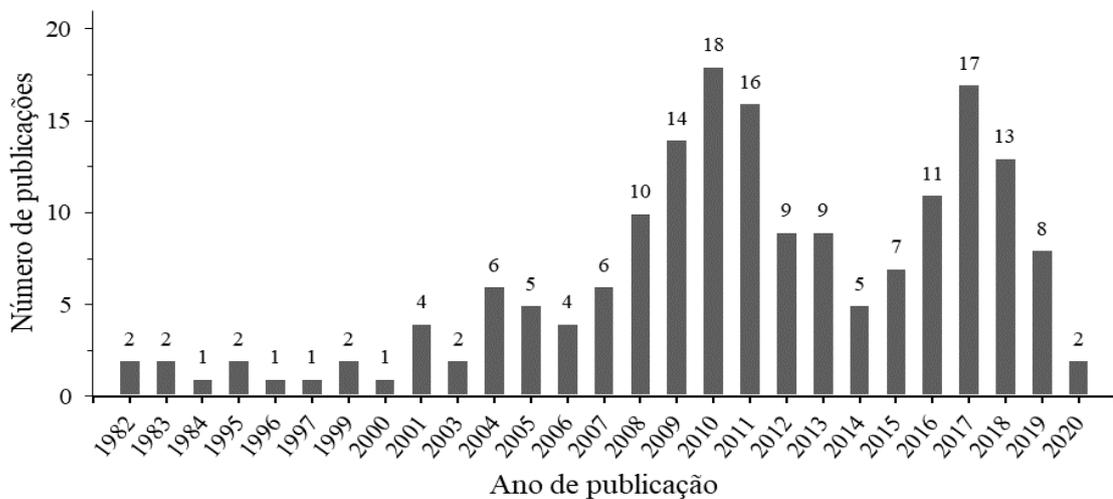
Quanto ao número de citações dos artigos, segundo a base de dados do Web of Science na data de 18 de setembro de 2020, o *ranking* da quantidade de vezes que o artigo foi citado temos: Hansen et al. (2005) com 613 citações, Kumar et al. (2013) com 221 citações, Giakoumis et al. (2013) com 161 citações, Mofijur et al. (2016) com 126 citações, Shahir et al. (2015b) com 92 citações, Zaharin et al. (2017) com 61 citações e Niculescu et al. (2019) que foi citado 19 vezes.

Os resultados compilados da primeira análise (artigos citados pelos autores acima) e da segunda análise, sobre o comportamento da adição de etanol em misturas com óleo Diesel, especificações e seu impacto no desempenho do motor e na emissão de gases poluentes, podem ser observados na Tabela 40 (APÊNDICE A - Página 203). Estes são os resultados dos principais trabalhos publicados mundialmente em *journals*, teses, dissertações e outras publicações acadêmicas. Ao todo foram 178 publicações selecionadas e analisadas, estas que testaram misturas de combustíveis em 187 diferentes motores.

Na Tabela 41 (APÊNDICE B– Página 235) é possível constatar os *journals* e/ou locais que estes trabalhos foram publicados, o número de publicações por local e o respectivo fator de

impacto, segundo os dados JCR<sup>®</sup> (*Journal Citation Reports*) do ano de 2019. Já referente ao aspecto temporal destas publicações, segundo a Figura 20, as publicações ocorreram entre os anos de 1982 a 2020, com duas maiores concentrações de publicações, no entorno de 2010, sendo que neste ano ocorreram 18 publicações, e no entorno de 2017, onde ocorreram 17 publicações.

Figura 20 - Aspecto temporal das publicações sobre desempenho e emissões de motores operando com misturas de óleo Diesel e etanol

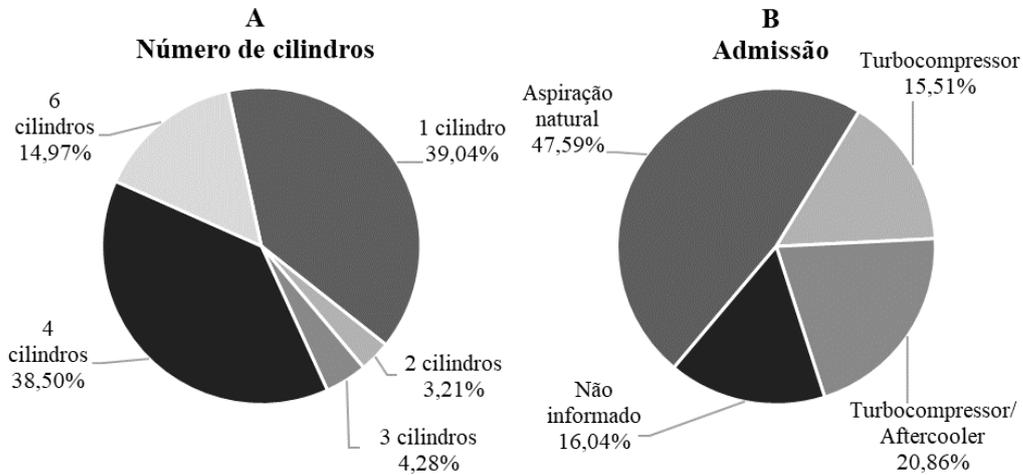


Fonte: Autor.

A Figura 21A representa graficamente o número de cilindros dos motores utilizados nestas publicações. Motores de um cilindro foram os mais utilizados, em 73 motores representando 39,04% do total, seguido por uma pequena diferença pelos motores de quatro cilindros, com 72 motores e 38,50% do total. Na sequência estão os motores de seis cilindros com 14,97% e de três e dois cilindros, com 4,28% e 3,21% do total, respectivamente.

Já sobre o tipo de admissão de ar pelo motor (Figura 21B), 47,59% dos motores possuíam aspiração natural, 20,86% turbocompressor com *aftercooler* e 15,51% somente turbocompressor. Se somados, 36,37% dos motores possuíam turbocompressor, que em sua grande maioria estavam instalados em motores a partir de quatro cilindros. De todos os motores, 16,04% dos autores não informaram o tipo de admissão utilizada.

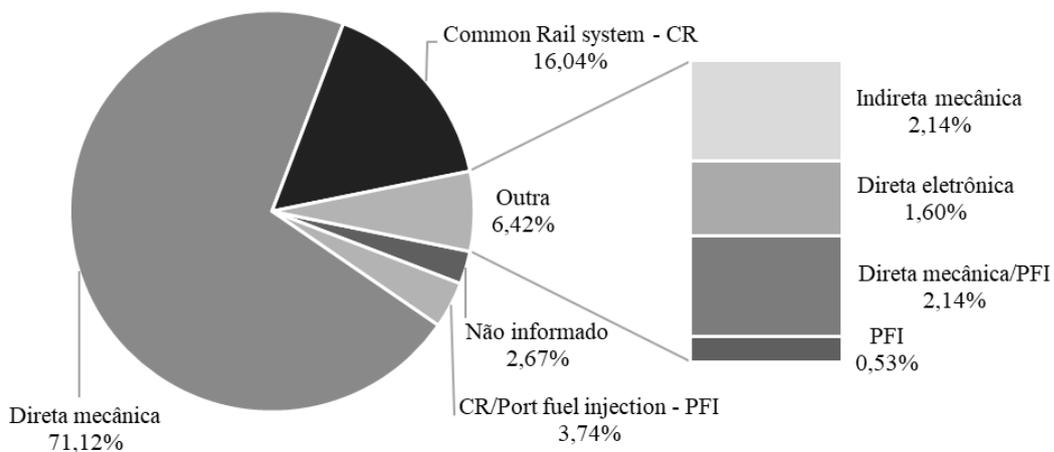
Figura 21 – Representação do número de cilindros (A) e tipo de admissão de ar do motor (B), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1



Fonte: Autor.

O sistema de injeção de combustível mais utilizado foi do tipo direta com gerenciamento mecânico da injeção (Figura 22), com 71,12% do total, equipando os motores de todos os números de cilindros.

Figura 22 - Representação do tipo de injeção de combustível dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1

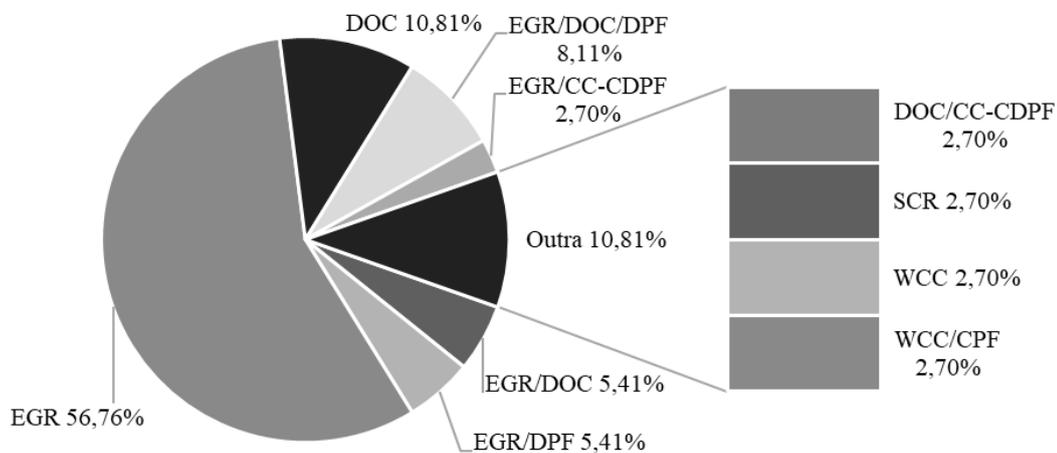


Fonte: Autor.

O sistema de gerenciamento eletrônico do tipo *Common Rail* representou 16,4% do total, equipando motores de um, quatro e seis cilindros. Do total, sistemas mecânicos de gerenciamento da injeção representaram 75,93%, e sistemas com gerenciamento eletrônico 21,38%. A injeção direta de combustível foi utilizada em 94,66% dos motores, a injeção indireta em 2,14% e o PFI apenas em um motor (0,53%).

Na Figura 23 estão representados os resultados da distribuição dos sistemas de tratamento de gases, dos motores que estavam equipados com este sistema. Do total, 154 motores não possuíam sistemas de tratamento de gases, representando 82,35%. O sistema mais utilizado é o EGR, que equipou 56,76% dos motores que possuíam sistemas de tratamento de gases, seguido pelo DOC com 10,81%. As variações do sistema EGR em adição a outros sistemas de tratamento de gases representaram 21,63%, sendo que o sistema EGR esteve presente em 78,39% do total de motores. Apenas os motores de dois e três cilindros não utilizaram nenhum sistema de tratamento de gases.

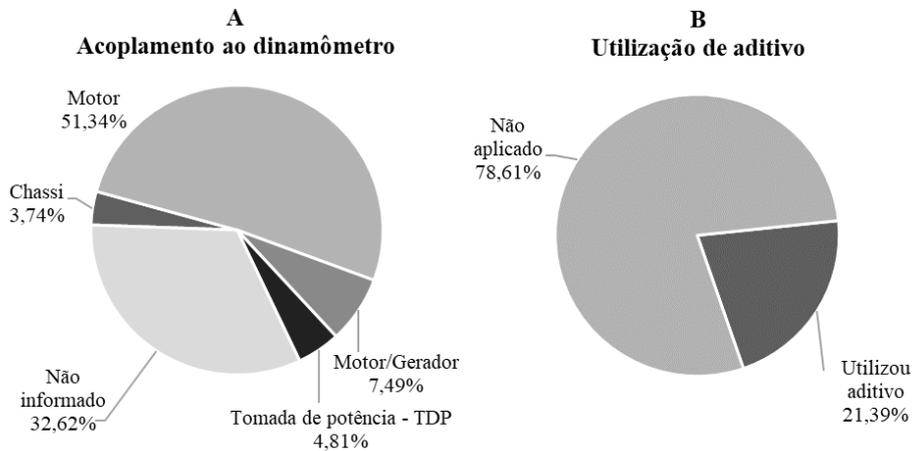
Figura 23 - Representação do sistema de tratamento de gases (TG) dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1



Fonte: Autor.

O acoplamento ao dinamômetro mais utilizado nos ensaios dinamométricos foi do tipo direto ao volante do motor, com 51,34% dos motores (Figura 24A). Do tipo motor acoplado a um gerador, com a imposição de cargas através de resistências elétricas, representou 7,49%. Através da tomada de potência de tratores foram 4,81% e em dinamômetro de chassi, com o veículo sendo testado sobre rolos, foram 3,74% dos motores testados.

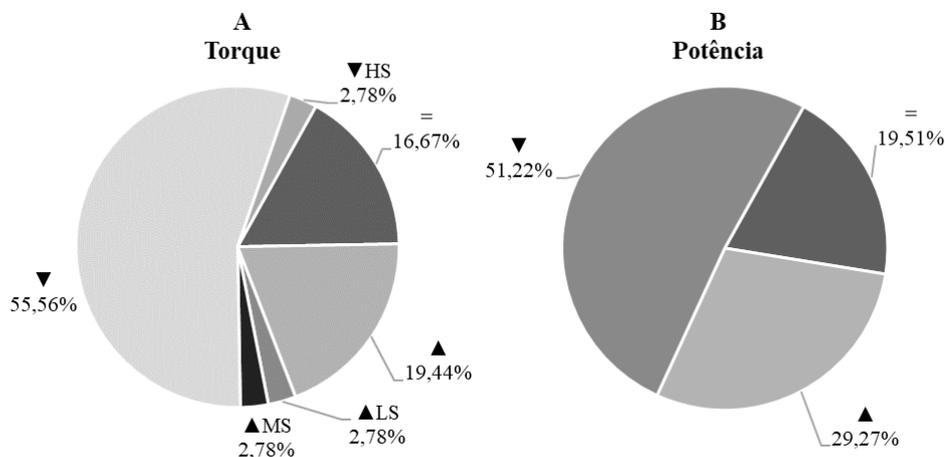
Figura 24 - Representação do tipo de acoplamento do motor ao dinamômetro (A) e os trabalhos que utilizaram etanol aditivado (B), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1



Fonte: Autor.

Os motores que operaram utilizando etanol aditivado (Figura 24B) representaram apenas 21,39% do total de motores analisados. Avaliando a influência da utilização do etanol em misturas de óleo Diesel no desempenho, estão representados graficamente na Figura 25A e B, os resultados de torque e potência, respectivamente, dos motores que apresentaram estes resultados nos artigos.

Figura 25 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol no torque (A) e potência (B), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1



Fonte: Autor.

Para o torque, houve a redução dos valores com a utilização do etanol para 55,56% dos motores, em relação a utilização somente de Diesel. Também houve a redução do torque em 2,78% para a condição específica dos regimes mais altos de velocidade angular do motor (*high speed* – HS), totalizando 58,34% dos motores que ao utilizar etanol tiveram a redução do torque (Figura 25A).

Já 16,67% dos motores avaliados não obtiveram alterações significativas no torque, e em 19,44% dos trabalhos houve o incremento no torque com a utilização de etanol. Também ocorreu o aumento nos valores de torque para duas condições específicas, médias (*medium speed* – MS) e baixas (*low speed* – LS) velocidades angulares do motor, representando cada uma com 2,78% do total de motores. No total, 25% dos motores apresentaram aumento dos valores de torque com a utilização do etanol no óleo Diesel (Figura 25A).

Se analisados separadamente somente os motores que apresentam o sistema de injeção do tipo *Common Rail* (CR), ou tratamento de gases de qualquer tipo (TG), ou ainda a junção do tratamento de gases mais o sistema *Common Rail* (CR +TG), em 100% dos trabalhos ocorreu a diminuição do torque com a adição do etanol no combustível (Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo dos efeitos da utilização de etanol para as condições específicas *Common Rail* (CR), tratamento de gases (TG) e *Common Rail* juntamente com tratamento de gases (CR+TG), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1

Variáveis	<i>Common Rail</i> (CR)	Tratamento de gases (TG)	CR+TG
Torque	▼100%	▼100%	▼100%
Potência	▲71,43% (com PFI) ▼50% (sem PFI)	▲66,67% (com PFI) ▼66,67% (sem PFI)	▲66,67% (com PFI) ▼66,67% (sem PFI)
Consumo específico combustível	▲100%	▲100%	▲100%
CO	▲80,76%	▲71,43%	▲88,24%
HC	▲84,85%	▲81,48%	▲86,36%
MP	▼92%	▼96%	▼94,44%
NO <sub>x</sub>	▼73,68%	▼63,64%	▼78,57%

Fonte: Autor.

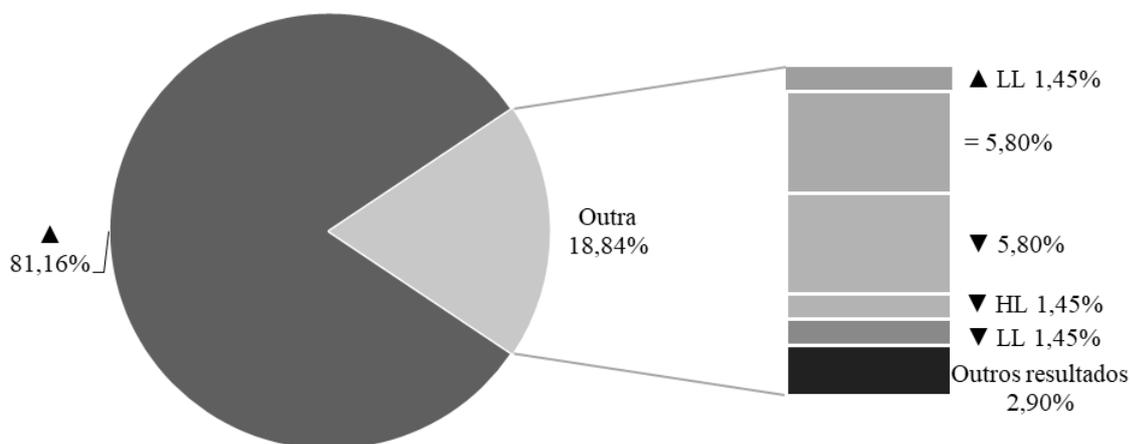
Para a potência (Figura 25B), 51,22% dos motores apresentaram diminuição dos valores, 29,27% constataram o aumento e 19,51% dos motores permaneceram com o mesmo

desempenho. A grande maioria dos motores que obtiveram incremento nos valores de torque e potência possuíam de um a três cilindros, ou estavam utilizando a injeção de etanol através de fumigação (PFI).

Quando analisado isoladamente os motores CR (Tabela 5), considerando os que utilizaram adicionalmente o sistema PFI, 71,43% apresentaram aumento dos valores de potência, provavelmente pelo aumento da quantidade injetada de combustível, somando óleo Diesel e etanol por fumigação. Se retirado os resultados do sistema PFI, apenas 50% dos resultados apresentaram aumento de potência. Para os resultados de TG e CR+TG, ambos apresentaram 66,67% de incremento dos valores de potência com a utilização de etanol com o sistema PFI, e 33,3% de aumento dos valores sem o sistema PFI.

A utilização de etanol em misturas com o óleo Diesel impactou em aumento do consumo específico de combustível em 82,35% dos motores (Figura 26), sendo 81,16% em todas as condições e 1,45% nas baixas cargas (*low loads* – LL) aplicadas. Para 5,80% dos motores não houve alterações significativas, e em 8,7% ocorreu a diminuição do consumo específico. Desses, 5,80% ocorreram em todas as condições, 1,45% para altas cargas (*high loads* – HL) e 1,45% para baixas cargas (LL) aplicadas ao motor. Todas as condições de decréscimo do consumo específico ocorreram em motores de um ou dois cilindros. Para as condições de apenas motores CR, com TG e CR+TG (Tabela 5), todos os resultados apontam aumento do consumo específico de combustível com o incremento de etanol na mistura.

Figura 26 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol no consumo específico de combustível, dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1

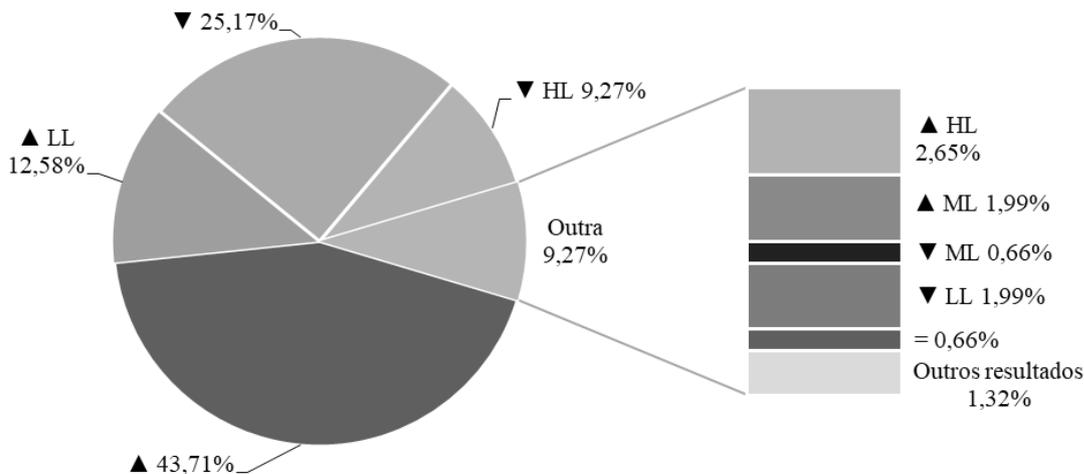




com CR+TG, o aumento das emissões de CO ocorreram em 88,24% dos motores que utilizaram etanol nas misturas com óleo Diesel (Tabela 5).

Para as emissões de hidrocarbonetos (HC), representadas graficamente na Figura 28, 60,9% dos resultados apresentaram aumento e 37,1% a diminuição das emissões quando da adição do etanol ao óleo Diesel. Destes, 43,71% dos resultados obtiveram aumento das emissões de HC em todas as condições de ensaio do motor, 12,58% em baixas cargas (LL) impostas ao motor e 4,61% em médias (ML) e altas cargas (HL). Os resultados que apresentaram diminuição das emissões foram 25,17% para todas as condições, 9,27% para altas cargas (HL) impostas ao motor e 2,65% para médias (ML) e baixas cargas (LL). Similarmente ao constatado para as emissões de CO, para os hidrocarbonetos a tendência é diminuir a emissão em altas cargas e aumentar em baixas cargas.

Figura 28 - Representação dos resultados nos ensaios dinâmicos da influência da utilização de etanol para as emissões de hidrocarbonetos (HC), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1



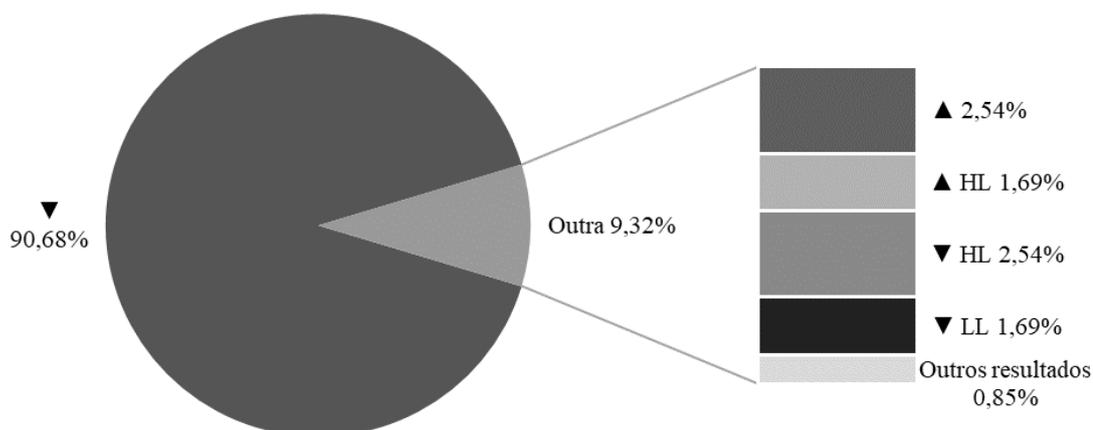
Fonte: Autor.

Para os motores apenas com CR, 84,85% dos resultados apresentaram aumento das emissões de HC com a utilização de etanol. Para a condição com TG, 81,48% dos resultados relatam aumento das emissões de HC, e 86,36% de aumento na condição CR+TG (Tabela 5).

As emissões de material particulado (MP) demonstram tendência a diminuição com a utilização de etanol (Figura 29). Em 94,9% dos resultados apresentaram a diminuição dos níveis de emissões de MP, sendo 90,68% em quaisquer condições de ensaio, 2,54% em altas cargas e 1,69% em baixas cargas. O aumento das emissões de MP ocorreu em 2,54% dos resultados em

qualquer condição e 1,69% em altas cargas. Para as condições específicas CR, TG e CR+TG, os resultados também demonstram a diminuição das emissões de MP com a utilização de etanol, com valores de redução de 92%, 96% e 94,44%, respectivamente.

Figura 29 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol para as emissões de material particulado (MP), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1

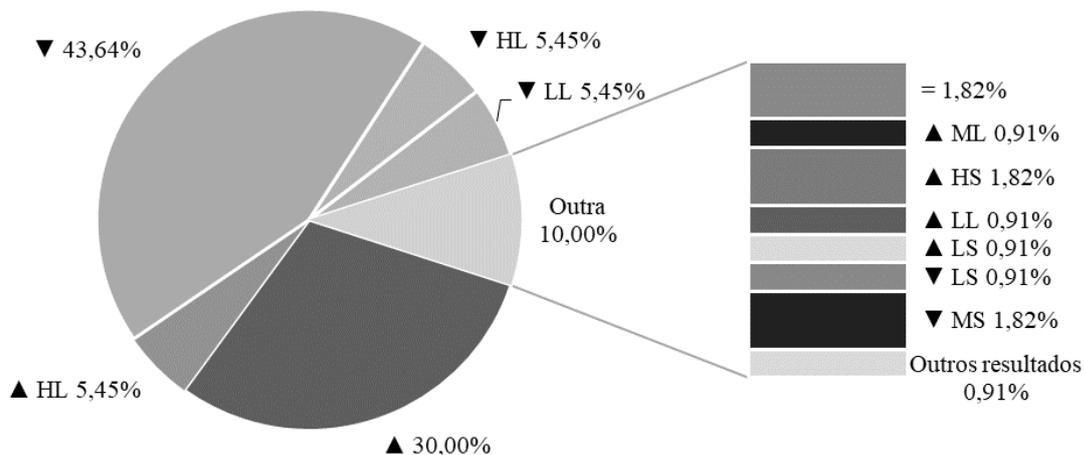


Fonte: Autor.

Para os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), a tendência observada foi a de diminuição das emissões, totalizando 57,30% (Figura 30). Foram 43,64% de decréscimo das emissões em qualquer condição, 5,45% em altas cargas, 5,45% em baixas cargas e 2,73% em outras condições. Já o aumento das emissões ocorreu em 30% em qualquer condição, 5,45% em altas cargas e 4,55% em outras condições, totalizando 40%. Os resultados não apresentaram relação com o número de cilindros, pois para todas as quantidades de cilindros ocorreram resultados distintos, aumentando ou diminuindo as emissões.

Ao analisar somente os motores com sistema de injeção CR, o incremento de etanol na mistura ocasionou a diminuição das emissões de  $\text{NO}_x$  em 73,68% dos motores estudados. Para motores com qualquer tipo de TG, a diminuição ocorreu em 63,64%, e na combinação dos modelos de motores com CR+TG, a diminuição das emissões de  $\text{NO}_x$  ocorreram em 78,57% dos motores que utilizaram etanol nas misturas com óleo Diesel (Tabela 5).

Figura 30 - Representação dos resultados nos ensaios dinamométricos da influência da utilização de etanol para as emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dos motores utilizados nas publicações sobre desempenho e emissões operando com misturas de óleo Diesel e etanol da revisão bibliométrica 1



Fonte: Autor.

Devido aos resultados obtidos nessa revisão bibliométrica, e das diversas condições que influenciam os resultados finais dos experimentos, como o número de cilindros, sistema de injeção, sistema de tratamento de gases, dentre outros, é possível compreender que motores devem ter seus resultados comparados com resultados de outros motores em condições similares, pois configurações distintas de motores levarão a diferentes resultados.

#### 4.1.1 Considerações da revisão bibliométrica 1

Através da análise dos 178 artigos, dos motores que utilizaram misturas de óleo Diesel e etanol compilados na revisão bibliométrica 1, é possível constatar que somente o aumento do consumo específico e a diminuição das emissões de material particulado ocorre na maioria dos trabalhos. Quando os resultados foram filtrados para motores com injeção eletrônica de combustível, sistema de tratamento de gases, e a combinação destes, é possível constatar que a grande maioria apresenta a diminuição do torque, aumento do consumo específico de combustível, aumento das emissões de CO e HC, e diminuição das emissões de NO<sub>x</sub> e MP. Neste sentido, para efeito de comparação, os resultados de um motor somente devem ser confrontados com os resultados de motores com as mesmas especificações e condições semelhantes de ensaio.

#### 4.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 2 – MOTORES ELETRÔNICOS E COM VÁLVULA EGR OPERANDO COM MISTURAS DE D:B:E

Do total de 178 trabalhos (APÊNDICE A - Tabela 40 - Página 203) compilados e analisados anteriormente, que trabalharam com misturas de etanol e óleo Diesel na revisão bibliométrica 1, apenas sete artigos se enquadraram nos limitantes propostos. Assim, os artigos selecionados trabalharam com misturas de óleo Diesel, biodiesel e etanol anidro, em motores com injeção gerenciada eletronicamente e sistema de tratamento de gases apenas com válvula EGR. Estes artigos foram utilizados para a discussão dos resultados desta análise bibliométrica e de comparação para a discussão dos resultados obtidos na presente tese.

Deste modo, esta análise utiliza as pesquisas de Lapuerta, Armas e García-Contreras (2009); Park, Cha e Lee (2010); Park, Youn e Lee (2011); Randazzo e Sodré (2011a, 2011b); Park et al. (2012); Shamun et al. (2018). No aspecto temporal, percebe-se que os trabalhos apresentam maior concentra o no entorno do ano 2011, com um trabalho em 2009, um em 2010, três em 2011 e um em 2012. A Tabela 6 apresenta os países dos autores, sendo três artigos com autores da Coreia do Sul, dois artigos com autores do Brasil, um artigo com autores da Espanha e um artigo de autores da Suécia e Itália.

Tabela 6 – Principais informa es dos artigos e *journals* selecionados para a análise bibliométrica de motores eletrônicos e com válvula EGR operando com misturas de D:B:E

Autores Ano da publica�o	Países dos autores	<i>Journal</i>	Número de cita�es	Fator de impacto JCR <sup>®</sup> <i>Category</i> (2019)
Lapuerta, Armas, García-Contreras (2009)	Espanha	Energy & Fuels	97	3.421
Park, Cha e Lee (2010)	Coreia do Sul	Energy & Fuels	36	3.421
Park, Youn e Lee (2011)	Coreia do Sul	Fuel	81	5.578
Randazzo e Sodré (2011a)	Brasil	Fuel	74	5.578
Randazzo e Sodré (2011b)	Brasil	Fuel	27	5.578
Park et al. (2012)	Coreia do Sul	Energy & Fuels	10	3.421
Shamun et al. (2018)	Suécia e Itália	Applied Thermal Engineering	15	4.725

Fonte: Autor.

Quanto ao número de citações dos artigos, segundo a base de dados do Web of Science na data de 18 de setembro de 2020, o *ranking* da quantidade de vezes que o artigo foi citado temos: Lapuerta, Armas e García-Contreras (2009) com 97 citações; Park, Youn e Lee (2011) com 81 citações; Randazzo e Sodré (2011a) com 74 citações. Park, Cha e Lee (2010) com 36 citações; Randazzo e Sodré (2011b) com 27 citações; Shamun et al. (2018) com 15 citações e Park et al. (2012) sendo citado em 10 artigos.

Analisando os dados da Tabela 6, percebe-se a baixa quantidade de artigos tratando de motores com gerenciamento eletrônico da inje o e tratamento de gases apenas com EGR. Também   verificado que os artigos mais citados são os com maior tempo de publica o, não necessariamente que os mais novos tenham menor expressão, pois também foram publicados em revistas de alta qualidade e impacto. Contudo, verifica-se a oportunidade de desenvolvimento de maiores pesquisas acerca deste assunto.

A Tabela 7 apresenta as especifica es dos motores utilizados por cada autor, as propor es das misturas de combustíveis utilizadas, a composi o destes combustíveis e os resultados de desempenho e emissões de gases.

Foram utilizados cinco motores com quatro cilindros e dois motores com um cilindro. Embora o trabalho de Shamun et al. (2018) analise apenas um cilindro, foi utilizado um motor completo de quatro cilindros Fiat/GM JTD de 1.910 cm<sup>3</sup> no experimento.

Quando comparados os deslocamentos volumétricos em rela o ao comumente utilizados em máquinas agrícolas,   possível verificar que todos são motores de pequeno porte, com deslocamentos volumétricos frequentemente utilizados em tratores pequenos e veículos automotores. O motor que apresenta menor deslocamento volumétrico tem 1.248 cm<sup>3</sup>, e o maior, 2.210 cm<sup>3</sup>, valor bem inferior em compara o ao motor utilizado na presente tese, que possui 4.400 cm<sup>3</sup>.

Sobre o sistema de inje o, todos os motores contam com gerenciamento eletrônico da inje o de combustível e sistema *Common Rail*. Em rela o ao modo de aspira o, um motor apresenta aspira o natural e seis motores contam com turbocompressor. Destes motores com turbocompressor, quatro possuem *aftercooler* para resfriamento dos gases após a passagem pelo turbocompressor. O tratamento de gases de todos os motores   apenas pelo sistema EGR.

Tabela 7 – Especificações dos motores e combustíveis utilizados, e resultados dos ensaios de desempenho e emissões de gases dos artigos da análise bibliométrica de motores eletrônicos e com válvula EGR operando com misturas de D:B:E

Autores Ano da publicação	Especificações do motor <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Detalhe dos combustíveis <sup>2</sup>	CE <sup>3</sup>	CO	HC	MP	NO <sub>x</sub>
Lapuerta, Armas, García-Contreras (2009)	4- cilindros, 2.210 cm <sup>3</sup> , <i>Common Rail</i> , Turb./Aftercooler, EGR, MT, Nissan Standard 4- cylinder Diesel engine	91,68:00:7,7 62,3:30:7,7 83:00:17	Diesel; 33,9 ppm; Éster metílico de óleo de soja; Etanol 99,7%; 0,62% Aditivo estabilizante e melhorador do número de cetano;	▲		▲	▼	▼
Park, Cha e Lee (2010)	1-cilindro, 373.3 cm <sup>3</sup> , <i>Common Rail</i> , Aspiração natural, EGR, MT, Diesel cycle engine	85:05:10 75:05:20 65:05:30	ULSD; 10 ppm; Éster metílico de óleo de soja; Etanol 99,9%; Não utilizou aditivo;		▲	▲	▼	▼
Park, Youn e Lee (2011)	4- cilindros, 1.582 cm <sup>3</sup> , <i>Common Rail</i> , Turbocompressor, EGR, MT, Diesel cycle engine	80:10:10 70:10:20	ULSD; 10 ppm; Éster metílico de óleo de soja; Etanol 99,9%; Não utilizou aditivo;		▲LL ▲ML	▲LL ▲ML		▼
Randazzo e Sodré (2011a)	4-cilindros, 1.248 cm <sup>3</sup> , <i>Common Rail</i> , Turb./Aftercooler, EGR, CH, 16-valve vehicular engine	78:20:02 75:20:05	Diesel B20; 500 ppm; Óleo de soja; Etanol 99,6%; Não utilizou aditivo;		▲	▲	▲	▼
Randazzo e Sodré (2011b)	4- cilindros, 1.248 cm <sup>3</sup> , <i>Common Rail</i> , Turb./Aftercooler, EGR, CH, 16-valve vehicular engine	78:20:02 75:20:05	Diesel B20; 500 ppm; Óleo de soja; Etanol 99,6%; Não utilizou aditivo;	▲E5 = E2				
Park et al. (2012)	4- cilindros, 1.582 cm <sup>3</sup> , <i>Common Rail</i> , Turbocompressor, EGR, MT, Diesel cycle engine	80:10:10 70:10:20	ULSD; 10 ppm; Éster metílico de óleo de soja; Etanol 99,9%; Não utilizou aditivo;	▲	▲LL ▲ML	▲LL ▲ML		
Shamun et al. (2018)	1-cilindro, 477.5 cm <sup>3</sup> , <i>Common Rail</i> , Turb./Aftercooler, EGR, MT, EV5 based on the Fiat/GM JTD 1.9 L engine	68:17:15 56:14:30	ULSD; 10 ppm; Éster metílico de óleo de soja; Etanol anidro; Não utilizou aditivo;	▲	▲	▲	▼	▼

<sup>1</sup> Sequência das especificações do motor: Número de cilindros, deslocamento volumétrico, tipo da injeção, aspiração, tratamento de gases de escapamento, acoplamento ao dinamômetro (MT – motor; CH - chassi ou dinamômetro de rolos), fabricante e modelo do motor, outras especificações.

<sup>2</sup> Sequência da descrição dos detalhes dos combustíveis: Combustível de referência; Teor de enxofre do óleo Diesel (ppm); Tipo de biodiesel utilizado; Pureza do etanol; Aditivo.

<sup>3</sup> CE – consumo específico de combustível; CO – monóxido de carbono; HC – hidrocarbonetos; MP – material particulado; NO<sub>x</sub> – óxidos de nitrogênio; LL – *low loads* (baixas cargas); ML – *medium loads* (médias cargas).

Fonte: Autor.

Para as análises, cinco motores tiveram o acoplamento direto ao dinamômetro, e dois motores foram analisados através de um dinamômetro para chassi (de rolos), sendo o motor analisado através do ensaio de um veículo automotor.

Os combustíveis utilizados por todos os autores foram óleo Diesel, biodiesel e etanol anidro. O que diferiu o óleo Diesel foi a quantidade de enxofre, sendo quatro experimentos com óleo Diesel com ultra baixo teor de enxofre (ULSD), possuindo 10 ppm em sua constituição, um experimento com 33,9 ppm e outros dois experimentos com 500 ppm de enxofre. Para o biodiesel, todos os autores utilizaram biodiesel de soja obtido através da transesterificação, sendo que cinco autores indicaram que a rota de obtenção foi a metílica. Já para o etanol, todos os trabalhos utilizaram etanol anidro, sendo que a pureza mínima informada foi de 99.6%. Apenas um autor utilizou aditivo, na proporção de 0,62% de aditivo, com a função de estabilizante e melhorador do número de cetano.

Quatro autores analisaram o desempenho do motor, através da análise do consumo específico de combustível (CE). Todos encontraram o comportamento de aumento do consumo específico com a utilização ou aumento da quantidade de etanol na mistura. Randazzo e Sodré (2011b) identificaram que com 2% de etanol não houve diferença estatisticamente significativa, porém, a partir de 5% de etanol na mistura, ocorre o aumento do CE.

As emissões de monóxido de carbono (CO) foram analisadas em cinco experimentos. Todos indicaram o aumento das emissões de CO com a utilização ou aumento da proporção de etanol no combustível. Park, Youn e Lee (2011) e Park et. al. (2012) identificaram maior incremento das emissões de CO em baixas e médias cargas. As emissões de hidrocarbonetos (HC) foram analisadas em cinco experimentos, e os resultados são similares as emissões de CO, ou seja, com a utilização ou o aumento das proporções de etanol na mistura, ocorre o acréscimo nas emissões de HC. Inclusive o mesmo comportamento relatado por Park, Youn e Lee (2011) e Park et. al. (2012) ocorre também com as emissões de HC.

As emissões de material particulado (MP) foram avaliadas em quatro experimentos, sendo que em três deles houve a redução das emissões com a utilização ou o acréscimo de etanol na mistura, e no experimento de Randazzo e Sodré (2011a), houve o incremento das emissões de MP. Segundo os autores, como o número de cetano do etanol é menor do que do biodiesel e óleo Diesel, a formação de MP é aumentada com a presença de etanol. O uso de aditivos para aumentar o número de cetano pode reduzir a formação de MP a partir de misturas de óleo Diesel e etanol. Também afirmam que pode estar relacionada aos parâmetros de injeção do motor do presente estudo, e que sua alteração pode trazer benefícios.

Os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) foram analisados em cinco experimentos, e houve unanimidade dos resultados, com a redução da emissão com a utilização ou o acréscimo de etanol nos combustíveis.

#### **4.2.1 Considerações da revisão bibliométrica 2**

Na revisão bibliométrica 2, onde somente motores que operaram com óleo Diesel, biodiesel e etanol, que contavam com injeção eletrônica de combustível e sistema de tratamento de gases do tipo EGR, o comportamento dos sete artigos resultantes foi de aumento do consumo específico de combustível, aumento das emissões de CO e HC (principalmente em baixas e médias cargas), diminuição das emissões de  $\text{NO}_x$  e MP. A exceção fica para os autores Randazzo e Sodré (2011a), os quais justificam que o aumento das emissões de MP pode estar relacionado aos parâmetros de injeção do motor em estudo.

### 4.3 DESEMPENHO DO MOTOR NO ENSAIO DINAMOMÉTRICO

Para o correto cálculo do torque, potência e consumo de combustível (tanto horário quanto o específico), foi necessário informar ao software de gerenciamento do dinamômetro os parâmetros atmosféricos e a massa específica dos combustíveis. Durante todo o experimento, o fator de correção situou-se dentro dos limites aceitáveis indicados pela norma, que são entre 0,92 e 1,07 (CECH e TOMCÍK, 2010).

De acordo com os valores obtidos (Tabela 8), a massa específica dos combustíveis diminuiu com o incremento de etanol anidro na sua composição. Isso ocorre devido a diferença entre as densidades dos combustíveis, que segundo a resolução ANP nº 50/2013, a massa específica do BS10 deve-se situar entre 815 a 853 g.L<sup>-1</sup>, do BS500 entre 815 a 865 g.L<sup>-1</sup> (ANEXO A), e segundo a resolução ANP nº19/2015 o etanol anidro em no máximo 791,5 g.L<sup>-1</sup> (ANEXO C). Todos os combustíveis testados apresentaram valor de massa específica dentro dos limites preconizados pela resolução ANP nº 50/2013.

Tabela 8 - Massa específica dos combustíveis testados a 20°C

Combustíveis	Concentrações de etanol (%)	Massa específica (g.L <sup>-1</sup> )
BS10	0	844,4
	5	840,2
	10	839,5
	15	834,8
	20	833,3
BS500	0	848,0
	5	844,1
	10	842,3
	15	838,2
	20	836,6

Fonte: Autor.

Autores como Shi et al. (2005), Kwanchareon et al. (2007), Barabás et al. (2010), Subbaiah et al. (2010), Hulwan e Joshi (2011), Park, Youn e Lee (2011), Al-Hassan, Mujafet e Al-Shannag (2012), Park et al. (2012), Beatrice, Napolitano e Guido (2014), Oliveira et al. (2015), Klajn (2016), Klajn et al. (2018) e Farias (2019) também relataram a diminuição da massa específica com o acréscimo das concentrações de etanol. A diminuição ocorre devido o

etanol possuir uma menor massa específica se comparado ao óleo Diesel e biodiesel (KWANCHAREON et al., 2007). Além disso, o valor de densidade das misturas dependerá muito do tipo de biodiesel empregado, pois a literatura apresenta valores que variam entre 848,5 até 931 g.L<sup>-1</sup> (MOFIJUR et al., 2016). Segundo Klajn (2016), uma maior densidade ocasiona maior resistência de escoamento do combustível, o que dificulta a atomização e a consequente injeção para os cilindros do motor.

Analisando os resultados de massa específica, em relação ao BS10 puro, com 15% de etanol o presente trabalho apresentou redução de 1,14%, valor similar ao encontrado por Oliveira et al. (2015), que trabalhando com 7% de concentração de biodiesel obtiveram 1,07% de redução da massa específica. Farias et al. (2019) testando misturas de óleo Diesel BS500 com etanol (com 5% de biodiesel), encontraram na concentração de 15% de etanol valor 0,95% inferior de massa específica em relação ao BS500 puro (0% de etanol). O valor é menor ao do presente estudo, que apresentou 1,16% de redução na massa específica na concentração de 15% de etanol, em relação ao BS500 puro.

Isso demonstra que os valores da bibliografia são contrastantes, conforme tipo de óleo Diesel, biodiesel e etanol utilizados. Utilizando óleo Diesel com 10% de biodiesel, Al-Hassan, Mujafet e Al-Shannag (2012) encontraram 0,41% de redução da massa específica aos 10% de etanol, enquanto Park, Youn e Lee (2011) obtiveram 1,95%, Barabás et al. (2010) obtiveram 0,53% e Klajn (2016) obteve 0,64%, todos nas mesmas condições de concentrações. Já Beatrice, Napolitano e Guido (2014) aos 20% de etanol (com 10% de biodiesel), encontraram 0,98% na redução da massa específica, enquanto Al-Hassan, Mujafet e Al-Shannag (2012) obtiveram 0,82% de redução, sendo que no presente trabalho a redução foi de 1,31%.

#### **4.3.1 Torque, potência, consumo horário e consumo específico de combustível**

Para o desempenho do motor no ensaio dinamométrico, os resultados encontrados não apresentam interação significativa entre combustíveis, concentrações de etanol e velocidades angulares (rotações) do motor (C x E x R) (Tabela 9). Analisando os diferentes combustíveis e as concentrações de etanol (C x E), observa-se interação significativa nas variáveis torque, potência, consumo horário e consumo específico de combustível. Também houve interação entre os combustíveis e as diferentes rotações de trabalho do motor agrícola (C x R), para as variáveis torque, consumo horário e consumo específico de combustível. Não houve interação para as variáveis etanol e rotação (E x R).

Tabela 9 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de torque, potência, consumo horário de combustível e consumo específico de combustível no ensaio dinamométrico, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), velocidade angular (rotações) do motor (R), as interações (C x E), (C x R), (E x R) e (C x E x R), o coeficiente de variação (CV) e a média geral

Fatores de variação	Quadrados médios			
	Torque (N.m)	Potência (kW)	Cons. Horário (L.h <sup>-1</sup> )	Cons. Específico (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )
Combustíveis (C)	246,4*	5,0*	18,5*	1.782,1*
Concentrações de etanol (E)	4.205,9*	117,6*	23,6*	3.491,6*
Rotações (R)	23.443,1*	710,0*	80,0*	243,3*
C x E	273,8*	7,4*	3,9*	229,5*
C x R	18,0*	0,5	0,8*	60,8*
E x R	6,1	0,4	0,4	28,8
C x E x R	5,0	0,3	0,3	27,1
CV (%)	0,53	0,67	2,07	2,04
Média geral	534,76	91,76	26,63	243,73

\* Efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Na Tabela 10 estão representados os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis e concentrações de etanol (C x E). Para o torque, o combustível BS500 apresentou resultados 1,41%, 0,28% e 0,63% superiores ao BS10 nas misturas com 5%, 10% e 15% de etanol, respectivamente. Para os combustíveis sem a adição de etanol (0%), o BS10 apresentou resultado 0,5% superior ao BS500. Na concentração de 20% de etanol, não houve diferença significativa entre ambos os combustíveis, sendo que neste ponto se situa os menores resultados para o torque, apresentando valores de 523,70 N.m para o BS10 e 522,55 N.m para o BS500.

Na análise dos valores de torque entre as concentrações de etanol (Tabela 10), o combustível BS10 apresentou diferença significativa entre os resultados, com o maior valor de torque para o combustível sem a adição de etanol (puro). O segundo maior valor ocorreu com 10% de etanol, não havendo diferença significativa para 5% de etanol. O menor desempenho de torque ocorreu na concentração de 20% de etanol. Na Figura 31 é possível visualizar que a curva de regressão do torque no ensaio dinamométrico decresce com a adição de etanol na mistura. As diferenças percentuais do torque, das concentrações de etanol em relação ao BS10 puro, em ordem decrescente foram -1,20%, -1,30%, -2,79% e -3,67%, respectivamente para 10%, 5%, 15% e 20% de etanol.

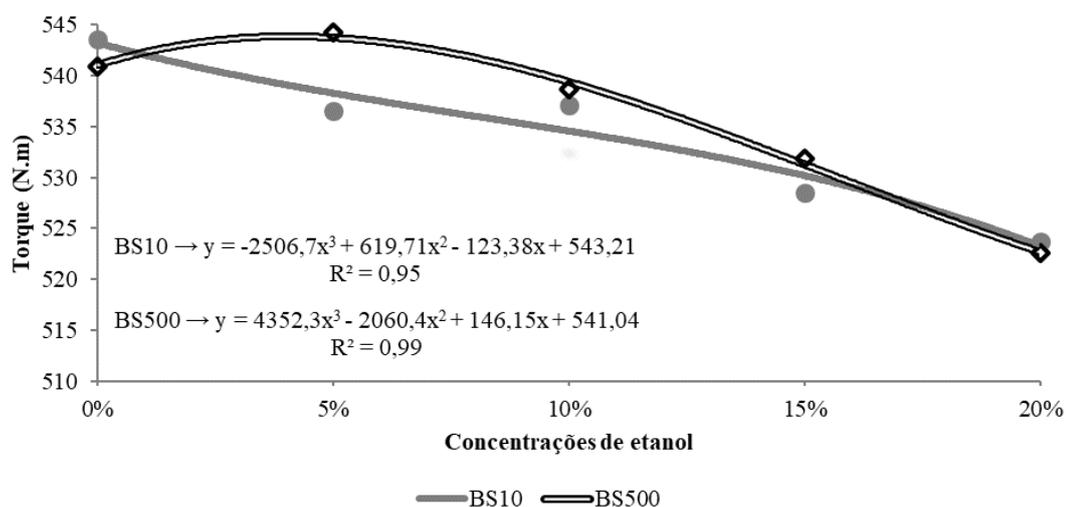
Tabela 10 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio dinamométrico (C x E), para o torque, potência, consumo horário e consumo específico de combustível, e a diferença percentual entre os combustíveis em cada variável

Combustíveis	Concentrações de etanol (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
----- Torque (N.m) -----					
BS10	543,64 <sup>aA*</sup>	536,56 <sup>bB</sup>	537,14 <sup>bB</sup>	528,47 <sup>bC</sup>	523,70 <sup>aD</sup>
BS500	540,91 <sup>bB</sup>	544,25 <sup>aA</sup>	538,63 <sup>aC</sup>	531,81 <sup>aD</sup>	522,55 <sup>aE</sup>
Diferença (%)	-0,50%	1,41%	0,28%	0,63%	-0,22%
----- Potência (kW) -----					
BS10	93,25 <sup>aA</sup>	92,06 <sup>bB</sup>	92,15 <sup>aB</sup>	90,83 <sup>bC</sup>	89,91 <sup>aD</sup>
BS500	92,78 <sup>bB</sup>	93,31 <sup>aA</sup>	92,43 <sup>aB</sup>	91,24 <sup>aC</sup>	89,67 <sup>aD</sup>
Diferença (%)	-0,51%	1,34%	0,30%	0,45%	-0,27%
----- Consumo horário de combustível (L.h <sup>-1</sup> ) -----					
BS10	26,07 <sup>aB</sup>	25,69 <sup>bC</sup>	26,94 <sup>bA</sup>	26,23 <sup>bB</sup>	27,02 <sup>bA</sup>
BS500	25,92 <sup>aC</sup>	26,29 <sup>aB</sup>	27,30 <sup>aA</sup>	27,41 <sup>aA</sup>	27,40 <sup>aA</sup>
Diferença (%)	-0,58%	2,28%	1,32%	4,30%	1,39%
----- Consumo específico de combustível (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ) -----					
BS10	236,14 <sup>aD</sup>	234,38 <sup>bD</sup>	245,20 <sup>bB</sup>	241,10 <sup>bC</sup>	250,19 <sup>bA</sup>
BS500	236,77 <sup>aC</sup>	237,73 <sup>aC</sup>	248,60 <sup>aB</sup>	251,72 <sup>aB</sup>	255,47 <sup>aA</sup>
Diferença (%)	0,27%	1,41%	1,37%	4,22%	2,07%

\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna para cada variável analisada e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Figura 31 - Representação das curvas de regressão do torque no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



Fonte: Autor.

Já para o combustível BS500, houve diferença significativa entre todas as variáveis, sendo que a mistura com 5% de etanol apresentou o maior valor de torque entre todos os resultados (544,25 N.m) (Tabela 10). A curva de regressão (Figura 31) inicia com um menor valor em 0% de etanol, aumenta em 5%, e após os 10% os valores decrescem até os 20% de concentração de etanol, sendo esta última a concentração de etanol que apresentou o menor desempenho para torque. As diferenças percentuais do torque, das concentrações de etanol em relação ao BS500 puro, em ordem decrescente foram 0,62%, -0,42%, -1,68% e -3,39%, respectivamente para 5%, 10%, 15% e 20% de etanol.

Resultados de decréscimo do torque com o aumento das concentrações de etanol em mistura com óleo Diesel foram relatados por Ali, Hanna e Borg (1995), Kass et al. (2001), Pang et al. (2006), Chen et al. (2008), Arapatsakos (2009), Chen et al. (2009), Cruz (2009), Farias et al. (2017a), Iacono (2017), Bietresato et al. (2019), Pradelle et al. (2019) e Sutar et al. (2019).

Estrada et al. (2016a) utilizando óleo Diesel BS500 com 5% de biodiesel em um motor de trator agrícola com injeção mecânica, não encontraram diferença estatística entre as concentrações de 0% e 3% de etanol, para torque e potência. Já para as concentrações de 9% e 15% de etanol, os resultados em relação ao combustível de referência foram 2,95% e 6,29% inferiores, respectivamente, sendo estes valores superiores aos do presente estudo, onde para a concentração de 10% de etanol a redução do torque foi de 0,42%, e para 15% foi de 1,68%.

As menores reduções de torque com o aumento das concentrações de etanol do presente estudo, podem ser justificadas pela utilização de um motor com injeção mais aprimorada (injeção com gerenciamento eletrônico), pela maior quantidade de biodiesel (5% versus 10%), e pela utilização de etanol anidro, ao invés do etanol hidratado. O biodiesel no óleo Diesel atua como um aditivo, estabilizando a mistura e melhorando as propriedades físico químicas (KWANCHERON, LUENGNARUEMITCHAI e JAIN-IN, 2007; LAPUERTA, ARMAS e GARCÍA-CONTRERAS, 2009; CASTILLO-HERNÁNDEZ, MENDOZA-DOMÍNGUEZ e CABALLERO-MATA, 2012)

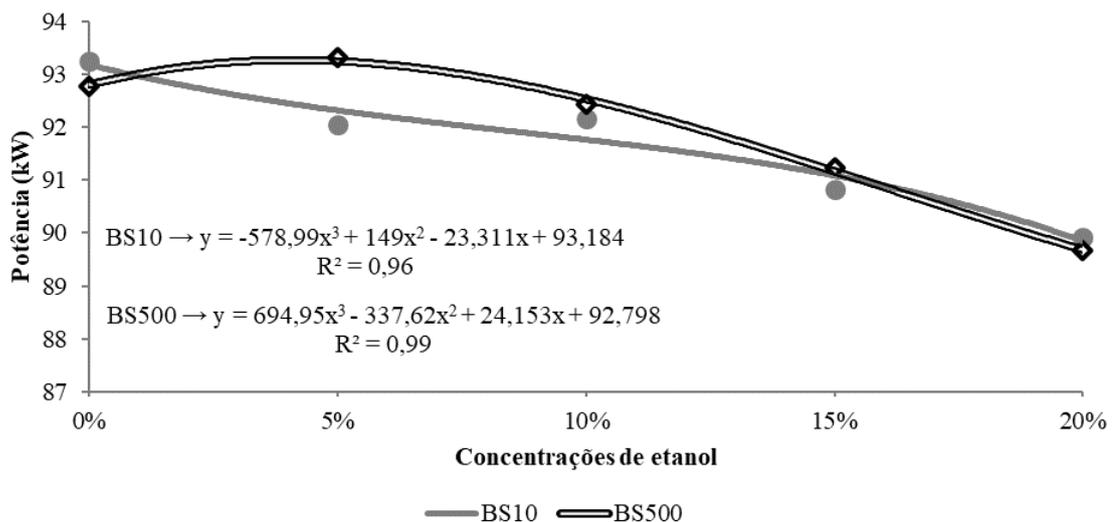
As reduções dos valores também podem ser explicadas pelo menor número de cetano e poder calorífico do etanol em comparação ao óleo Diesel, que afeta a qualidade de injeção e combustão. De acordo com CHEN et al. (2009), o número de cetano diminui linearmente com o aumento das concentrações de etanol no óleo Diesel.

Os resultados de potência no ensaio dinamométrico entre os combustíveis (Tabela 10), tiveram comportamento similar com os resultados do teste de médias para a variável torque, com exceção dos combustíveis com 10% de etanol, onde não houve diferença significativa entre BS10 e BS500. O combustível BS10 apresentou resultado 0,51% superior de potência em

relação ao BS500 quando não houve a adição de etanol (0%). Já o BS500 apresentou resultados superiores nas misturas com 5% e 15% de etanol. Nas concentrações de 10% e 20% de etanol, não houve diferença significativa para ambos os combustíveis, sendo que na concentração de 20% de etanol ocorreram os menores valores de potência (89,91 kW para o BS10 e 89,67 kW para o BS500).

Na análise dos valores de potência entre as concentrações de etanol (Tabela 10), o combustível BS10 apresentou diferença significativa entre os resultados, com o maior valor de potência (93,25 kW) para o combustível sem a adição de etanol (puro). O segundo maior valor ocorreu com 10% de etanol, não havendo diferença significativa para 5% de etanol. O menor desempenho de potência ocorreu na concentração de 20% de etanol. Na Figura 32 é possível visualizar que a curva de regressão da potência do BS10 resultou em comportamento similar ao que ocorreu para o torque, com decréscimo do desempenho com a adição de etanol. As diferenças percentuais para a potência, das concentrações de etanol em relação ao BS10 puro, em ordem decrescente foram -1,18%, -1,28%, -2,60% e -3,58%, respectivamente para 10%, 5%, 15% e 20% de etanol.

Figura 32 - Representação das curvas de regressão da potência no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



Fonte: Autor.

Já para o combustível BS500, houve diferença significativa entre as variáveis, sendo que a mistura com 5% de etanol apresentou o maior valor entre todos os resultados de potência

(93,31 kW) (Tabela 10). A curva de regressão (Figura 32) teve o mesmo comportamento da curva de torque para o BS500. As diferenças percentuais para a potência, das concentrações de etanol em relação ao BS500 puro, foram 0,57%, -0,38%, -1,66% e -3,35%, em ordem decrescente respectivamente para 5%, 10%, 15% e 20% de etanol.

De acordo com RAHIMI et al. (2009), com a utilização de misturas de etanol em um motor de ciclo Diesel, ocorre a redução do desempenho, indicando que a adição de oxigenados no óleo Diesel reduz a potência do motor. Outros estudos concluíram que quanto menor a estabilidade, massa específica, poder calorífico e o maior teor de água da mistura entre etanol e óleo Diesel, maior a contribuição para a redução da potência do motor (LAPUERTA, ARMAS e GARCÍA-CONTRERAS, 2007; TORRES-JIMENEZ et al., 2011; AL-HASSAN, MUJAFET e AL-SHANNAG, 2012).

Resultados de decréscimo da potência com o aumento das concentrações de etanol no óleo Diesel foram relatados por Meiring (1983), Ali, Hanna e Borg (1995), Satgé de Caro (2001), Pang et. al. (2006), Arapatsakos (2009), Zöldy (2011), Guido, Beatrice e Napolitano (2013), Farias et al. (2017a), Iacono (2017), Bietresato et al. (2019) e Sutar et al. (2019).

Os resultados de potência para Estrada et al. (2016a), quando comparados com o óleo Diesel (BS500 com 5% de biodiesel), obtiveram reduções de 3,14% e 6,30%, respectivamente para as concentrações de 9% e 15% de etanol. Como ocorreu com o torque, os valores são superiores aos do presente estudo, que para as concentrações de 10% e 15% de etanol apresentaram reduções de 0,38% e 1,66% para a potência. Os resultados na concentração de 15% de etanol também são bastante inferiores aos obtidos na mesma concentração por Hansen, Zhang e Lyne (2005), com redução de 7% a 10% da potência, Kass et al. (2001), com 8% de redução e Can, Çelikten e Usta (2004), que encontraram valores próximos a 20% de redução da potência.

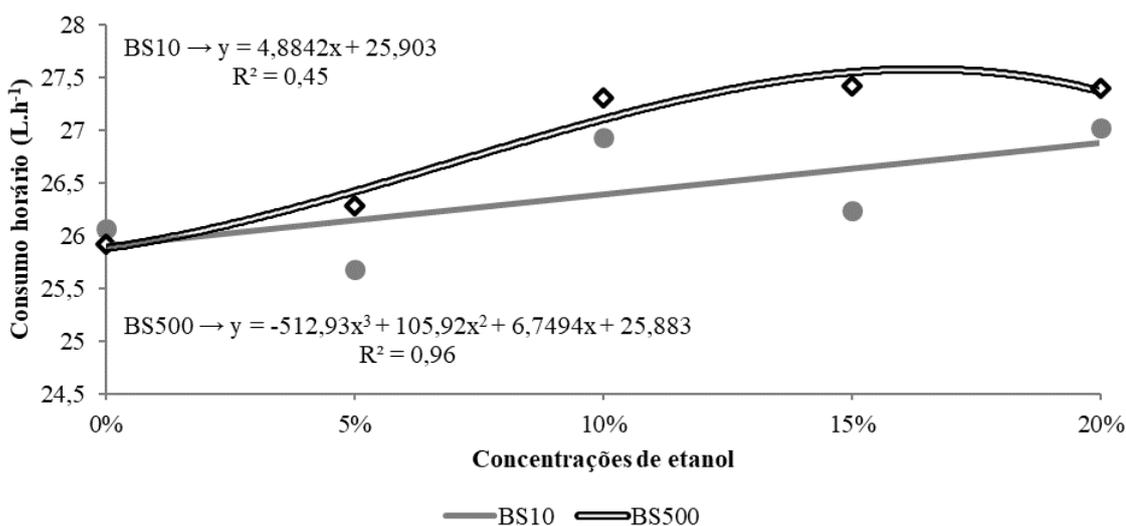
Os resultados do teste de médias, do consumo horário de combustível entre os combustíveis BS10 e BS500 (Tabela 10), demonstram que apenas na concentração de 0% de etanol em ambos os combustíveis apresentam o mesmo desempenho. Para as demais concentrações, o BS500 obteve resultados de 2,28%, 1,32%, 4,30% e 1,39% superiores no consumo horário de combustível do que o BS10, para 5%, 10%, 15% e 20% de etanol, respectivamente.

Na análise dos valores de consumo horário entre as concentrações de etanol (Tabela 10), o combustível BS10 apresentou diferença significativa entre os resultados, com o maior consumo horário de combustível na concentração de 20% de etanol (27,02 L.h<sup>-1</sup>), sem diferença significativa para 10% de etanol. O menor consumo horário ocorreu para a concentração de 5%

de etanol, com valor de  $25,69 \text{ L.h}^{-1}$ . A análise de regressão resultou em uma curva com comportamento de aumento do consumo horário de combustível com o acréscimo de etanol (Figura 33). As diferenças percentuais do consumo horário, das concentrações de etanol em relação ao BS10 puro, em ordem crescente foram  $-1,46\%$ ,  $0,61\%$ ,  $3,34\%$  e  $3,64\%$ , respectivamente para 5%, 15%, 10% e 20% de etanol.

Já para o combustível BS500, não houve diferença significativa entre as concentrações de 10%, 15% e 20% de etanol (Tabela 10), sendo nestas concentrações o maior consumo horário de combustível, com valores de  $27,3 \text{ L.h}^{-1}$ ,  $27,41 \text{ L.h}^{-1}$  e  $27,40 \text{ L.h}^{-1}$ , respectivamente. O menor consumo horário ocorreu no BS500 puro, com valor de  $25,92 \text{ L.h}^{-1}$ . O comportamento da curva de regressão (Figura 33) foi de aumento do consumo horário com o acréscimo de etanol até os 15% de etanol, e decréscimo até os 20% de etanol. As diferenças percentuais do consumo horário, das concentrações de etanol em relação ao BS500 puro, em ordem crescente foram  $1,43\%$ ,  $5,32\%$ ,  $5,71\%$  e  $5,75\%$ , respectivamente para 5%, 10%, 20% e 15% de etanol.

Figura 33 - Representação das curvas de regressão do consumo horário de combustível no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



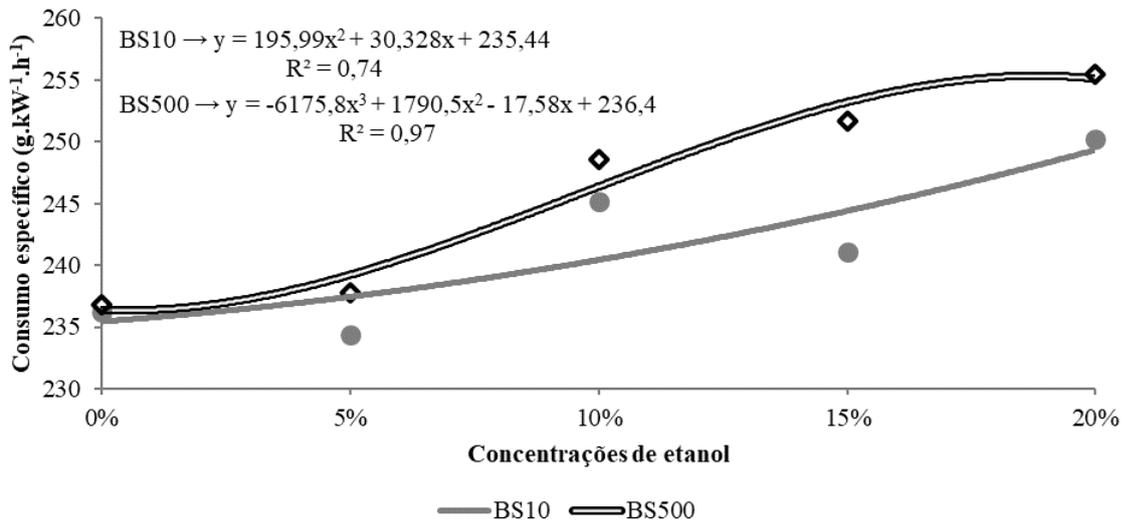
Fonte: Autor.

Conforme os resultados do consumo específico de combustível no ensaio dinamométrico (Tabela 10), o teste de médias teve comportamento similar aos resultados do consumo horário de combustível, onde apenas na concentração de 0% de etanol em ambos os

combustíveis, BS10 e BS500, apresentam o mesmo desempenho. O combustível BS500 apresentou resultado superior de consumo específico, em relação ao BS10, nas concentrações de 5%, 10%, 15% e 20% de etanol, com valores 1,41%, 1,37%, 4,22% e 2,07% superiores, respectivamente.

Na análise dos valores do consumo específico de combustível entre as concentrações de etanol (Tabela 10), o combustível BS10 apresentou diferença significativa entre os resultados, com o maior consumo específico na concentração de 20% de etanol ( $250,19 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ). O menor consumo específico ocorreu para a concentração de 5% de etanol, com valor de  $234,38 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , sem diferença significativa para 0% de etanol ( $236,14 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ). A análise de regressão resultou em uma curva com comportamento de aumento do consumo específico de combustível com o acréscimo de etanol (Figura 34). As diferenças percentuais do consumo específico, das concentrações de etanol em relação ao BS10 puro, em ordem crescente foram -0,75%, 2,10%, 3,84% e 5,95%, respectivamente para 5%, 15%, 10% e 20% de etanol.

Figura 34 - Representação das curvas de regressão do consumo específico de combustível no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



Fonte: Autor.

Já para o combustível BS500, não houve diferença significativa entre as concentrações de 0% e 5% de etanol (Tabela 10), sendo também nestas concentrações o menor consumo específico de combustível, com valores de  $236,77 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  e  $237,73 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ,

respectivamente. O maior consumo específico ocorreu no BS500 com 20% de etanol, com valor de 255,47 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>. A curva de regressão apresenta o acréscimo dos valores de consumo específico com o aumento da concentração de etanol no BS500, porém exibe tendência a estabilização próximo aos 20% de etanol (Figura 34). As diferenças percentuais do consumo específico, das concentrações de etanol em relação ao BS500 puro, em ordem crescente foram 0,41%, 5,00%, 6,31% e 7,90%, respectivamente para 5%, 10%, 15% e 20% de etanol.

No trabalho de Randazzo e Sodré (2011b), a adição de 2% de etanol no óleo Diesel BS500 (com 20% de biodiesel) não afetou o consumo específico de combustível, no entanto quando a concentração de etanol foi aumentada para 5%, identificou-se o aumento do consumo específico de combustível. Já os autores Cheenkachorn e Fungtammasan (2010) não encontraram diferença entre a concentração de 5% de etanol e o óleo Diesel.

Lapuerta, Armas e García-Contreras (2009) encontraram para a concentração de 7,7% de etanol valores próximos ao óleo Diesel puro (com 0% de biodiesel e 0% etanol), e constataram o aumento do consumo específico de combustível com o incremento de etanol nas demais misturas. Park et. al (2012) e Shamun et al. (2018), também encontraram em seus trabalhos a relação de aumento do consumo específico de combustível com acréscimo de etanol no óleo Diesel.

Diversos outros autores observaram aumento no consumo específico de combustível com o incremento das concentrações de etanol, e explicam que isso ocorre devido ao menor poder calorífico das misturas ternárias Diesel-biodiesel-etanol (BARABÁS et al., 2010; HULWAN e JOSHI, 2011; YASIN et al., 2014; SHAHIR et al., 2015b). Para o motor do presente estudo, tanto o BS10 quanto o BS500 não apresentaram diferença estatística entre os consumos específicos de combustível para as concentrações de 0% e 5% de etanol, obtendo comportamento dos resultados similar aos reportados por Lapuerta, Armas e García-Contreras (2009) e Cheenkachorn e Fungtammasan (2010) até a concentração de 5% de etanol. Após esta concentração, o comportamento ocorre como todos os demais autores, acontecendo o aumento do consumo específico com o acréscimo de etanol.

A Tabela 11 apresenta os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis e velocidade angular (rotações) do motor (C x R), para torque e os consumos horário e específico de combustível.

Tabela 11 – Resultados do teste de médias do desdobramento de combustíveis dentro de cada nível da velocidade angular do motor (rotação) no ensaio dinamométrico (C x R), para o torque, consumo horário e consumo específico de combustível

Comb.	Velocidade angular do motor (rpm)										
	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900
	----- Torque (N.m) -----										
BS10	561,1 <sup>b*</sup>	563,2 <sup>b</sup>	563,0 <sup>b</sup>	556,3 <sup>b</sup>	546,2 <sup>b</sup>	536,9 <sup>b</sup>	531,6 <sup>a</sup>	520,4 <sup>b</sup>	510,3 <sup>a</sup>	497,1 <sup>a</sup>	485,3 <sup>a</sup>
BS500	563,9 <sup>a</sup>	565,4 <sup>a</sup>	566,1 <sup>a</sup>	559,5 <sup>a</sup>	548,4 <sup>a</sup>	539,1 <sup>a</sup>	532,9 <sup>a</sup>	522,9 <sup>a</sup>	511,8 <sup>a</sup>	498,8 <sup>a</sup>	484,4 <sup>a</sup>
Dif (%)	0,50%	0,39%	0,55%	0,57%	0,40%	0,41%	0,24%	0,48%	0,29%	0,34%	-0,19%
	----- Consumo horário de combustível (L.h <sup>-1</sup> ) -----										
BS10	23,09 <sup>a</sup>	24,32 <sup>a</sup>	25,31 <sup>b</sup>	26,05 <sup>b</sup>	26,30 <sup>b</sup>	26,79 <sup>b</sup>	26,98 <sup>b</sup>	27,41 <sup>b</sup>	27,72 <sup>b</sup>	28,02 <sup>a</sup>	28,29 <sup>a</sup>
BS500	23,25 <sup>a</sup>	24,48 <sup>a</sup>	25,93 <sup>a</sup>	26,67 <sup>a</sup>	27,17 <sup>a</sup>	27,66 <sup>a</sup>	27,84 <sup>a</sup>	27,97 <sup>a</sup>	28,12 <sup>a</sup>	28,19 <sup>a</sup>	28,25 <sup>a</sup>
Dif (%)	0,69%	0,65%	2,39%	2,32%	3,20%	3,15%	3,09%	2,00%	1,42%	0,60%	-0,14%
	----- Consumo específico de combustível (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ) -----										
BS10	236,3 <sup>a</sup>	239,6 <sup>a</sup>	241,5 <sup>b</sup>	242,4 <sup>b</sup>	241,6 <sup>b</sup>	242,5 <sup>b</sup>	239,6 <sup>b</sup>	240,7 <sup>b</sup>	241,0 <sup>b</sup>	243,9 <sup>a</sup>	246,4 <sup>a</sup>
BS500	237,8 <sup>a</sup>	241,1 <sup>a</sup>	246,6 <sup>a</sup>	248,4 <sup>a</sup>	249,2 <sup>a</sup>	251,0 <sup>a</sup>	247,5 <sup>a</sup>	246,1 <sup>a</sup>	246,3 <sup>a</sup>	245,7 <sup>a</sup>	247,0 <sup>a</sup>
Dif (%)	0,63%	0,62%	2,07%	2,42%	3,05%	3,39%	3,19%	2,19%	2,15%	0,73%	0,24%

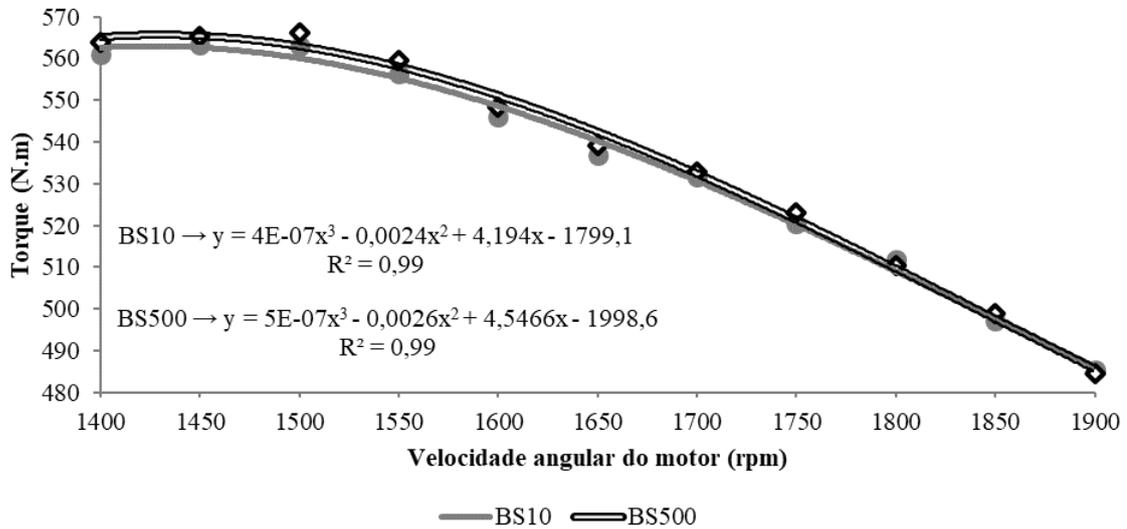
\*Médias seguidas pela mesma letra para cada variável analisada na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Os dados de potência não são apresentados, pois segundo a análise estatística, não houve interação para (C x R). Para o torque, o combustível BS500 apresentou resultados superiores ao BS10 em baixas rotações, de 1400 a 1650 rpm, com valor médio 0,47% superior. Para as altas rotações, de 1700 a 1900 rpm, ambos os combustíveis apresentaram valores que não diferiram estatisticamente, com exceção das 1750 rpm, onde o resultado de torque para o BS500 foi 0,48% superior ao BS10.

O maior valor de torque ocorreu para o BS500 na rotação de 1500 rpm do motor, com valor de 566,1 N.m, e os menores valores ocorreram nas 1900 rpm do motor, com valores de 485,3 N.m e 484,4 N.m que não diferiram estatisticamente, respectivamente para BS10 e BS500. É possível visualizar na Figura 35 as curvas da análise de regressão de torque para o BS10 e o BS500.

Figura 35 - Representação das curvas de regressão do torque no ensaio dinamométrico, das misturas de etanol com óleo Diesel BS10 e BS500 dentro de cada rotação analisada, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )

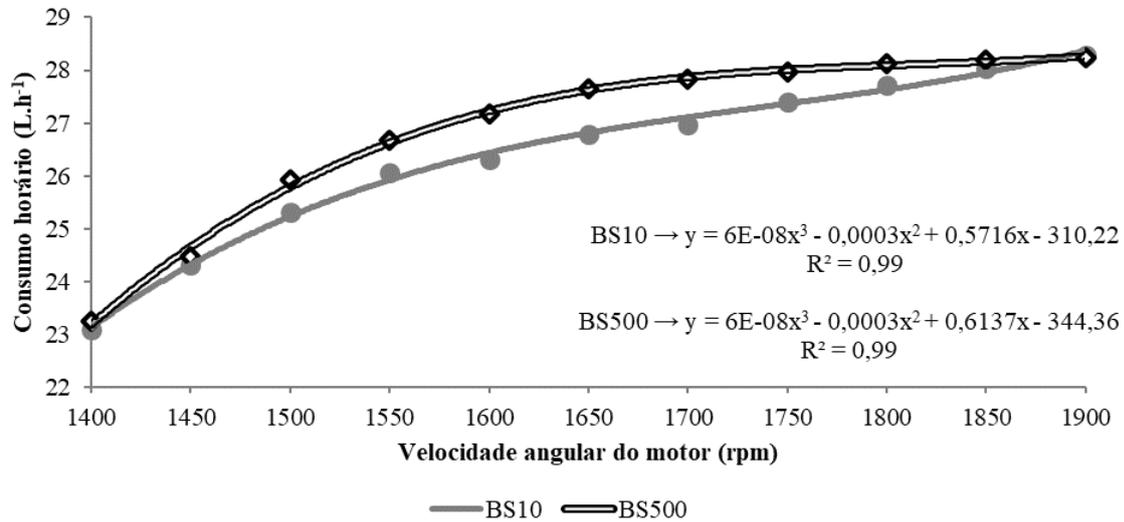


Fonte: Autor.

No consumo horário de combustível (Tabela 11), o combustível BS10 apresentou menor consumo na faixa de 1500 a 1800 rpm, com resultados médios 2,51% inferiores ao BS500. Para as rotações de 1400, 1450, 1850 e 1900 rpm, os valores não diferiram estatisticamente. Os menores valores de consumo horário ocorreram em 1400 rpm do motor, com valores que não diferiram estatisticamente, de 23,09 L.h<sup>-1</sup> para o BS10 e 23,25 L.h<sup>-1</sup> para o BS500. Os maiores valores ocorreram em 1900 rpm do motor, com valores que não diferiram estatisticamente de 28,29 L.h<sup>-1</sup> para o BS10 e 28,25 L.h<sup>-1</sup> para o BS500. Na Figura 36 estão representadas as curvas da análise de regressão de consumo horário para o BS10 e o BS500.

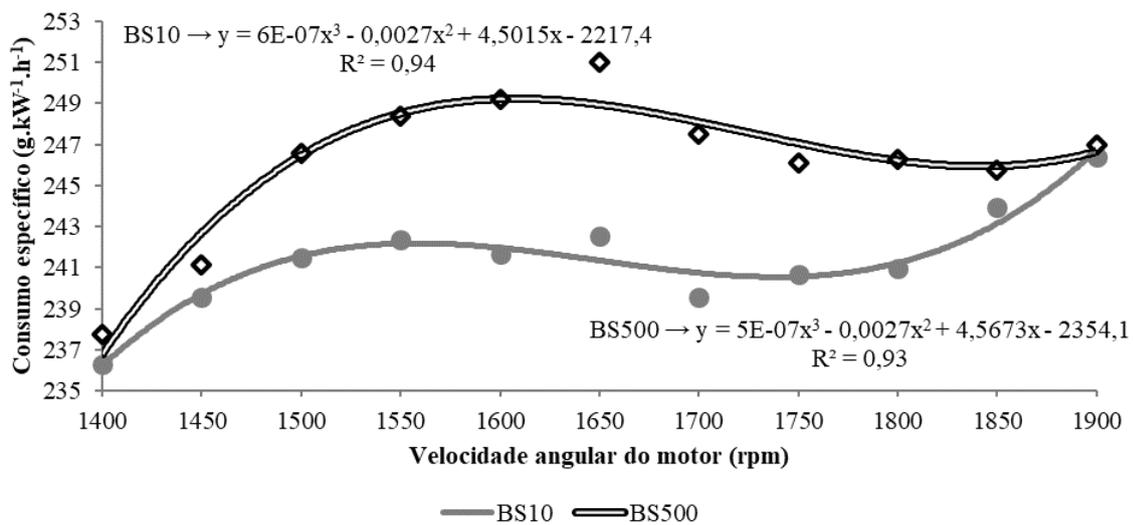
O consumo específico de combustível demonstrou resultado similar ao consumo horário (Tabela 11), com menor consumo do combustível BS10 na faixa de 1500 a 1800 rpm, com valores médios 2,64% inferiores ao BS500. Nas demais faixas, não houve diferença significativa. O maior consumo específico ocorreu em 1650 rpm com valor de 251,0 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>. Já os menores valores de consumo específico, que não diferiram estatisticamente, ocorreram nas 1400 rpm do motor, com valores de 236,3 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> para o BS10 e 237,8 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> para o BS500. É possível visualizar na Figura 37 as curvas da análise de regressão do consumo específico de combustível para o BS10 e o BS500.

Figura 36 - Representação das curvas de regressão do consumo horário de combustível no ensaio dinamométrico, das misturas de etanol com óleo Diesel BS10 e BS500 dentro de cada rotação analisada, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



Fonte: Autor.

Figura 37 - Representação das curvas de regressão do consumo específico de combustível no ensaio dinamométrico, das misturas de etanol com óleo Diesel BS10 e BS500 dentro de cada rotação analisada, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



Fonte: Autor.

Embora o combustível BS500 tenha apresentado melhor desempenho para a variável torque, em relação ao BS10, em baixas e médias velocidades angulares do motor, o maior consumo horário do BS500 impactou diretamente no consumo específico de combustível. Na faixa de rotações do motor entre 1500 a 1800 rpm, o incremento do torque para o BS500 não foi suficiente para compensar o maior consumo horário, tendo o BS10 apresentado melhor consumo específico em médias rotações do motor.

#### 4.3.2 Índice de elasticidade, reserva de torque e faixa de utilização

Os resultados analisados revelam diferença significativa apenas para a reserva de torque no fator de variação combustíveis. Os demais resultados de reserva de torque nas concentrações de etanol, e a interação combustíveis e concentrações de etanol (C x E), não tiveram diferença significativa. O mesmo ocorre para o índice de elasticidade e a faixa de utilização, que não apresentaram nenhuma diferença significativa em nenhum dos fatores de variação (Tabela 12).

Tabela 12 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de índice de elasticidade (IE), reserva de torque (RT) e faixa de utilização (FU) no ensaio dinamométrico, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), a interação (C x E), o coeficiente de variação (CV) e a média geral

Fatores de variação	Quadrados médios		
	IE	RT (%)	FU
Combustíveis (C)	0,002	28,753*	83,33
Concentrações de etanol (E)	0,002	3,389	1458,33
C x E	0,003	4,497	1958,33
CV (%)	4,98	17,25	13,79
Média geral	1,447	14,215	391,67

\* Efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Iacono (2017) relata que estes índices de parâmetros de desempenho do motor (reserva de torque, faixa de utilização e índice de elasticidade) são variáveis utilizadas para avaliar, especialmente, o comportamento de máquinas agrícolas, pois estas estão sujeitas a algumas barreiras e limitações para o desenvolvimento de trabalhos em campo, e essas variáveis podem auxiliar nas tomadas de decisões. Ainda, recomenda que nenhum comparativo seja feito com a literatura, pois essas variáveis estão diretamente relacionadas aos aspectos construtivos do motor do trator em estudo, e só devem ser comparadas com motores e tratores de características

semelhantes, operando com combustíveis semelhantes. A Tabela 13 apresenta o teste de médias para a reserva de torque (RT) do motor.

Tabela 13 - Reserva de torque (RT) nos combustíveis BS10 e BS500 nas diferentes concentrações de etanol

Combustíveis	Concentrações de etanol (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
	----- Reserva de torque (%) -----				
BS10	13,68 <sup>a*</sup>	12,42 <sup>a</sup>	13,90 <sup>a</sup>	13,82 <sup>a</sup>	12,36 <sup>b</sup>
BS500	13,54 <sup>a</sup>	14,31 <sup>a</sup>	14,76 <sup>a</sup>	16,68 <sup>a</sup>	16,68 <sup>a</sup>

\*Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

A única diferença estatística ocorreu nos combustíveis com 20% de etanol, onde o BS10 apresentou 12,36% e o BS500 16,68% de reserva de torque. Os maiores valores de reserva de torque ocorreram para os combustíveis BS500 com 15% e 20% de etanol, e os menores valores foram para os combustíveis BS10 com 5% e 20% de etanol, porém não houve diferença estatística entre esses valores em cada combustível em relação a concentração de etanol. Apesar de não apresentar diferença estatística, verifica-se um comportamento de aumento da reserva de torque quando do acréscimo das porcentagens de etanol nas misturas com óleo Diesel BS500, e manutenção dos valores com a utilização do óleo Diesel BS10, para os combustíveis do presente estudo.

Resultados semelhantes foram encontrados por Estrada et al. (2016a), que utilizando óleo Diesel BS500 em um motor turboalimentado e com injeção mecânica, encontraram um acréscimo de 23,55% da reserva de torque entre os combustíveis com concentrações entre 0% e 15% de etanol. Valor muito semelhante ao presente estudo, onde a diferença percentual foi de 23,19%, entre 0% e 15% de etanol em mistura com o óleo Diesel BS500.

#### 4.3.3 Considerações do desempenho do motor no ensaio dinamométrico

Dentre os combustíveis, apesar do BS10 apresentar melhor desempenho na concentração de 0% de etanol, foi o BS500 que apresentou melhor desempenho para torque e potência utilizando etanol. Já para os consumos horário e específico, o BS10 apresentou melhor

desempenho em todas as concentrações de etanol, com exceção de ambos os combustíveis sem etanol, em que apresentaram o mesmo desempenho.

Ambos os combustíveis apresentaram o comportamento de decréscimo do torque e potência, e acréscimo dos consumos horário e específico com o aumento das concentrações de etanol. As exceções ficam para o combustível BS500 com 5% de etanol para os resultados de torque e potência, onde apresentou valores superiores ao BS500 puro, para o BS10 na concentração de 5% de etanol no resultado do consumo horário de combustível, onde apresentou menores valores que o BS10 puro, e para o consumo específico de combustível do BS10 e BS500 nas concentrações de 0% e 5% de etanol, onde não apresentaram diferença estatística de desempenho.

O combustível BS500 apresenta melhor desempenho de torque em baixas velocidades angulares do motor. Para os consumos horário e específico de combustível, o BS10 apresenta menor consumo entre 1500 a 1800 rpm, não diferindo nas demais faixas para o BS500.

Dentre os parâmetros de desempenho do motor, somente a reserva de torque entre os combustíveis BS10 e BS500 houve diferença significativa. A diferença ocorreu nos combustíveis com 20% de etanol, onde o BS500 apresentou um resultado de reserva de torque 25,90% superior ao BS10. Quanto ao comportamento dos valores, embora não tenha ocorrido diferença estatística dentro de cada combustível, o BS10 tende a manter os valores de reserva de torque com o aumento da quantidade de etanol, e o BS500 em aumentar os valores.

#### 4.4 DESEMPENHO MÁXIMO DO MOTOR NO ENSAIO DINAMOMÉTRICO

Para o desempenho máximo do motor no ensaio dinamométrico, os resultados encontrados revelam interação significativa entre os diferentes combustíveis e as concentrações de etanol (C x E), nas variáveis torque máximo e potência máxima (Tabela 14). Houve diferença significativa para o fator de variação combustíveis (C), para o torque máximo e o consumo específico mínimo. Também, para as concentrações de etanol (E), houve diferença significativa para os valores de torque máximo, potência máxima e consumo específico mínimo. Nos demais fatores de variação não houve diferença significativa.

Tabela 14 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de torque máximo, potência máxima, consumo horário ótimo de combustível e consumo específico mínimo de combustível, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), a interação C x E, o erro, o coeficiente de variação (CV) e a média geral

Fatores de variação	Quadrados médios			
	Torque máximo (N.m)	Potência máxima (kW)	Cons. horário ótimo (L.h <sup>-1</sup> )	Cons. específico mínimo (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )
Combustíveis (C)	55,43*	0,015	0,57	130,21*
Concentrações de etanol (E)	381,85*	14,61*	3,36	144,88*
C x E	21,85*	2,32*	0,38	1,74
CV	0,33	0,76	7,21	1,61
Média geral	565,41	96,70	24,18	234,58

\*Efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Na Tabela 15 estão representados os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis e concentrações de etanol (C x E). Para o torque máximo, o combustível BS500 apresentou resultados 1,40%, 0,62% e 0,71% superiores ao BS10 nas misturas com 5%, 10% e 15% de etanol, respectivamente. Para os combustíveis sem a adição de etanol (0%), e na concentração de 20% de etanol, não houve diferença significativa entre ambos os combustíveis.

Tabela 15 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis dentro de cada concentração de etanol (C x E) no ensaio dinamométrico, para o torque máximo e potência máxima

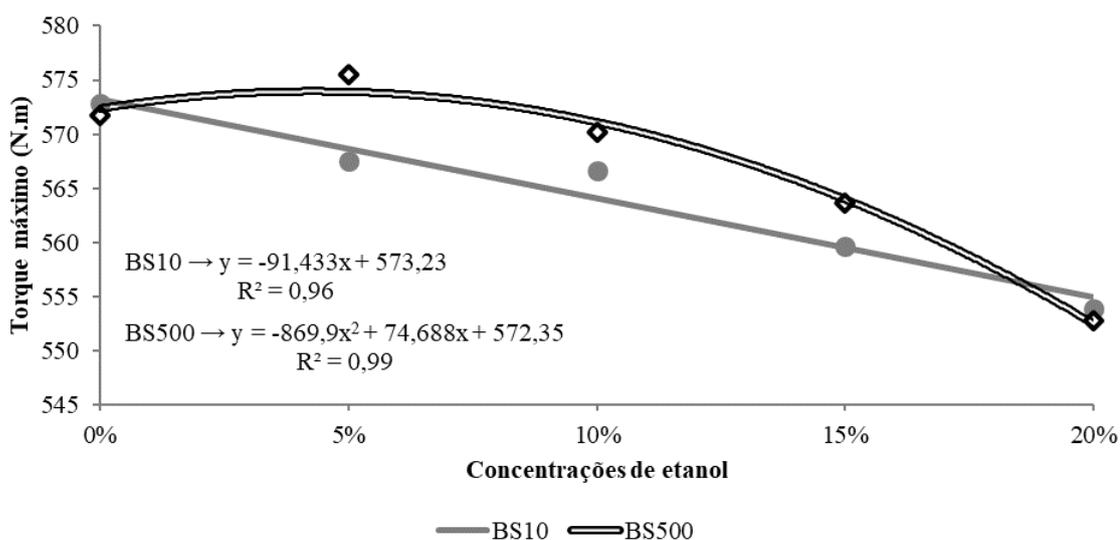
Combustíveis	Concentrações de etanol				
	0%	5%	10%	15%	20%
	----- Torque máximo (N.m) -----				
BS10	572,79 <sup>aA*</sup>	567,49 <sup>bB</sup>	566,62 <sup>bB</sup>	559,66 <sup>bC</sup>	553,70 <sup>aD</sup>
BS500	571,69 <sup>aAB</sup>	575,55 <sup>aA</sup>	570,15 <sup>aB</sup>	563,64 <sup>aC</sup>	552,82 <sup>aD</sup>
Diferença (%)	-0,19%	1,40%	0,62%	0,71%	-0,16%
	----- Potência máxima (kW) -----				
BS10	99,32 <sup>aA</sup>	96,98 <sup>bBC</sup>	97,29 <sup>aB</sup>	95,44 <sup>aCD</sup>	94,56 <sup>aD</sup>
BS500	97,36 <sup>bAB</sup>	98,36 <sup>aA</sup>	97,17 <sup>aAB</sup>	96,09 <sup>aBC</sup>	94,39 <sup>aD</sup>
Diferença (%)	-2,01%	1,40%	-0,12%	0,68%	-0,18%

\*Médias seguidas pela mesma letra para cada variável analisada na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Na análise dos valores de torque máximo entre as concentrações de etanol (Tabela 15), o combustível BS10 apresentou diferença significativa entre os resultados, com o maior valor de torque máximo (572,79 N.m) para o combustível sem a adição de etanol (puro). O segundo maior valor ocorreu para a mistura com 5% de etanol, não havendo diferença significativa para 10% de etanol. O menor desempenho de torque máximo ocorreu na concentração de 20% de etanol, com valor de 553,70 N.m. Na Figura 38 é possível visualizar que a curva de regressão do torque máximo para o BS10 resultou em decréscimo do desempenho com a adição de etanol. As diferenças percentuais para o torque máximo, das concentrações de etanol em relação ao BS10 puro, em ordem decrescente foram -0,93%, -1,08%, -2,29% e -3,33%, respectivamente para 5%, 10%, 15% e 20% de etanol.

Figura 38 – Representação das curvas de regressão do torque máximo no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



Fonte: Autor.

Já para o combustível BS500, houve diferença significativa entre as variáveis (Tabela 15), sendo que a mistura com 5% de etanol apresentou o maior valor entre todos os resultados de torque máximo (575,55 N.m), não diferindo estatisticamente do BS10 puro. A mistura com 10% de etanol não diferiu estatisticamente do combustível BS10 puro, e o menor desempenho ocorreu para a concentração de 20% de etanol, apresentando valor de 552,82 N.m. A curva de regressão (Figura 38) teve o comportamento de aumento do torque máximo da concentração de etanol de 0% a 5%, e após decréscimo com a adição de etanol até os 20%. As diferenças

percentuais para o torque máximo, das concentrações de etanol em relação ao BS500 puro, foram 0,68%, -0,27%, -1,41% e -3,30%, em ordem decrescente respectivamente para 5%, 10%, 15% e 20% de etanol.

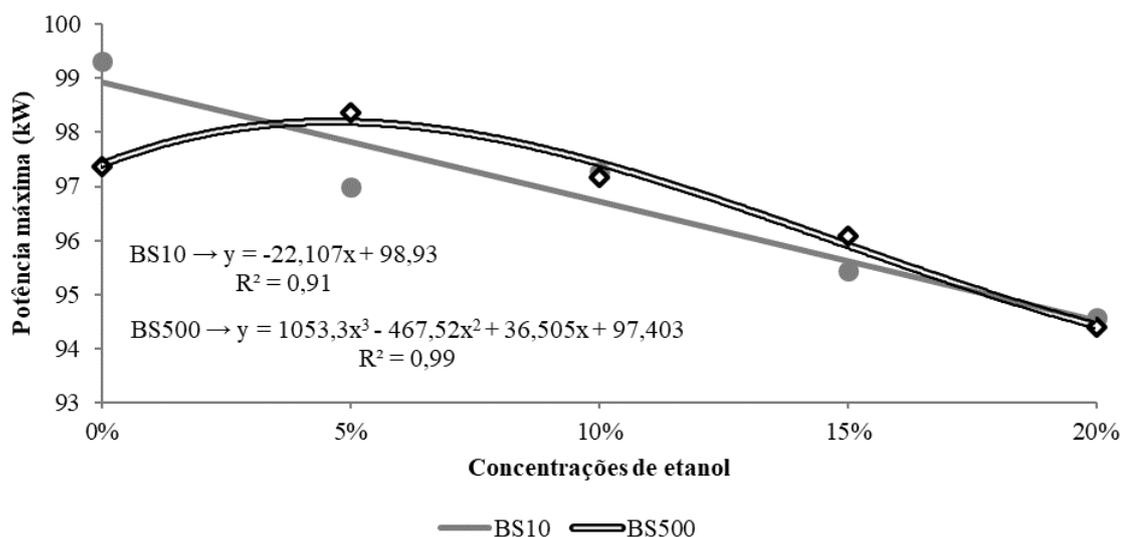
Como relatado nos resultados médios do torque no ensaio dinamométrico, o comportamento de diminuição do torque com o incremento das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel foi encontrado por diversos autores da bibliografia. Estrada et al. (2016a) trabalhando em um motor com sistema de injeção mecânico, encontrou redução de torque máximo na ordem de 0,56%, 0,84%, 2,99%, 1,96% e 5,23%, respectivamente para as concentrações de 3%, 6%, 9%, 12% e 15% de etanol hidratado em relação ao BS500 puro (com 5% de biodiesel). Nota-se que os valores são bem superiores aos do presente estudo, onde a redução do torque máximo na concentração de 15% de etanol anidro foi de apenas 1,41%.

Os resultados de potência máxima no ensaio dinamométrico (Tabela 15) demonstram que o teste de médias teve comportamento distinto dos resultados de torque máximo. O combustível BS10 apresentou resultado 2,01% superior de potência máxima em relação ao BS500 quando não houve a adição de etanol (0%). Já o BS500 apresentou resultado superior na mistura com 5% de etanol, com valor 1,40% superior ao BS10. Nas concentrações de 10%, 15% e 20% de etanol, não houve diferença significativa para ambos os combustíveis, sendo que na concentração de 20% de etanol ocorreram os menores valores de potência máxima (94,56 kW para o BS10 e 94,39 kW para o BS500).

Na análise dos valores de potência máxima entre as concentrações de etanol (Tabela 15), o combustível BS10 apresentou diferença significativa entre os resultados, com o maior valor de potência máxima para o combustível sem a adição de etanol (puro), com valor de 99,32 kW. O segundo maior valor ocorreu com 10% de etanol, não havendo diferença significativa para 5% de etanol. Também, a mistura de BS10 com concentração de 5% de etanol não diferiu estatisticamente para a mistura com 15% de etanol. O menor desempenho de potência máxima ocorreu na concentração de 20% de etanol.

Na Figura 39 é possível visualizar que a curva de regressão do BS10, para a potência máxima no ensaio dinamométrico, decresce linearmente com aumento da concentração de etanol na mistura. As diferenças percentuais da potência máxima, das concentrações de etanol em relação ao BS10 puro, em ordem decrescente foram -2,04%, -2,36%, -3,91% e -4,79%, respectivamente para 10%, 5%, 15% e 20% de etanol.

Figura 39 - Representação das curvas de regressão da potência máxima no ensaio dinamométrico, dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



Fonte: Autor.

Já para o combustível BS500, houve diferença significativa entre as variáveis (Tabela 15), sendo que a mistura com 5% de etanol apresentou o maior valor entre os resultados da potência máxima (98,36 kW). A mistura com 5% de etanol não diferiu das concentrações com 0% e 10% de etanol, sendo que essas duas últimas não diferiram da mistura com 15% de etanol. A curva de regressão (Figura 39) inicia com um menor valor em 0% de etanol, aumenta em 5%, e após os 10% os valores decrescem até os 20% de concentração de etanol, sendo esta última a concentração de etanol que apresentou o menor desempenho para potência máxima. As diferenças percentuais da potência máxima, das concentrações de etanol em relação ao BS500 puro, em ordem decrescente foram 1,03%, -0,20%, -1,30% e -3,05%, respectivamente para 5%, 10%, 15% e 20% de etanol.

O baixo número de cetano é uma característica crítica para o uso de altas concentrações de etanol misturado com óleo Diesel ou biodiesel, tendo como principal impacto negativo o aumento do atraso de ignição (HE et al., 2003).

O número de cetano do etanol, entre 5 e 15 (HANSEN et al., 2005), mesmo que compensado pelo maior número de cetano do biodiesel (de 48 a 65) (PARK et al., 2001; SAYIN, GUMUS e CANAKCI, 2013), associado ao menor poder calorífico destes combustíveis em relação ao óleo Diesel puro, são considerados como principais responsáveis

pela redução do desempenho do motor (HULWAN e JOSHI, 2011; FERREIRA, 2013; LABECKAS, SLAVINSKAS e MAŽEIKA, 2014).

Quando a combustão de misturas de D:B:E não é otimizada, para melhor recuperar a energia do combustível é necessário injetar o combustível mais cedo. Além disso, quanto maior o teor de etanol, menor a densidade e o poder calorífico do combustível e, conseqüentemente, maior o volume de combustível injetado. A menor viscosidade pode impactar no funcionamento da bomba injetora (mecânica) e justificar que o volume necessário não foi injetado. Conseqüentemente, é necessária uma adequação dos sistemas de injeção mecânica para atingir valores mais elevados de torque (PRADELLE et al., 2019).

Avaliando a potência máxima do motor, Estrada et al. (2016a) encontraram reduções de 3,32%, 3,74% e 7,53%, respectivamente para as concentrações de 9%, 12% e 15% de etanol hidratado, em relação ao óleo Diesel BS500 puro (com 5% de biodiesel). No presente estudo, as reduções dos valores de potência máxima nas concentrações de 10% e 15% de etanol anidro, em relação ao óleo Diesel BS10 puro (com 10% de biodiesel), foram de 2,04% e 3,91%, respectivamente. Para o BS500 não houve diferença estatística entre a concentração de 10% de etanol e o BS500 puro (com 10% de biodiesel), e para a concentração de 15%, a redução foi de 1,30%, sem diferença estatística da concentração de 10% de etanol anidro.

Os resultados do presente estudo demonstram que um sistema de injeção mais aprimorado, a utilização de maiores concentrações de biodiesel e a utilização de etanol anidro aditivado impacta em uma menor redução de torque máximo e potência máxima, em relação a utilização de baixas concentrações de biodiesel, etanol hidratado e sistemas de injeção com gerenciamento mecânico.

#### **4.4.1 Considerações do desempenho máximo do motor no ensaio dinamométrico**

Para o desempenho máximo do motor no ensaio dinamométrico, o combustível BS500 apresentou melhor desempenho de torque máximo nas concentrações de 5%, 10% e 15% de etanol, sendo nas demais concentrações o desempenho foi igual ao BS10. Para a potência máxima, somente nas concentrações de 0% e 5% de etanol houve diferença significativa, com melhor desempenho para o BS10 e BS500, respectivamente. Assim, é possível afirmar que em mistura com o etanol, o combustível BS500 apresenta melhor desempenho para torque máximo e potência máxima do que o BS10.

Quanto ao desempenho em relação as concentrações de etanol, os dois combustíveis apresentam diminuição do desempenho de torque máximo com o aumento das concentrações

de etanol. O comportamento do BS10 foi linear, de decréscimo dos valores com o incremento das concentrações de etanol, com exceção das concentrações de 5% e 10% de etanol, que apresentam o mesmo desempenho. Já o BS500 apresenta o mesmo desempenho de torque máximo, em relação ao BS500 puro, até a concentração de 10% de etanol, com decréscimo do desempenho após, com o aumento das concentrações de etanol.

Para a potência máxima, o comportamento do BS10 é de decréscimo dos valores com o aumento das concentrações de etanol, sendo que não houve diferença significativa entre a concentração de 5% de etanol para as concentrações de 10% e 15% de etanol. Já o BS500 até a concentração de 15% de etanol apresentou o mesmo desempenho de potência máxima que o BS500 puro.

#### 4.5 EMISSÕES DE GASES E MATERIAL PARTICULADO

A Tabela 16 apresenta os resultados da análise de variância para as emissões de gases e material particulado nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP). Houve diferença significativa entre todos os fatores de variação, sendo eles os combustíveis (C), concentrações de etanol (E) e modos de operação (M). As interações desses fatores também apresentaram efeito significativo, para combustíveis e concentrações de etanol (C x E), combustíveis e modos de operação (C x M), concentrações de etanol e modos de operação (E x M) e combustíveis, concentrações de etanol e modos de operação (C x E x M).

Tabela 16 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP) no ensaio de emissões nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), modos de operação (M), as interações (C x E), (C x M), (E x M) e (C x E x M), o coeficiente de variação (CV) e a média geral

Fatores de variação	Quadrados médios				
	CO (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	HC (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	HC + NO <sub>x</sub> (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	MP (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )
Combustíveis (C)	144,12*	3,59*	39,25*	19,10*	0,0003*
Concent. de etanol (E)	1548,25*	0,41*	107,42*	110,38*	0,0003*
Modos de operação (M)	4146,44*	0,54*	5852,75*	5961,68*	0,0001*
C x E	82,59*	0,09*	8,02*	6,91*	0,0003*
C x M	72,97*	0,44*	13,11*	14,14*	0,0001*
E x M	675,44*	0,04*	42,63*	43,93*	0,0001*
C x E x M	44,09*	0,02*	2,97*	2,78*	0,0001*
CV (%)	16,49	13,54	7,03	7,04	147,47
Média geral	1,85	0,05	4,48	4,53	0,0002

\* Efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Devido aos valores de MP serem próximos a zero, e estarem muito abaixo dos valores limites estabelecidos pelas normativas de emissões MAR-1 e Euro V, os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis, concentrações de etanol e modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (C x E x M) não será apresentado. No entanto, no capítulo 4.6.5 (página 168)

será apresentado e discutido o valor médio ponderado, segundo a norma NBR ISO 8178-4, das emissões de material particulado (VmpMP).

#### 4.5.1 Monóxido de carbono (CO)

A Tabela 17 apresenta os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis, concentrações de etanol e modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (C x E x M), para as emissões de monóxido de carbono (CO). O combustível BS10 obteve os maiores resultados de emissões de CO, em relação ao BS500, nos modos 1, 2, 3, 5 e 6 para 20% de concentração de etanol, no modo 4 para 10% e 20% de etanol, no modo 7 para 0% e 20% de etanol e no modo 8 para 0% e 10% de etanol.

Tabela 17 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de emissões de gases nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para o monóxido de carbono (CO)

Combustíveis	Modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4							
	1	2	3	4	5	6	7	8
----- 0% de etanol -----								
BS10	0,24 <sup>aC2*</sup>	0,17 <sup>aCD2</sup>	0,06 <sup>aD3</sup>	0,62 <sup>bB5</sup>	0,27 <sup>aC23</sup>	0,26 <sup>aC3</sup>	0,29 <sup>aC2</sup>	0,89 <sup>aA5</sup>
BS500	0,33 <sup>aC2</sup>	0,28 <sup>aCD2</sup>	0,16 <sup>aCD2</sup>	0,95 <sup>aA5</sup>	0,32 <sup>aC2</sup>	0,28 <sup>aCD3</sup>	0,13 <sup>bD4</sup>	0,60 <sup>bB5</sup>
----- 5% de etanol -----								
BS10	0,37 <sup>aC12</sup>	0,39 <sup>bC1</sup>	0,31 <sup>bC2</sup>	2,60 <sup>bA4</sup>	0,43 <sup>bC12</sup>	0,47 <sup>bC2</sup>	0,48 <sup>bC1</sup>	2,39 <sup>bB4</sup>
BS500	0,47 <sup>aD12</sup>	0,52 <sup>aCD1</sup>	0,47 <sup>aD1</sup>	2,87 <sup>aB4</sup>	0,59 <sup>aCD1</sup>	0,64 <sup>aCD1</sup>	0,67 <sup>aC2</sup>	3,82 <sup>aA4</sup>
----- 10% de etanol -----								
BS10	0,47 <sup>aC1</sup>	0,50 <sup>aC1</sup>	0,43 <sup>bC12</sup>	4,29 <sup>aB2</sup>	0,55 <sup>aC1</sup>	0,60 <sup>aC12</sup>	0,57 <sup>bC1</sup>	8,37 <sup>aA2</sup>
BS500	0,52 <sup>aD1</sup>	0,59 <sup>aCD1</sup>	0,56 <sup>aCD1</sup>	3,64 <sup>bB3</sup>	0,62 <sup>aCD1</sup>	0,69 <sup>aCD1</sup>	0,73 <sup>aC12</sup>	6,57 <sup>bA3</sup>
----- 15% de etanol -----								
BS10	0,25 <sup>aD2</sup>	0,16 <sup>bD2</sup>	0,46 <sup>bC12</sup>	3,96 <sup>bB3</sup>	0,23 <sup>bD3</sup>	0,22 <sup>bD3</sup>	0,09 <sup>bD3</sup>	5,58 <sup>bA3</sup>
BS500	0,56 <sup>aE1</sup>	0,65 <sup>aDE1</sup>	0,62 <sup>aDE1</sup>	5,87 <sup>aB2</sup>	0,67 <sup>aDE1</sup>	0,77 <sup>aCD1</sup>	0,85 <sup>aC1</sup>	11,88 <sup>aA2</sup>
----- 20% de etanol -----								
BS10	0,50 <sup>aC1</sup>	0,53 <sup>aC1</sup>	0,48 <sup>aC1</sup>	11,43 <sup>aB1</sup>	0,56 <sup>aC1</sup>	0,65 <sup>aC1</sup>	0,60 <sup>aC1</sup>	15,03 <sup>bA1</sup>
BS500	0,34 <sup>bCD2</sup>	0,34 <sup>bCD2</sup>	0,24 <sup>bD2</sup>	9,96 <sup>bB1</sup>	0,41 <sup>bCD2</sup>	0,45 <sup>bC2</sup>	0,35 <sup>bCD3</sup>	20,12 <sup>aA1</sup>

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna entre os combustíveis em cada concentração de etanol, maiúscula na linha e número na coluna entre concentrações de etanol no mesmo combustível não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Já o combustível BS500 apresentou maiores emissões de CO, em relação ao BS10, nos modos 2, 5 e 6 para 5% e 15% de etanol, nos modos 3 e 7 para 5%, 10% e 15% de etanol, no modo 4 para 0%, 5% e 15% de etanol e no modo 8 para 5%, 15% e 20% de etanol (Tabela 17).

Nos demais resultados, não houve diferença significativa entre os combustíveis para as emissões de CO nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4.

Para as emissões de CO entre os modos de operação, o combustível BS10 apresentou as maiores emissões no modo 8, com exceção da concentração de 5% de etanol, onde a maior emissão ocorreu no modo 4 (Tabela 17). Na sequência, o segundo maior valor de emissão para o BS10 ocorreu no modo 4, com exceção da concentração de 5% de etanol, onde ocorreu no modo 8. O BS10 puro apresentou a menor emissão de CO no modo 3, sem diferença estatística para o modo 2, sendo que os demais valores foram intermediários de emissões, e não diferiram do modo 2.

As concentrações de etanol de 5%, 10%, 15% e 20% no BS10 apresentaram o mesmo desempenho nos modos de operação 1, 2, 3, 5, 6 e 7, onde ocorreram as menores emissões de CO, sem diferir estatisticamente os valores (Tabela 17). A exceção é o modo 3 na concentração de 15% de etanol, onde houve diferença significativa e o valor foi superior aos anteriores para as emissões de CO.

Na análise das emissões de CO entre as concentrações de etanol em cada modo de operação, o BS10 apresentou as maiores emissões no modo 1 nas concentrações de 10% e 20% de etanol, sendo que os valores não diferiram estatisticamente (Tabela 17). Os menores valores de emissões ocorreram, sem diferença estatística, nas concentrações de 0% e 15%, e o resultado de emissões na concentração de 5% não diferiu estatisticamente de todos os valores de emissões do BS10 no modo 1.

No modo 2, as maiores emissões de CO para o BS10 ocorreram nas concentrações de 5%, 10% e 20% de etanol, sem diferença estatística entre os valores (Tabela 17). Já os menores valores de emissões de CO ocorreram no BS10 puro e com 15% de etanol, sem diferença estatística entre os valores. O modo 3 teve a menor emissão de CO no BS10 puro, e as maiores emissões no BS20, sem diferença estatística para as emissões de 10% e 15% de concentração de etanol.

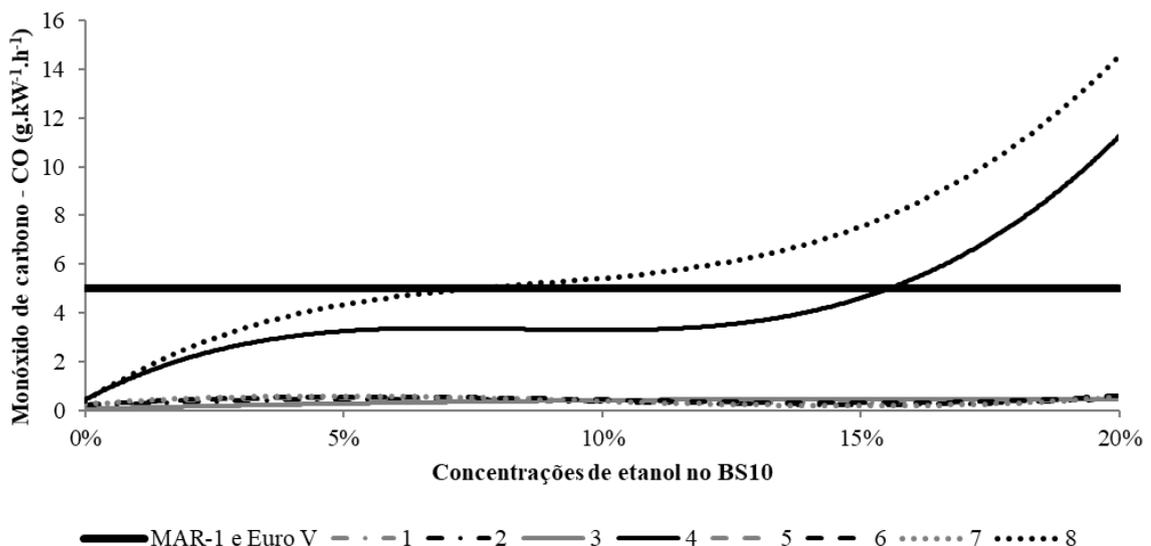
O modo 4 teve diferença estatística entre todos os valores, sendo que a menor emissão de CO ocorreu no BS10 puro, e a maior emissão na concentração de 20% de etanol (Tabela 17). O modo 5 obteve as maiores emissões de CO nas concentrações de 10% e 20% de etanol, sem diferença estatística entre os valores e para a emissão na concentração de 5% de etanol. A menor emissão de CO ocorreu na concentração de 15% de etanol, sendo que o valor não teve diferença estatística da emissão no BS10 puro.

Para o modo 6, as menores emissões de CO ocorreram no BS10 puro e na concentração de 15% de etanol, sem diferença estatística entre os valores (Tabela 17). A maior emissão

ocorreu na concentração de 20% de etanol, sendo que não houve diferença estatística para o valor da concentração de 10% de etanol. O modo 7 apresentou as maiores emissões nas concentrações de 5%, 10% e 20% de etanol, sem diferença estatística entre os valores. Já o menor valor de emissão ocorreu na concentração de 15% de etanol. O modo 8 apresentou o mesmo resultado do modo 4, com diferença estatística entre todos os valores. A menor emissão de CO ocorreu no BS10 puro, e a maior emissão na concentração de 20% de etanol, com resultado crescente de emissões de CO com o aumento da concentração de etanol.

Na Figura 40 estão representadas, para o combustível BS10, as curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (CO), e na Tabela 18 as equações e os coeficientes de determinação. É possível visualizar que somente os modos de operação 4 e 8 apresentaram valores de emissões acima do valor limite das normas MAR-1 e Euro V. Utilizando as equações de regressão, é possível estimar que o modo 4 passou o valor limite das normas na concentração de 15,53% de etanol, e o modo 8 na concentração de 7,48% de etanol.

Figura 40 - Representação das curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono (CO), das misturas de etanol com óleo Diesel BS10, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 e Euro V



Fonte: Autor.

Tabela 18 - Equações das curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono (CO), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4

Modo	Equações	$R^2$
1	$y = 332,03x^3 - 101,99x^2 + 8,3911x + 0,2262$	$R^2 = 0,71$
2	$y = 544,75x^3 - 167,97x^2 + 13,607x + 0,1479$	$R^2 = 0,74$
3	$y = -15,484x^2 + 5,0544x + 0,075$	$R^2 = 0,99$
4	$y = 5397,4x^3 - 1362,9x^2 + 110,75x + 0,4554$	$R^2 = 0,97$
5	$y = 460,24x^3 - 140,72x^2 + 11,198x + 0,2493$	$R^2 = 0,65$
6	$y = 597,73x^3 - 181,74x^2 + 14,378x + 0,2327$	$R^2 = 0,71$
7	$y = 723,21x^3 - 214,88x^2 + 15,576x + 0,262$	$R^2 = 0,67$
8	$y = 5166,4x^3 - 1345,7x^2 + 133,18x + 0,4052$	$R^2 = 0,87$

Fonte: Autor.

O combustível BS500 apresentou no modo 8 as maiores emissões de CO, com exceção do BS500 puro, onde o maior valor ocorreu no modo 4 (Tabela 17). O segundo maior valor de emissão ocorreu inversamente, para o BS500 puro no modo 8 e para as concentrações de 5%, 10%, 15% e 20% no modo 4. As menores emissões de CO para o BS500 puro ocorreu no modo de operação 7, sem diferença estatística para os valores dos modos 2, 3 e 6.

Para o BS500 na concentração de 5% de etanol, as menores emissões ocorreram nos modos 1 e 3, sem diferença estatística para os modos 2, 5, e 6 (Tabela 17). Para as concentrações de 10% e 15%, as menores emissões ocorreram no modo de operação 1, não havendo diferença estatística para as emissões dos modos 2, 3, 5 e 6 na concentração de 10% de etanol e 2, 3 e 5 para 15% de etanol. Para o BS500 com a concentração de 20% de etanol, a menor emissão ocorreu no modo 3, sem diferença estatística para os modos 1, 2, 5 e 7.

Na análise das emissões de CO entre as concentrações de etanol em cada modo de operação, o BS500 apresentou as maiores emissões no modo 1 nas concentrações de 10% e 15% de etanol, sendo que os valores não diferiram estatisticamente (Tabela 17). Os menores valores de emissões ocorreram, sem diferença estatística, nas concentrações de 0% e 20%, e o resultado de emissões na concentração de 5% não diferiu estatisticamente de todos os valores de emissões do BS10 no modo 1.

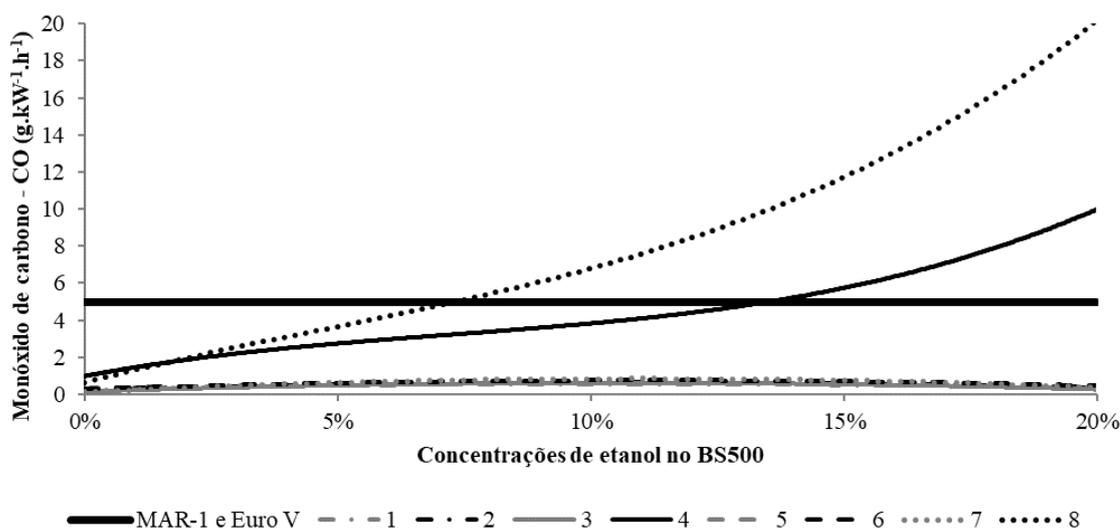
No modo 2, 3, 5 e 6 as maiores emissões de CO para o BS500 ocorreram nas concentrações de 5%, 10% e 15% de etanol, sem diferença estatística entre os valores (Tabela 17). Já os menores valores de emissões de CO ocorreram no BS500 puro e com 20% de etanol, sem diferença estatística entre os valores, com exceção do modo 6 com 20% de concentração

de etanol, que apresentou valor intermediário de emissão de CO e diferiu estatisticamente de todos os resultados do modo 6.

O modo 4 teve diferença estatística entre todos os valores, sendo que a menor emissão de CO ocorreu no BS500 puro, e a maior emissão na concentração de 20% de etanol (Tabela 17). O modo 7 apresentou as maiores emissões nas concentrações de 10% e 15% de etanol, sem diferença estatística entre os valores. Já o menor valor de emissão ocorreu no BS500 puro. O modo 8 apresentou o mesmo resultado do modo 4, com diferença estatística entre todos os valores. A menor emissão de CO ocorreu no BS500 puro, e a maior emissão na concentração de 20% de etanol, com resultado crescente de emissões de CO com o aumento da concentração de etanol.

Na Figura 41 estão representadas, para o combustível BS500, as curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (CO), e na Tabela 19 as equações e os coeficientes de determinação. É possível visualizar que somente os modos de operação 4 e 8 apresentaram valores de emissões acima do valor limite das normas MAR-1 e Euro V. Utilizando as equações de regressão, é possível estimar que o modo 4 passou o valor limite das normas na concentração de 13,52% de etanol, e o modo 8 na concentração de 7,32% de etanol, valores próximos aos que ocorreram para o BS10, 15,53% e 7,48% de concentração de etanol, respectivamente.

Figura 41 - Representação das curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono (CO), das misturas de etanol com óleo Diesel BS500, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 e Euro V



Fonte: Autor.

Tabela 19 - Equações das curvas de regressão das emissões de monóxido de carbono (CO), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4

Modo	Equações	$R^2$
1	$y = -21,005x^2 + 4,4328x + 0,3148$	0,89
2	$y = -31,623x^2 + 6,8474x + 0,2644$	0,93
3	$y = -40,475x^2 + 8,6745x + 0,1516$	0,94
4	$y = 2008,6x^3 - 436,51x^2 + 52,026x + 0,983$	0,99
5	$y = -29,679x^2 + 6,4182x + 0,3244$	0,93
6	$y = -37,98x^2 + 8,5045x + 0,284$	0,95
7	$y = -58x^2 + 12,854x + 0,1318$	0,94
8	$y = 2.267,85333x^3 - 319,56486x^2 + 70,79884x + 0,64221$	0,99

Fonte: Autor.

#### 4.5.2 Considerações das emissões de CO

Dentre os combustíveis, apenas nas concentrações de 5% e 15% de etanol, o BS500 apresentou maiores emissões em relação ao BS10, e na concentração de 20% de etanol, as maiores emissões ocorreram para o BS10. Nas demais concentrações, as diferenças entre os dois combustíveis ocorreram apenas em médias e baixas cargas (modos de operação 3, 4, 7 e 8).

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).

Contrariando o exposto por Moreira (2008), entre os modos de operação tanto o BS10 quanto o BS500 apresentaram as maiores emissões de CO em baixas cargas, e as menores em médias e altas cargas. O motor ciclo Diesel operando com D:B:E tem emissões de diferentes características de acordo com a carga do motor. Com motor em baixas (HULWAN e JOSHI, 2011) e médias cargas (PARK, YOUN e LEE, 2011; PARK et al. (2012), ocorre o aumento das emissões de CO.

Quando o EGR foi usado em cargas mais baixas, as emissões de CO foram maiores para os combustíveis oxigenados. Essas emissões foram reduzidas quando a carga foi aumentada, devido à maior temperatura de combustão, dando as condições corretas para que essas emissões oxidem prontamente e também diminuir o atraso de ignição (SHAMUN et al., 2018). No entanto, em uma alta carga do motor, as emissões de CO são bastante semelhantes, devido ao aumento do conteúdo de oxigênio (PARK et al., 2012)

Houve a tendência de aumento, com o incremento das concentrações de etanol, das emissões em todas as cargas (modos de operação) para ambos os combustíveis, BS10 e BS500. No entanto, para o BS10 na concentração de 15% de etanol e para o BS500 na concentração de 20% de etanol, as emissões de CO em altas cargas foram iguais aos combustíveis de referência (BS10 e BS500 com 0% de etanol).

### 4.5.3 Hidrocarbonetos (HC)

A Tabela 20 apresenta os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis, concentrações de etanol e modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (C x E x M), para as emissões de hidrocarbonetos (HC). O combustível BS10 obteve os maiores resultados de emissões de HC, em relação ao BS500, em todos os modos e concentrações de etanol, com exceção do modo 1 nas concentrações de 0% e 15% de etanol, onde não houve diferença estatística entre os valores.

Tabela 20 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de emissões de gases nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os hidrocarbonetos (HC)

Combustíveis	Modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4							
	1	2	3	4	5	6	7	8
----- 0% de etanol -----								
BS10	0,03 <sup>aB2*</sup>	0,02 <sup>bD2</sup>	0,02 <sup>bC2</sup>	0,06 <sup>bA2</sup>	0,03 <sup>bB2</sup>	0,03 <sup>bB2</sup>	0,02 <sup>bCD2</sup>	0,00 <sup>bE2</sup>
BS500	0,03 <sup>aF3</sup>	0,04 <sup>aE2</sup>	0,06 <sup>aC3</sup>	0,18 <sup>aA3</sup>	0,05 <sup>aD1</sup>	0,05 <sup>aD1</sup>	0,05 <sup>aD3</sup>	0,15 <sup>aB3</sup>
----- 5% de etanol -----								
BS10	0,00 <sup>bA4</sup>	0,00 <sup>bA4</sup>	0,00 <sup>bA5</sup>	0,00 <sup>bA3</sup>	0,00 <sup>bA4</sup>	0,00 <sup>bA4</sup>	0,00 <sup>bA3</sup>	0,00 <sup>bA2</sup>
BS500	0,03 <sup>aD3</sup>	0,03 <sup>aD3</sup>	0,03 <sup>aD4</sup>	0,09 <sup>aB5</sup>	0,04 <sup>aC2</sup>	0,04 <sup>aC2</sup>	0,04 <sup>aC4</sup>	0,11 <sup>aA4</sup>
----- 10% de etanol -----								
BS10	0,01 <sup>bA3</sup>	0,01 <sup>bA3</sup>	0,01 <sup>bA3</sup>	0,00 <sup>bB3</sup>	0,01 <sup>bA3</sup>	0,00 <sup>bB4</sup>	0,00 <sup>bB3</sup>	0,00 <sup>bB2</sup>
BS500	0,04 <sup>aF2</sup>	0,06 <sup>aD1</sup>	0,07 <sup>aC1</sup>	0,20 <sup>aB2</sup>	0,05 <sup>aE1</sup>	0,05 <sup>aE1</sup>	0,06 <sup>aD2</sup>	0,25 <sup>aA2</sup>
----- 15% de etanol -----								
BS10	0,05 <sup>aB1</sup>	0,05 <sup>bB1</sup>	0,05 <sup>bB1</sup>	0,16 <sup>bA1</sup>	0,04 <sup>bC1</sup>	0,04 <sup>bC1</sup>	0,04 <sup>bC1</sup>	0,03 <sup>bD1</sup>
BS500	0,05 <sup>aF1</sup>	0,05 <sup>aE1</sup>	0,06 <sup>aD2</sup>	0,22 <sup>aB1</sup>	0,05 <sup>aEF1</sup>	0,05 <sup>aEF1</sup>	0,07 <sup>aC1</sup>	0,27 <sup>aA1</sup>
----- 20% de etanol -----								
BS10	0,01 <sup>bA3</sup>	0,01 <sup>bA3</sup>	0,00 <sup>bB4</sup>	0,00 <sup>bB3</sup>	0,01 <sup>bA3</sup>	0,01 <sup>bA3</sup>	0,00 <sup>bB3</sup>	0,00 <sup>bB2</sup>
BS500	0,03 <sup>aD3</sup>	0,03 <sup>aD3</sup>	0,03 <sup>aD4</sup>	0,14 <sup>aA4</sup>	0,04 <sup>aC2</sup>	0,03 <sup>aD3</sup>	0,03 <sup>aD5</sup>	0,10 <sup>aB5</sup>

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna entre os combustíveis em cada concentração de etanol, maiúscula na linha e número na coluna entre concentrações de etanol no mesmo combustível não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Para as emissões de HC entre os modos de operação, o combustível BS10 puro apresentou o maior valor de emissão no modo 4, com valor de  $0,05 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  (Tabela 20). O segundo maior valor ocorreu nos modos 1, 5 e 6, que não apresentaram diferença estatística entre os valores. A menor emissão de HC para o BS10 puro ocorreu no modo 8, com valor próximo a zero. As emissões de HC no modo de operação 7 não diferiu estatisticamente dos modos 2 e 3. Para o combustível BS10 com a concentração de 5% de etanol, todos os valores foram próximos a zero para as emissões de HC, e não apresentaram diferença estatística entre os valores.

A concentração de 10% de etanol apresentou os maiores valores de emissões para a mistura com o BS10 nos modos 1, 2, 3 e 5, com emissões de HC de aproximados  $0,01 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  e sem diferença estatística entre os valores (Tabela 20). Já as menores emissões ocorreram nos modos 4, 6, 7 e 8, com valores de emissões de HC próximos a zero e sem diferença significativa entre os valores. A concentração de 15% de etanol no BS10 apresentou o maior valor de emissão de HC no modo 4, com valor de  $0,16 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , o maior de todas as emissões de HC para o BS10. Os modos de operação 1, 2 e 3 apresentaram o segundo maior valor na concentração de 15% de etanol, e sem diferença estatística. Os modos 5, 6 e 7 apresentaram valor intermediário para as emissões de HC, sem diferença estatística entre os valores. A menor emissão de HC ocorreu no modo 8, com o valor de  $0,03 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ .

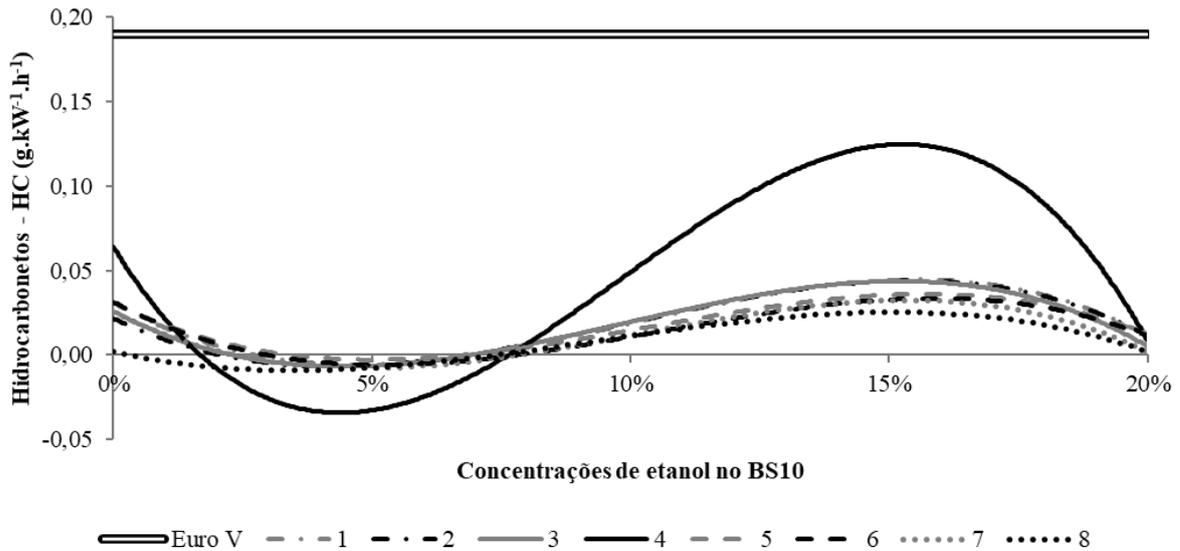
Já para a concentração de 20% de etanol no BS10, as maiores emissões ocorreram, sem diferença estatística, nos modos de operação 1, 2, 5 e 6, com valores aproximados de  $0,01 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  (Tabela 20). As menores emissões ocorreram nos modos de operação 3, 4, 7 e 8, sem diferença estatística e com valores de emissões próximo a zero.

Na análise das emissões de HC entre as concentrações de etanol em cada modo de operação, o BS10 apresentou as maiores emissões na concentração de 15% de etanol para todos os modos de operação (Tabela 20). O segundo maior valor de emissões ocorreu no BS10 puro, com exceção do modo 8. A menor emissão de HC ocorreu na concentração de 5% de etanol para os modos 1, 2 e 3, e nos modos 4, 6 e 7 o menor valor ocorreu nas concentrações de 5%, 10% e 20% de etanol, sem diferença estatística e com valores próximos a zero. No modo 8, os menores valores de emissões ocorreram nas concentrações de 0%, 5%, 10% e 20% de etanol, sem diferença estatística entre os valores.

Na Figura 42 estão representadas, para o combustível BS10, as curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (HC), e na Tabela 21 as equações e os coeficientes de determinação. Nenhum valor obtido, e nenhuma

curva de regressão foi superior ao limite estipulado de emissão de HC da norma Euro V, que é de  $0,19 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ .

Figura 42 - Representação das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos (HC), das misturas de etanol com óleo Diesel BS10, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valor limite estabelecido pela Euro V



Fonte: Autor.

Tabela 21 - Equações das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos (HC), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4

Modo	Equações	$R^2$
1	$y = -80x^3 + 24,286x^2 - 1,7571x + 0,0314$	0,91
2	$y = -73,333x^3 + 21,714x^2 - 1,4595x + 0,0216$	0,88
3	$y = -80,595x^3 + 23,76x^2 - 1,6327x + 0,0259$	0,89
4	$y = -246,67x^3 + 72,694x^2 - 4,9507x + 0,0639$	0,75
5	$y = -63,57x^3 + 19,76x^2 - 1,502x + 0,0308$	0,96
6	$y = -64,761x^3 + 20,479x^2 - 1,6054x + 0,0313$	0,87
7	$y = -69,047x^3 + 20,918x^2 - 1,5396x + 0,0255$	0,80
8	$y = -43,809x^3 + 12,204x^2 - 0,6884x + 0,0019$	0,71

Fonte: Autor.

Para as emissões de HC entre os modos de operação, o combustível BS500 puro apresentou a maior valor de emissão no modo 4, com valor de  $0,18 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  (Tabela 20). O segundo maior valor ocorreu no modo 8, e a menor emissão de HC para o BS500 puro ocorreu

no modo 1, com valor  $0,03 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . A emissão de HC no modo de operação 3 não diferiu estatisticamente do modo 7, e a emissão no modo 5 não diferiu do modo 6. Para o combustível BS500 com a concentração de 5% de etanol, a maior emissão de HC ocorreu no modo 8, com valor de  $0,10 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , e o segundo maior valor no modo 4. Os modos 5, 6, e 7 apresentaram valores intermediários de emissões e sem diferença estatística entre os valores, e os modos 1, 2 e 3 apresentaram, sem diferença significativa entre os valores, as menores emissões de HC, com valor de  $0,03 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ .

A concentração de 10% de etanol no BS500 apresentou a maior emissão de HC no modo 8, com valor de  $0,25 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , e o segundo maior valor no modo 4. (Tabela 20). Já a menor emissão ocorreu no modo 1, com valor de  $0,04 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . A concentração de 15% de etanol no BS500 apresentou o maior valor de emissão de HC no modo 8, com valor de  $0,27 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , o maior de todas as emissões de HC para o BS500. O menor valor de emissão de HC ocorreu no modo 1, com valor de  $0,05 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , não ocorrendo diferença estatística para os modos 5 e 6. Já o modo 2 não apresentou diferença estatística para os modos 5 e 6.

Já para a concentração de 20% de etanol no BS500, a maior emissão de HC ocorreu no modo de operação 4, com valor de  $0,14 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , e o segundo maior valor de emissões no modo 8 (Tabela 20). As menores emissões ocorreram nos modos de operação 1, 2, 3, 6 e 7, sem diferença estatística e com valor de aproximadamente  $0,03 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ .

Na análise das emissões de HC entre as concentrações de etanol em cada modo de operação, o BS500 apresentou no modo 1 a maior emissão na concentração de 15% de etanol, e a menor emissão, sem diferença significativa, ocorreu nas concentrações de 0%, 5% e 20% de etanol. (Tabela 20). No modo 2, os maiores valores de emissões de HC ocorreram, sem diferença significativa entre os valores, nas concentrações de 10% e 15% de etanol. Já a menor emissão ocorreu para o modo 2 nas concentrações de 5% e 20% de etanol.

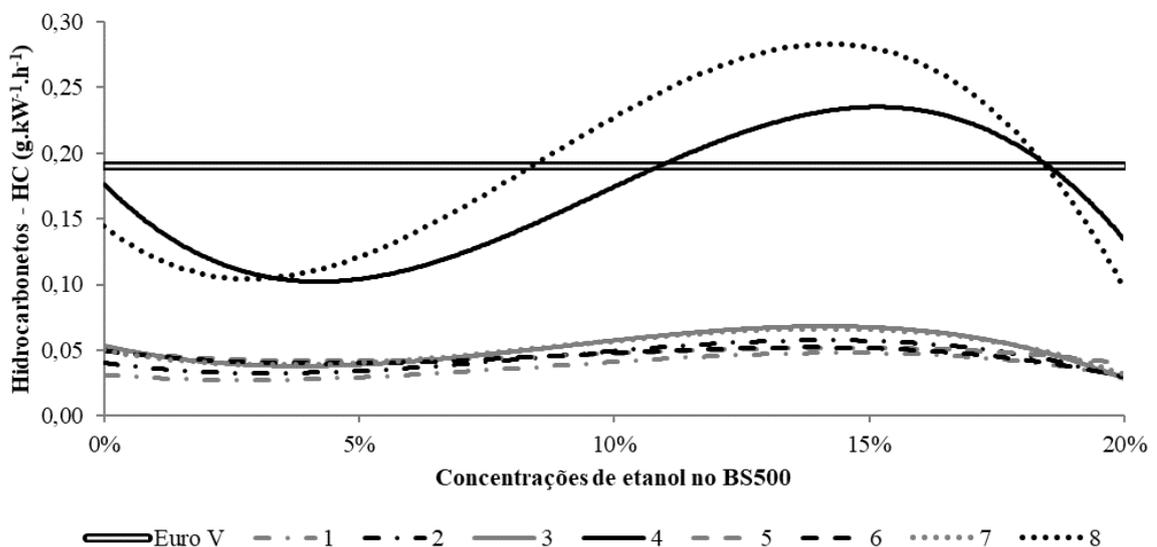
O modo 3 apresentou a maior emissão de HC na concentração de 10% de etanol, e o segundo maior valor na concentração de 15% de etanol (Tabela 20). Já a menor emissão de HC para o BS500 no modo 3 ocorreu nas concentrações de 5% e 20% de etanol, sem diferença significativa entre os valores. O modo de operação 4 teve a menor emissão de HC na concentração de 5% de etanol, e o segundo menor valor na concentração de 20% de etanol. Já a maior emissão de HC no modo 4 ocorreu na concentração de 15% de etanol, com valor de  $0,22 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , e a segunda maior emissão na concentração de 10% de etanol.

Os modos 5 e 6 apresentaram as maiores emissões de HC para o combustível BS500 nas concentrações de 0%, 10% e 15% de etanol, sem diferença estatística entre os valores. Já as menores emissões ocorreram nas concentrações de 5% e 20% de etanol para o modo 5, sem

diferença estatística entre os resultados, e em 20% para o modo 6. O modo 7 e 8 apresentaram a mesma sequência de resultados, com diferença significativa entre todos os valores. As maiores emissões de HC ocorreram na concentração de 15% de etanol, e o segundo maior valor de emissões na concentração de 10% de etanol. Já o menor valor de emissões ocorreu na concentração de 20% de etanol.

Na Figura 43 estão representadas, para o combustível BS500, as curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (HC), e na Tabela 22 as equações e os coeficientes de determinação. Apenas os modos de operação 4 e 8 obtiveram resultados superiores aos valores limites de emissões de HC da norma Euro V, que é de  $0,19 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . Utilizando as equações de regressão, é possível estimar que o modo 4 passou o valor limite Euro V na concentração de 10,87% de etanol, e retornou para um valor abaixo do limite após 18,52% de etanol. Já o modo 8 passou o limite da Euro V na concentração de 8,38% de etanol, e retornou para um valor abaixo após 18,45% de etanol.

Figura 43 -Representação das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos (HC), das misturas de etanol com óleo Diesel BS500, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valor limite estabelecido pela Euro V



Fonte: Autor.

Tabela 22 - Equações das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos (HC), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4

Modo	Equações	$R^2$
1	$y = -25,357x^3 + 6,556x^2 - 0,3014x + 0,0311$	0,99
2	$y = -38,095x^3 + 9,9593x^2 - 0,5252x + 0,0404$	0,87
3	$y = -54,999x^3 + 14,847x^2 - 0,8962x + 0,0535$	0,80
4	$y = -203,1x^3 + 59,021x^2 - 3,8928x + 0,1766$	0,87
5	$y = -20x^3 + 5,7143x^2 - 0,3929x + 0,0496$	0,89
6	$y = -28,572x^3 + 7,7553x^2 - 0,5082x + 0,0496$	0,95
7	$y = -46,547x^3 + 12,332x^2 - 0,6964x + 0,05$	0,94
8	$y = -244,29x^3 + 62,602x^2 - 2,9847x + 0,1442$	0,96

Fonte: Autor.

#### 4.5.4 Considerações das emissões de HC

As emissões de HC geralmente aumentam com o incremento de etanol nas misturas com óleo Diesel (LAPUERTA, ARMAS e GARCÍA-CONTRERAS, 2009; PARK, CHA e LEE, 2010; RANDAZZO e SODRÉ, 2011a; SHAMUN et al., 2018), podendo ocorrer em condições específicas, como baixas e médias cargas (PARK, YOUN e LEE, 2011; PARK et al., 2012). Já os autores Pang et al. (2006), Shi et al. (2006) e Barabás et al. (2010) encontraram a diminuição das emissões de HC com a utilização de etanol.

Dentre os combustíveis, as menores emissões de HC ocorreram para o BS10. No entanto, estes comportamentos lineares citados pela bibliografia de aumento ou diminuição das emissões de HC com o acréscimo de etanol não ocorreram no presente estudo, pois para as concentrações de 5%, 10% e 20% para o BS10 e 5% e 20% para o BS500, as emissões de HC tenderam a ser menores, e nas demais a serem maiores. O BS500 puro apresentou emissões inconclusivas de HC para altas cargas, e em médias e baixas cargas, os valores de emissões foram intermediários entre as concentrações de etanol.

O motor ciclo Diesel operando com misturas de D:B:E tem emissões de diferentes características de acordo com a carga do motor. Com o motor em baixas e médias cargas, ocorrem altas emissões HC. No entanto, em altas cargas do motor, as emissões de HC foram bastante semelhantes devido ao aumento do conteúdo de oxigênio (PARK, YOUN e LEE, 2011; PARK et al., 2012)

Dentre os modos de operação, o BS10 apresentou maiores emissões em médias e altas cargas (modos de operação 1, 2, 3, 5 e 6). Já o BS500 apresentou as maiores emissões em baixas e médias cargas (3, 4, 7 e 8), e menores emissões em altas cargas (modos de operação 1, 2, 5 e

6), em consonância com os resultados dos trabalhos de Park, Youn e Lee (2011) e Park et al. (2012).

Segundo os resultados do trabalho de Shamun et al. (2018), quando o EGR foi usado em cargas mais baixas, as emissões de HC foram maiores para os combustíveis oxigenados. Essas emissões foram reduzidas quando a carga foi aumentada, devido à maior temperatura de combustão, dando as condições corretas para que essas emissões oxidem prontamente e também para diminuir o atraso de ignição.

Apenas os modos de operação 4 e 8 para o combustível BS500 apresentaram emissões de HC superiores ao limite preconizado pela norma Euro V, que tem como valor limite  $0,19 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . Já para a MAR-1, nenhum dos combustíveis apresentaram emissões superiores ao somatório de HC+NO<sub>x</sub> que é de  $4 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . Estes resultados demonstram um comportamento de maiores emissões de HC para combustíveis com alto teor de enxofre em baixas cargas.

#### 4.5.5 Óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>)

A Tabela 23 apresenta os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis, concentrações de etanol e modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (C x E x M), para as emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). O combustível BS10 obteve diferença significativa e menores resultados de emissões de NO<sub>x</sub>, em relação ao BS500, apenas no modo 8, nas concentrações de 0%, 15% e 20% de etanol.

O combustível BS500 apresentou menores resultados de emissões de NO<sub>x</sub>, e diferença significativa em relação ao BS10, no modo 1 para as concentrações de 0% e 10% de etanol, no modo 2 para todas as concentrações exceto os 10% de etanol, e no modo 3 para as concentrações de 5%, 10% e 15% (Tabela 23). Também no modo 4 e 5 o BS500 apresentou menores valores para 0%, 5%, 10% e 20%, no modo 6 para as concentrações de 0%, 5% e 10%, no modo 7 para todas as concentrações e no modo 8 apenas para a concentração de 10% de etanol. Nos demais resultados, não houve diferença significativa entre os combustíveis para as emissões de NO<sub>x</sub> nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4.

Para as emissões de NO<sub>x</sub> entre os modos de operação, o combustível BS10 com concentrações de 0%, 5% e 15% de etanol apresentaram as maiores emissões nos modos 4 e 8, sem diferença estatística entre os valores, e o segundo maior valor no modo de operação 3 (Tabela 23). Já a menor emissão de NO<sub>x</sub> ocorreu nos modos 5 e 6, sem diferença estatística entre os valores.

Tabela 23 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de emissões de gases nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>)

Combustíveis	Modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4							
	1	2	3	4	5	6	7	8
----- 0% de etanol -----								
BS10	2,70 <sup>aD1*</sup>	2,68 <sup>aD12</sup>	3,40 <sup>aB2</sup>	7,54 <sup>aA4</sup>	2,46 <sup>aE1</sup>	2,35 <sup>aE1</sup>	3,09 <sup>aC12</sup>	7,63 <sup>bA5</sup>
BS500	2,54 <sup>bD2</sup>	2,50 <sup>bD2</sup>	3,30 <sup>aC2</sup>	7,13 <sup>bB5</sup>	2,27 <sup>bE1</sup>	2,17 <sup>bE1</sup>	2,62 <sup>bD1</sup>	8,27 <sup>aA4</sup>
----- 5% de etanol -----								
BS10	2,79 <sup>aD1</sup>	2,79 <sup>aD12</sup>	3,61 <sup>aB1</sup>	9,46 <sup>aA3</sup>	2,54 <sup>aE1</sup>	2,48 <sup>aE1</sup>	3,10 <sup>aC1</sup>	9,63 <sup>aA4</sup>
BS500	2,71 <sup>aD1</sup>	2,63 <sup>bD12</sup>	3,44 <sup>bC12</sup>	8,12 <sup>bB4</sup>	2,27 <sup>bE1</sup>	2,22 <sup>bE1</sup>	2,65 <sup>bD1</sup>	9,62 <sup>aA3</sup>
----- 10% de etanol -----								
BS10	2,83 <sup>aE1</sup>	2,83 <sup>aE1</sup>	3,66 <sup>aC1</sup>	10,13 <sup>aB2</sup>	2,57 <sup>aE1</sup>	2,47 <sup>aE1</sup>	2,93 <sup>aE23</sup>	12,10 <sup>aA1</sup>
BS500	2,69 <sup>bD12</sup>	2,67 <sup>bD1</sup>	3,53 <sup>bC1</sup>	8,54 <sup>bB3</sup>	2,34 <sup>bE1</sup>	2,26 <sup>bE1</sup>	2,70 <sup>bD1</sup>	11,37 <sup>bA1</sup>
----- 15% de etanol -----								
BS10	2,82 <sup>aC1</sup>	2,82 <sup>aC1</sup>	3,68 <sup>aB1</sup>	10,46 <sup>aA1</sup>	2,41 <sup>aD1</sup>	2,38 <sup>aD1</sup>	2,78 <sup>aC3</sup>	10,39 <sup>bA2</sup>
BS500	2,74 <sup>aD1</sup>	2,69 <sup>bD1</sup>	3,52 <sup>bC1</sup>	10,56 <sup>aB1</sup>	2,35 <sup>aE1</sup>	2,28 <sup>aE1</sup>	2,65 <sup>bD1</sup>	11,06 <sup>aA2</sup>
----- 20% de etanol -----								
BS10	2,73 <sup>aE1</sup>	2,66 <sup>aEF2</sup>	3,54 <sup>aC12</sup>	10,43 <sup>aA1</sup>	2,51 <sup>aFG1</sup>	2,37 <sup>aG1</sup>	3,20 <sup>aD1</sup>	10,04 <sup>bB3</sup>
BS500	2,67 <sup>aD12</sup>	2,60 <sup>aD12</sup>	3,47 <sup>aC1</sup>	9,80 <sup>bB2</sup>	2,36 <sup>bE1</sup>	2,26 <sup>aE1</sup>	2,72 <sup>bD1</sup>	11,15 <sup>aA2</sup>

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna entre os combustíveis em cada concentração de etanol, maiúscula na linha e número na coluna entre concentrações de etanol no mesmo combustível não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autor.

A concentração de 10% de etanol apresentou o maior emissão para a mistura com o BS10 no modo 8, com resultado de 12,10 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>, sendo o maior valor entre todas as emissões NO<sub>x</sub> (Tabela 23). O segundo maior valor ocorreu no modo 4, e as menores emissões ocorreram nos modos 1, 2, 5, 6, e 7, sem diferença significativa entre os valores.

Já para a concentração de 20% de etanol no BS10, a maior emissão de NO<sub>x</sub> ocorreu no modo de operação 4, e o segundo maior valor no modo 8 (Tabela 23). A menor emissão ocorreu no modo de operação 6, sem diferença estatística para o modo 5. O modo 5 não apresentou diferença significativa de valor de emissões para os modos 2 e 6.

Na análise das emissões de NO<sub>x</sub> entre as concentrações de etanol em cada modo de operação, o BS10 não apresentou diferença significativa entre os valores nos modos 1, 5 e 6 (Tabela 23). O modo 2 apresentou os maiores valores de emissões de NO<sub>x</sub> nas concentrações de 10% e 15% de etanol, e a menor emissão ocorreu na concentração de 20% de etanol. O BS10 puro e a concentração de 5% de etanol não apresentaram diferença significativa de emissões de NO<sub>x</sub> para todos os resultados do modo 2. O modo 3 teve as maiores emissões nas concentrações de 5%, 10% e 15% de etanol no BS10, sem diferença significativa entre os valores. A menor

emissão ocorreu no BS10 puro, e a concentração de 20% de etanol não apresentou diferença significativa de emissões de  $\text{NO}_x$  para todos os resultados do modo 3.

O modo 4 teve as maiores emissões de  $\text{NO}_x$  nas concentrações de 15% e 20% de etanol no BS10, sem diferença significativa entre os valores (Tabela 23). O segundo maior valor ocorreu na concentração de 10% de etanol, e a menor emissão ocorreu na concentração de 0% de etanol. O modo 7 apresentou as maiores emissões nas concentrações de 5% e 20% de etanol, sem diferença significativa entre os valores. O segundo maior valor ocorreu na concentração de 0% de etanol e a menor emissão na concentração de 15% de etanol. O modo 8 apresentou diferença entre todas as concentrações, apresentando a maior emissão na concentração de 10% de etanol, a segunda maior emissão aos 15% de etanol e a terceira aos 20% de etanol. Já a menor emissão ocorreu no BS10 puro, seguido pela emissão nos 5% de concentração de etanol.

Na Figura 44 estão representadas, para o combustível BS10, as curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 ( $\text{NO}_x$ ), e na Tabela 24 as equações e os coeficientes de determinação. Apenas os modos de operação 4 e 8 apresentaram emissões de  $\text{NO}_x$  superior ao limite preconizado pela norma MAR-1, para o somatório de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio, que tem como valor limite  $4 \text{ g.kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . Em relação ao valor limite da norma Euro V, que é de  $0,4 \text{ g.kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , todos os modos de operação apresentaram emissões superiores.

Figura 44 – Representação das curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), das misturas de etanol com óleo Diesel BS10, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com os valores limites estabelecidos pela MAR-1 (HC +  $\text{NO}_x$ ) e Euro V

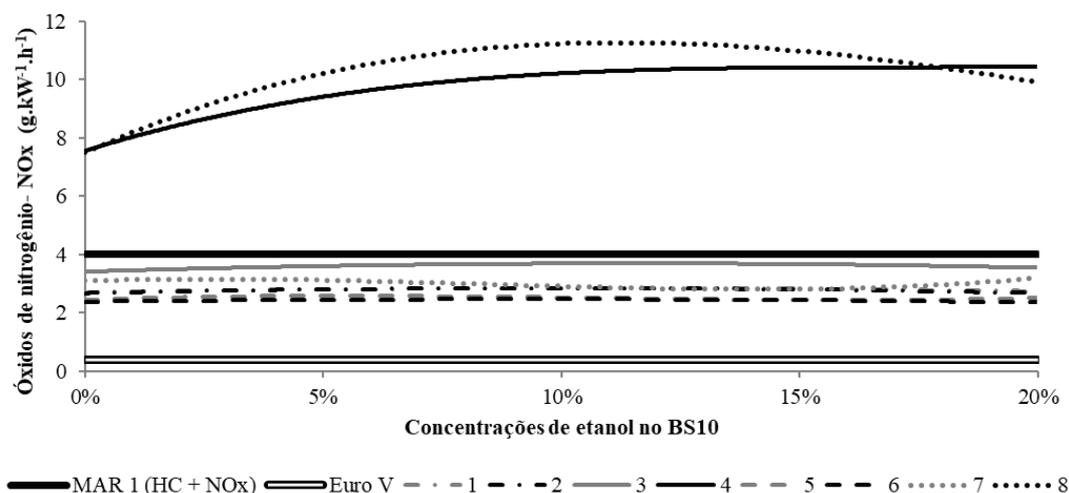


Tabela 24 - Equações das curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), juntamente com os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4

Modo	Equações	R <sup>2</sup>
1	$y = -11,816x^2 + 2,534x + 2,7007$	0,99
2	$y = -17,439x^2 + 3,4613x + 2,6689$	0,97
3	$y = -21,378x^2 + 4,9376x + 3,4051$	0,98
4	$y = 592,5x^3 - 298,62x^2 + 50,471x + 7,5534$	0,99
5	$y = 222,74x^3 - 71,643x^2 + 5,7449x + 2,4378$	0,74
6	$y = -9,9234x^2 + 1,8543x + 2,3737$	0,64
7	$y = 483,45x^3 - 121,61x^2 + 5,5199x + 3,0859$	0,99
8	$y = 591,19x^3 - 430,83x^2 + 74,584x + 7,4828$	0,86

Fonte: Autor.

Para as emissões de NO<sub>x</sub> entre os modos de operação, todas as concentrações de etanol em mistura ao BS500 apresentaram o mesmo resultado, com as maiores emissões nos modos 8, e o segundo maior valor de emissões no modo de operação 4 (Tabela 23). Os modos de operação 3 apresentaram valores intermediários de emissões, seguidos pelos modos 1, 2, 4 e 7 que não apresentaram diferença significativa entre os valores. Já as menores emissões de NO<sub>x</sub> ocorreram nos modos 5 e 6, sem diferença estatística entre os valores.

Na análise das emissões de NO<sub>x</sub> entre as concentrações de etanol em cada modo de operação, o BS500 não apresentou diferença significativa entre os valores nos modos 5, 6 e 7 (Tabela 23). O modo 1 apresentou os maiores valores de emissões de NO<sub>x</sub> nas concentrações de 5% e 15% de etanol, e a menor emissão ocorreu na concentração de 0% de etanol. As concentrações de 10% e 20% de etanol não apresentaram diferença significativa de emissões de NO<sub>x</sub> para todos os resultados do modo 1.

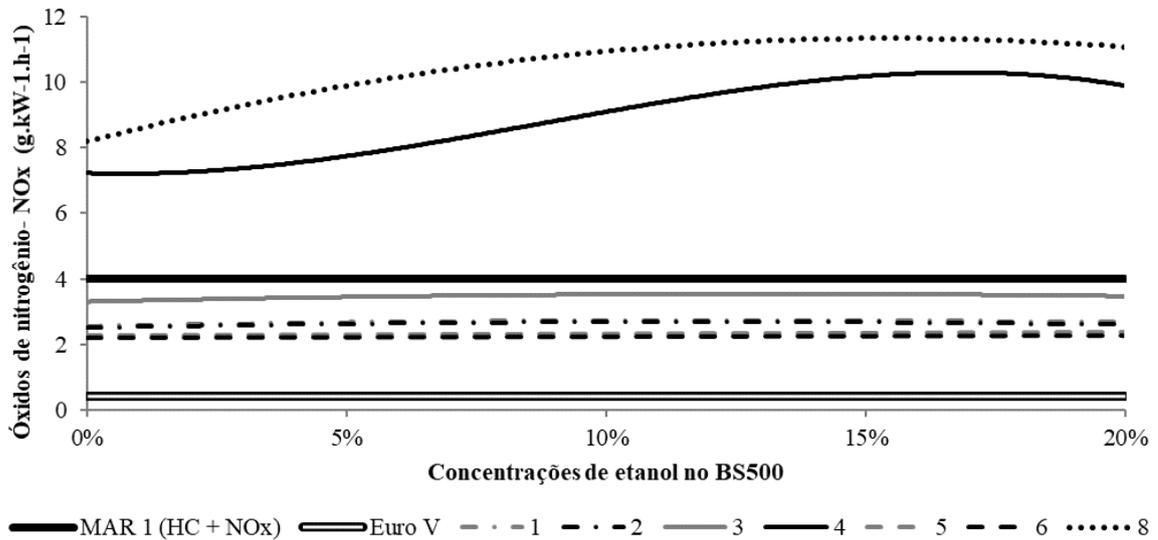
O modo 2 teve as maiores emissões de NO<sub>x</sub> nas concentrações de 10% e 15% de etanol no BS500, sem diferença significativa entre os valores (Tabela 23). A menor emissão ocorreu na concentração de 0% de etanol, e as concentrações de 5% e 20% de etanol não apresentaram diferença significativa de emissões de NO<sub>x</sub> para todos os resultados do modo 2. O modo 3 teve as maiores emissões nas concentrações de 10%, 15% e 20% de etanol no BS500, sem diferença significativa entre os valores. A menor emissão ocorreu na concentração de 0% de etanol, e a concentração de 5% de etanol não apresentou diferença significativa de emissões de NO<sub>x</sub> para todos os resultados do modo 3.

O modo 4 apresentou diferença entre todas as concentrações, apresentando a maior emissão de NO<sub>x</sub> na concentração de 15% de etanol, a segunda maior emissão aos 20% de etanol

e a terceira aos 10% de etanol (Tabela 23). Já a menor emissão ocorreu no BS500 puro, seguido pela emissão nos 5% de concentração de etanol. O modo de operação 8 apresentou a menor emissão na concentração de 0% de etanol, e a maior emissão ocorreu na concentração de 15% de etanol, e o segundo maior valor, sem diferença estatística entre os valores, ocorreu nas concentrações de 15% e 20% de etanol.

Na Figura 45 estão representadas, para o combustível BS500, as curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (NO<sub>x</sub>), e na Tabela 25 as equações e os coeficientes de determinação. O modo 7 não teve diferença significativa na análise de regressão. Apenas os modos de operação 4 e 8 apresentaram emissões de NO<sub>x</sub> superior ao limite preconizado pela norma MAR-1, para o somatório de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio, que tem como valor limite 4 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>. Em relação ao valor limite da norma Euro V, que é de 0,4 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>, todos os modos de operação apresentaram emissões superiores.

Figura 45 - Representação das curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), das misturas de etanol com óleo Diesel BS500, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 (HC + NO<sub>x</sub>) e Euro V



Fonte: Autor.

Tabela 25 - Equações das curvas de regressão das emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), juntamente com os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4

Modo	Equações	R <sup>2</sup>
1	$y = -11,107x^2 + 2,7825x + 2,5603$	0,86
2	$y = -12,934x^2 + 3,0671x + 2,5069$	0,98
3	$y = -13,622x^2 + 3,5773x + 3,3013$	0,99
4	$y = -1471,5x^3 + 387,64x^2 - 5,3129x + 7,2286$	0,92
5	$y = 0,5086x + 2,2671$	0,87
6	$y = 0,4657x + 2,1922$	0,78
7	não significativo	
8	$y = -130,98x^2 + 40,613x + 8,1968$	0,95

Fonte: Autor.

#### 4.5.6 Considerações das emissões de NO<sub>x</sub>

Dentre os combustíveis, as menores emissões de NO<sub>x</sub> ocorreram para o BS500 nas concentrações de 0%, 5% e 10% de etanol. Para os modos de operação o BS10 e o BS500 apresentaram o mesmo comportamento, com as menores emissões em altas cargas e baixas rotações (modos de operação 5 e 6), e altas cargas e altas rotações (modos de operação 1 e 2). Estes pontos são os que apresentaram menor consumo específico de combustível, permitindo fazer a relação de que quanto mais eficiente for a utilização do motor, menores serão as emissões de NO<sub>x</sub>.

Já as maiores emissões de NO<sub>x</sub> ocorreram em baixas cargas e altas rotações (modos de operação 3 e 4) e na marcha lenta. Estas maiores emissões podem ser explicadas pelo retardo no tempo de injeção de combustível, sendo este um fator importante na formação do NO<sub>x</sub> (GIAKOUMIS et al., 2013). Devido à baixa velocidade angular do motor, e a pequena geração de temperatura da combustão, o fator tempo de injeção foi o que mais impactou na geração de NO<sub>x</sub>.

No trabalho de Park, Youn e Lee (2011), o motor apresentou emissões com diferentes características de acordo com a carga do motor. Com motor em baixas cargas, ocorreu a redução das emissões de NO<sub>x</sub>, no entanto, para cargas elevadas do motor foi identificado pouca diferença para as emissões entre as misturas com etanol e o combustível de referência (ULSD).

No presente trabalho, para o BS10 dentre as concentrações de etanol, não houve diferenças para as emissões de NO<sub>x</sub> nos modos de operação 1 (potência máxima), 5 e 6 (torque máximo). Para o BS500 não houve diferenças nas emissões de NO<sub>x</sub> nos modos de operação 5, 6 e 7. Já nos demais modos de operação, ocorreu o oposto do trabalho de Park, Youn e Lee

(2011), sendo que para o BS10 ocorreram comportamento diversos, em alguns aumentando e em outros diminuindo as emissões de  $\text{NO}_x$ . Já para o BS500, o comportamento das emissões de  $\text{NO}_x$  foi de aumento com o incremento das concentrações de etanol.

Para ambos os combustíveis, as emissões de  $\text{NO}_x$  foram superiores ao limite preconizado pela norma Euro V, que tem como valor limite  $0,4 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . Já em relação aos limites da MAR-1, em ambos os combustíveis somente os modos 4 e 8 apresentaram emissões superiores ao somatório de  $\text{HC}+\text{NO}_x$  que é de  $4 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ .

#### **4.5.7 Hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + $\text{NO}_x$ )**

A norma MAR-1 estabelece que as quantidades totais dos gases HC e  $\text{NO}_x$  devem ser somadas, no intuito de comparar os valores com a legislação, enquadrando ou não nos limites impostos. Percebeu-se que a grande maioria dos gases são compostos exclusivamente  $\text{NO}_x$ , sendo que as normas de limites de emissões mais recentes, como a europeia Euro V, já separam os valores, tornando mais difícil a homologação de um motor.

A Tabela 26 apresenta os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis, concentrações de etanol e modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (C x E x M), para as emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC +  $\text{NO}_x$ ). O combustível BS10 obteve diferença significativa e menores resultados de emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$ , em relação ao BS500, no modo de operação 4, na concentração de 15% de etanol, e no modo 8, nas concentrações de 0%, 15% e 20% de etanol.

O combustível BS500 apresentou menores resultados de emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$ , e diferença significativa em relação ao BS10, no modo 1 para a concentração de 0% de etanol, no modo 2 para as concentrações de 0%, 5% e 15% de etanol, e no modo 3 para as concentrações de 5%, e 15% (Tabela 26). Também nos modos 4, 6 e 7 o BS500 apresentou menores valores de emissões, em relação ao BS10, para as concentrações de 0%, 5%, 10% e 20% de etanol, no modo 6 para as concentrações de 0%, 5% e 10%, e no modo 8 apenas para a concentração de 10% de etanol. Nos demais resultados, não houve diferença significativa entre os combustíveis para as emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$  nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4.

Para as emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$  entre os modos de operação, o combustível BS10 com concentrações de 0% e 5% de etanol apresentaram as maiores emissões nos modos 4 e 8, sem diferença estatística entre os valores, e o segundo maior valor no modo de operação 3 (Tabela 26). Já a menor emissão de  $\text{HC}+\text{NO}_x$  ocorreu nos modos 5 e 6, sem diferença estatística entre os valores.

Tabela 26 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de emissões de gases nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + NO<sub>x</sub>)

Combustíveis	Modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4							
	1	2	3	4	5	6	7	8
----- 0% de etanol -----								
BS10	2,73 <sup>aD1*</sup>	2,70 <sup>aD12</sup>	3,43 <sup>aB3</sup>	7,59 <sup>aA5</sup>	2,47 <sup>aE1</sup>	2,38 <sup>aE1</sup>	3,12 <sup>aC1</sup>	7,63 <sup>bA5</sup>
BS500	2,58 <sup>bD2</sup>	2,55 <sup>bD2</sup>	3,36 <sup>aC2</sup>	7,32 <sup>bB5</sup>	2,32 <sup>bE1</sup>	2,22 <sup>bE1</sup>	2,67 <sup>bD1</sup>	8,41 <sup>aA4</sup>
----- 5% de etanol -----								
BS10	2,79 <sup>aD1</sup>	2,79 <sup>aD12</sup>	3,61 <sup>aB12</sup>	9,46 <sup>aA4</sup>	2,54 <sup>aE1</sup>	2,48 <sup>aE1</sup>	3,10 <sup>aC1</sup>	9,63 <sup>aA4</sup>
BS500	2,74 <sup>aD12</sup>	2,67 <sup>bD12</sup>	3,48 <sup>bC12</sup>	8,21 <sup>bB4</sup>	2,31 <sup>bE1</sup>	2,26 <sup>bE1</sup>	2,69 <sup>bD1</sup>	9,72 <sup>aA3</sup>
----- 10% de etanol -----								
BS10	2,85 <sup>aD1</sup>	2,84 <sup>aD1</sup>	3,67 <sup>aC12</sup>	10,13 <sup>aB3</sup>	2,58 <sup>aE1</sup>	2,48 <sup>aE1</sup>	2,93 <sup>aD2</sup>	12,10 <sup>aA1</sup>
BS500	2,73 <sup>aD12</sup>	2,73 <sup>aD1</sup>	3,60 <sup>aC1</sup>	8,74 <sup>bB3</sup>	2,39 <sup>bE1</sup>	2,30 <sup>bE1</sup>	2,75 <sup>bD1</sup>	11,62 <sup>bA1</sup>
----- 15% de etanol -----								
BS10	2,74 <sup>aD1</sup>	2,86 <sup>aD1</sup>	3,73 <sup>aC1</sup>	10,61 <sup>bA1</sup>	2,44 <sup>aE1</sup>	2,41 <sup>aE1</sup>	2,82 <sup>aD2</sup>	10,61 <sup>bB2</sup>
BS500	2,79 <sup>aD1</sup>	2,74 <sup>bD1</sup>	3,58 <sup>bC1</sup>	10,78 <sup>aB1</sup>	2,40 <sup>aE1</sup>	2,33 <sup>aE1</sup>	2,71 <sup>aD1</sup>	11,32 <sup>aA2</sup>
----- 20% de etanol -----								
BS10	2,75 <sup>aE1</sup>	2,67 <sup>aEF2</sup>	3,54 <sup>aC23</sup>	10,43 <sup>aA2</sup>	2,52 <sup>aFG1</sup>	2,39 <sup>aG1</sup>	3,20 <sup>aD1</sup>	10,04 <sup>bB3</sup>
BS500	2,70 <sup>aD12</sup>	2,63 <sup>aD12</sup>	3,51 <sup>aC12</sup>	9,94 <sup>bB2</sup>	2,40 <sup>bE1</sup>	2,29 <sup>aE1</sup>	2,75 <sup>bD1</sup>	11,25 <sup>aA2</sup>

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna entre os combustíveis em cada concentração de etanol, maiúscula na linha e número na coluna entre concentrações de etanol no mesmo combustível não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autor.

A concentração de 10% de etanol apresentou o maior emissão para a mistura com o BS10 no modo 8, com resultado de 12,10 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>, sendo o maior valor entre todas as emissões HC+NO<sub>x</sub> (Tabela 26). O segundo maior valor ocorreu no modo 4, e as menores emissões ocorreram nos modos 5 e 6, sem diferença significativa entre os valores. Os modos 1, 2 e 7 apresentaram, sem diferença estatística entre os resultados, os segundos menores valores de emissões para HC+NO<sub>x</sub>.

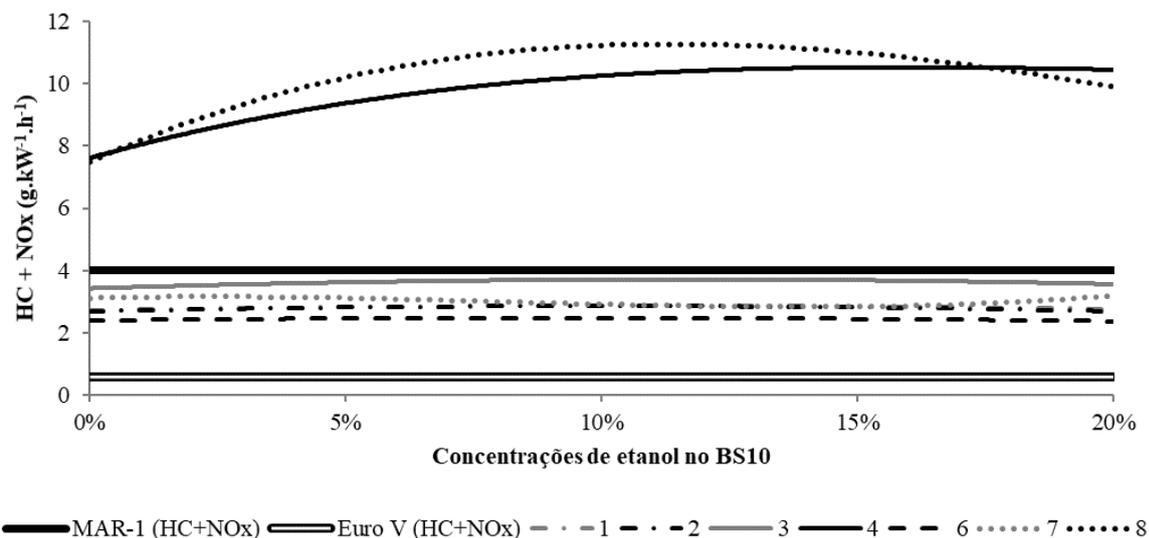
Já para a concentração de 15% de etanol no BS10, a maior emissão de HC+NO<sub>x</sub> ocorreu no modo de operação 4, e o segundo maior valor no modo 8 (Tabela 26). As menores emissões ocorreram nos modos de operação 5 e 6, sem diferença significativa entre os valores. Os modos 1, 2 e 7 apresentaram, sem diferença estatística entre os resultados, os segundos menores valores de emissões para HC+NO<sub>x</sub>. A concentração de 20% de etanol no BS10 apresentou a maior emissão de HC+NO<sub>x</sub> no modo de operação 4, e o segundo maior valor no modo 8. A menor emissão ocorreu no modo de operação 6, sem diferença estatística para o modo 5. O modo 5 não apresentou diferença significativa de valor de emissões para os modos 2 e 6.

Na análise das emissões de HC+NO<sub>x</sub> entre as concentrações de etanol em cada modo de operação, o BS10 não apresentou diferença significativa entre os valores nos modos 1, 5 e 6 (Tabela 26). O modo 2 apresentou os maiores valores de emissões de HC+NO<sub>x</sub> nas concentrações de 10% e 15% de etanol, e a menor emissão ocorreu na concentração de 20% de etanol. O BS10 puro e a concentração de 5% de etanol não apresentaram diferença significativa de emissões de HC+NO<sub>x</sub> para todos os resultados do modo 2. O modo 3 teve a maior emissão na concentração de 15% de etanol no BS10. As concentrações de 5% e 10% de etanol não apresentaram diferença significativa entre si e para 15% e 20% de concentração de etanol. O resultado em 20% de etanol não apresentou diferença significativa para o BS10 puro, que apresentou a menor emissão de HC+NO<sub>x</sub> no modo 3.

O modo 4 apresentou diferença entre todas as concentrações, apresentando a maior emissão na concentração de 15% de etanol, a segunda maior emissão aos 20% de etanol e a terceira aos 10% de etanol. Já a menor emissão ocorreu no BS10 puro, seguido pela emissão nos 5% de concentração de etanol (Tabela 26). O modo 7 apresentou as maiores emissões nas concentrações de 0%, 5% e 20% de etanol, sem diferença significativa entre os valores, e a menor emissão ocorreu nas concentrações de 10% e 15% de etanol. O modo 8 apresentou diferença entre todas as concentrações, apresentando a maior emissão na concentração de 10% de etanol, a segunda maior emissão aos 15% de etanol e a terceira aos 20% de etanol. Já a menor emissão ocorreu no BS10 puro, seguido pela emissão nos 5% de concentração de etanol.

Na Figura 46 estão representadas, para o combustível BS10, as curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (HC+NO<sub>x</sub>), e na Tabela 27 as equações e os coeficientes de determinação. O modo 5 não teve diferença significativa na análise de regressão. Apenas os modos de operação 4 e 8 apresentaram emissões de HC+NO<sub>x</sub> superiores ao limite preconizado pela norma MAR-1, que tem como valor limite 4 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>. Em relação aos valores limites da norma Euro V, que se somados resultam em 0,59 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> (0,19 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> para HC + 0,4 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> para NO<sub>x</sub>), todos os modos de operação apresentaram emissões superiores.

Figura 46 - Representação das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + NO<sub>x</sub>), das misturas de etanol com óleo Diesel BS10, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com os valores limites estabelecidos pela MAR-1 (HC + NO<sub>x</sub>) e Euro V (HC + NO<sub>x</sub>)



Fonte: Autor.

Tabela 27 - Equações das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + NO<sub>x</sub>), juntamente com os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4

Modo	Equações	R <sup>2</sup>
1	$y = -11,561x^2 + 2,5272x + 2,7184$	0,87
2	$y = -17,286x^2 + 3,4707x + 2,6824$	0,87
3	$y = -21,423x^2 + 4,9643x + 3,4213$	0,92
4	$y = 355,71x^3 - 229,07x^2 + 45,782x + 7,6116$	0,99
5	não significativo	
6	$y = -9,0816x^2 + 1,6785x + 2,3944$	0,83
7	$y = 423,81x^3 - 103,19x^2 + 4,0971x + 3,1126$	0,99
8	$y = 550,24x^3 - 419,42x^2 + 73,94x + 7,4845$	0,86

Fonte: Autor.

Para as emissões de HC+NO<sub>x</sub> entre os modos de operação, todas as concentrações de etanol em mistura ao BS500 apresentaram o mesmo resultado, com as maiores emissões nos modos 8, e o segundo maior valor de emissões no modo de operação 4 (Tabela 26). Os modos de operação 3 apresentaram valores intermediários de emissões, seguidos pelos modos 1, 2, 4

e 7 que não apresentaram diferença significativa entre os valores. Já as menores emissões de HC+NO<sub>x</sub> ocorreram nos modos 5 e 6, sem diferença estatística entre os valores.

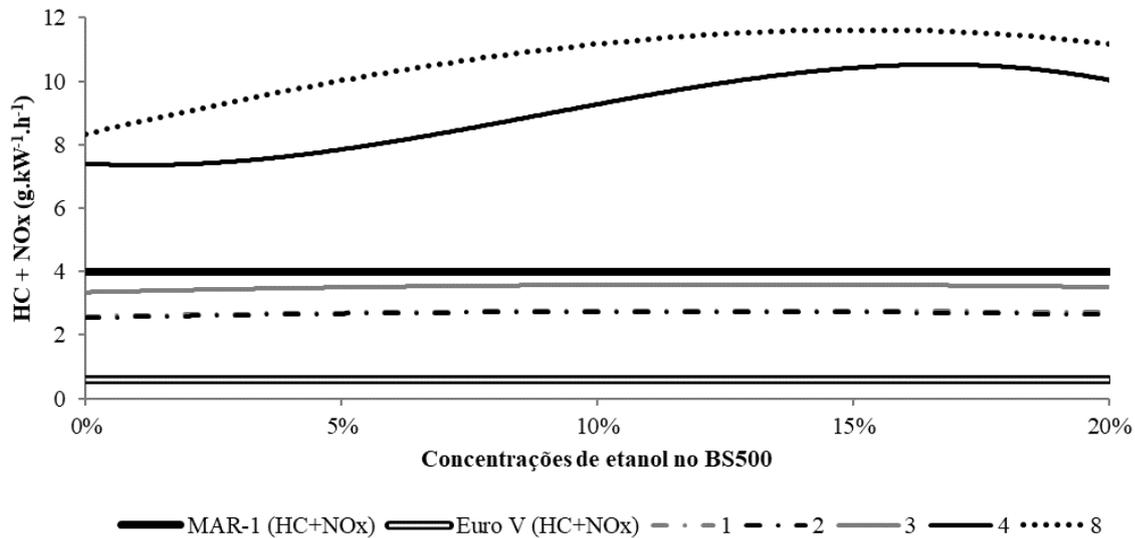
Na análise das emissões de HC+NO<sub>x</sub> entre as concentrações de etanol em cada modo de operação, o BS500 não apresentou diferença significativa entre os valores nos modos 5, 6 e 7 (Tabela 26). O modo 1 apresentou o maior valor de emissão de HC+NO<sub>x</sub> na concentração de 15% de etanol, e a menor emissão ocorreu na concentração de 0% de etanol. As concentrações de 5%, 10% e 20% de etanol não apresentaram diferença significativa de emissões de HC+NO<sub>x</sub> para todos os resultados do modo 1.

O modo 2 teve as maiores emissões de HC+NO<sub>x</sub> nas concentrações de 10% e 15% de etanol no BS500, sem diferença significativa entre os valores (Tabela 26). A menor emissão ocorreu na concentração de 0% de etanol, e as concentrações de 5% e 20% de etanol não apresentaram diferença significativa de emissões de HC+NO<sub>x</sub> para todos os resultados do modo 2. O modo 3 teve as maiores emissões nas concentrações de 10%, 15% de etanol no BS500, sem diferença significativa entre os valores. A menor emissão ocorreu na concentração de 0% de etanol, e as concentrações de 5% e 20% de etanol não apresentaram diferença significativa de emissões de HC+NO<sub>x</sub> para todos os resultados do modo 3.

O modo 4 apresentou diferença entre todas as concentrações, apresentando a maior emissão de HC+NO<sub>x</sub> na concentração de 15% de etanol, a segunda maior emissão aos 20% de etanol e a terceira aos 10% de etanol (Tabela 26). Já a menor emissão ocorreu no BS500 puro, seguido pela emissão nos 5% de concentração de etanol. O modo de operação 8 apresentou a menor emissão na concentração de 0% de etanol, e a maior emissão ocorreu na concentração de 15% de etanol, e o segundo maior valor, sem diferença estatística entre os valores, ocorreu nas concentrações de 15% e 20% de etanol.

Na Figura 47 estão representadas, para o combustível BS500, as curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (HC+NO<sub>x</sub>), e na Tabela 28 as equações e os coeficientes de determinação. Os modos 5, 6 e 7 não tiveram diferença significativa na análise de regressão. Apenas os modos de operação 4 e 8 apresentaram emissões de HC+NO<sub>x</sub> superiores ao limite preconizado pela norma MAR-1, que tem como valor limite 4 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>. Em relação aos valores limites da norma Euro V, que se somados resultam em 0,59 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> (0,19 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> para HC + 0,4 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> para NO<sub>x</sub>), todos os modos de operação apresentaram emissões superiores.

Figura 47 - Representação das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + NO<sub>x</sub>), das misturas de etanol com óleo Diesel BS500, nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4, em comparação com o valores limites estabelecidos pela MAR-1 (HC + NO<sub>x</sub>) e Euro V (HC + NO<sub>x</sub>)



Fonte: Autor.

Tabela 28 - Equações das curvas de regressão das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio (HC + NO<sub>x</sub>), juntamente com os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500 nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4

Modo	Equações	R <sup>2</sup>
1	$y = -12,138x^2 + 3,0279x + 2,5875$	0,90
2	$y = -14,464x^2 + 3,3903x + 2,5406$	0,98
3	$y = -15,173x^2 + 3,8426x + 3,3477$	0,97
4	$y = -1676,5x^3 + 447,24x^2 - 9,2523x + 7,4053$	0,93
5	não significativo	
6	não significativo	
7	não significativo	
8	$y = -241,79x^3 - 69,209x^2 + 37,711x + 8,3379$	0,95

Fonte: Autor.

#### 4.5.8 Considerações das emissões de HC + NO<sub>x</sub>

Devido aos resultados inferiores das emissões específicas de HC (g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>), o comportamento das emissões de HC+NO<sub>x</sub> foi diretamente influenciado pelas emissões de NO<sub>x</sub>.

Dentre os combustíveis, as menores emissões de  $\text{NO}_x$  ocorreram para o BS500 nas concentrações de 0%, 5% e 10% de etanol na maioria dos modos de operação.

Entre os modos de operação, BS10 e BS500 apresentaram o mesmo comportamento, com as menores emissões em altas cargas (modos de operação 1, 2, 5 e 6). Estes pontos são os que apresentaram menor consumo específico de combustível e emissões de  $\text{NO}_x$ , permitindo fazer a relação de que quanto mais eficiente for a utilização do motor, menores serão as emissões de  $\text{NO}_x$  e conseqüentemente de  $\text{HC}+\text{NO}_x$ . Já as maiores emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$  ocorreram em baixas cargas (modos de operação 4 e 8), seguido das emissões das médias cargas e altas rotações (modo de operação 3). As emissões em altas cargas para o BS500 não diferiram estatisticamente do modo 7 (médias cargas e baixas rotações).

No presente trabalho, como ocorrido para as emissões de  $\text{NO}_x$ , para o BS10 dentre as concentrações de etanol, não houve diferenças para as emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$  nos modos de operação 1 (potência máxima), 5 e 6 (torque máximo). Para o BS500 não houve diferenças nas emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$  nos modos de operação 5, 6 e 7. Já nos demais modos de operação, para o BS10 ocorreram comportamentos diversos, em alguns aumentando e em outros diminuindo as emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$ . Já para o BS500, o comportamento das emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$  foi de aumento com o incremento das concentrações de etanol.

Apenas os modos de operação 4 e 8, para ambos os combustíveis, apresentaram emissões de  $\text{HC}+\text{NO}_x$  superiores ao limite preconizado pela norma MAR-1, que tem como valor limite  $4 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . Em relação aos valores limites da norma Euro V, que se somados resultam em  $0,59 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  ( $0,19 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  para HC +  $0,4 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  para  $\text{NO}_x$ ), todos os modos de operação para ambos os combustíveis apresentaram emissões superiores.

#### 4.6 RESULTADOS DE EMISSÕES PONDERADOS COMPARADOS COM A MAR-1 E EURO V.

Os valores médios ponderados são utilizados para a efetiva comparação com os valores limites das normas de emissões, por exemplo para a homologação dos tratores. A norma ABNT NBR ISO 8178-4 estabelece ponderações dentre os modos de operação, com maior proporção para os pontos mais utilizados, por exemplo, em situações reais de trabalho no campo. Assim, as emissões médias se aproximam das condições reais de trabalho, e mesmo que em um dos modos de operação o trator não atinja aos limites de uma norma, no valor ponderado ele tem a possibilidade de atender.

A Tabela 29 apresenta os resultados da análise de variância para os valores médios ponderados de emissões de gases e material particulado nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para monóxido de carbono ( $V_{mpCO}$ ), hidrocarbonetos ( $V_{mpHC}$ ), óxidos de nitrogênio ( $V_{mpNO_x}$ ), hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio ( $V_{mp(HC + NO_x)}$ ) e material particulado ( $V_{mpMP}$ ). Houve diferença significativa entre todos os fatores de variação, sendo eles os combustíveis (C), concentrações de etanol (E) e a interação desses fatores (C x E).

Tabela 29 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os valores médios ponderados de monóxido de carbono ( $V_{mpCO}$ ), hidrocarbonetos ( $V_{mpHC}$ ), óxidos de nitrogênio ( $V_{mpNO_x}$ ), hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio ( $V_{mp(HC + NO_x)}$ ) e material particulado ( $V_{mpMP}$ ) no ensaio de emissões nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), a interação (C x E), o coeficiente de variação (CV) e a média geral

Fatores de variação	Quadrados médios				
	$V_{mpCO}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	$V_{mpHC}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	$V_{mpNO_x}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	$V_{mp(HC + NO_x)}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	$V_{mpMP}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )
Combustíveis (C)	23,23*	0,47*	3,21*	1,23*	0,002*
Conc.de etanol (E)	214,26*	0,05*	14,23*	14,63*	0,005*
C x E	11,89*	0,01*	0,98*	0,85*	0,005*
CV (%)	6,24	4,76	2,57	2,57	13,52
Média geral	1,91	0,05	4,54	4,58	0,051

\* Efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

A Tabela 30 apresenta os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis e concentrações de etanol (C x E), para os valores médios ponderados de emissões para

monóxido de carbono ( $V_{mpCO}$ ), hidrocarbonetos ( $V_{mpHC}$ ), óxidos de nitrogênio ( $V_{mpNO_x}$ ), hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio ( $V_{mp(HC + NO_x)}$ ) e material particulado ( $V_{mpMP}$ ).

Tabela 30 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis dentro de cada nível das concentrações de etanol, no ensaio de emissões nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os valores médios ponderados de monóxido de carbono ( $V_{mpCO}$ ), hidrocarbonetos ( $V_{mpHC}$ ), óxidos de nitrogênio ( $V_{mpNO_x}$ ), hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio ( $V_{mp(HC + NO_x)}$ ) e material particulado ( $V_{mpMP}$ )

Combustíveis	Concentrações de etanol				
	0%	5%	10%	15%	20%
----- $V_{mp CO}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ) -----					
BS10	0,35 <sup>aE*</sup>	0,92 <sup>bD</sup>	2,07 <sup>aB</sup>	1,42 <sup>bC</sup>	3,80 <sup>bA</sup>
BS500	0,37 <sup>aE</sup>	1,27 <sup>aD</sup>	1,80 <sup>bC</sup>	2,87 <sup>aB</sup>	4,27 <sup>aA</sup>
----- $V_{mp HC}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ) -----					
BS10	0,024 <sup>bB</sup>	0,0005 <sup>bD</sup>	0,0055 <sup>bC</sup>	0,053 <sup>bA</sup>	0,005 <sup>bC</sup>
BS500	0,075 <sup>aC</sup>	0,049 <sup>aE</sup>	0,097 <sup>aB</sup>	0,103 <sup>aA</sup>	0,053 <sup>aD</sup>
----- $V_{mp NO_x}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ) -----					
BS10	4,00 <sup>aE</sup>	4,58 <sup>aD</sup>	5,02 <sup>aA</sup>	4,76 <sup>aB</sup>	4,70 <sup>aC</sup>
BS500	3,91 <sup>bE</sup>	4,29 <sup>bD</sup>	4,62 <sup>bC</sup>	4,78 <sup>aA</sup>	4,70 <sup>aB</sup>
----- $V_{mp (HC + NO_x)}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ) -----					
BS10	4,03 <sup>aE</sup>	4,58 <sup>aD</sup>	5,03 <sup>aA</sup>	4,81 <sup>bB</sup>	4,70 <sup>bC</sup>
BS500	3,99 <sup>aD</sup>	4,34 <sup>bC</sup>	4,72 <sup>bB</sup>	4,89 <sup>aA</sup>	4,75 <sup>aB</sup>
----- $V_{mp MP}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ) -----					
BS10	0,0014 <sup>aA</sup>	0,0001 <sup>bB</sup>	0,0000 <sup>bC</sup>	0,0000 <sup>aC</sup>	0,0000 <sup>aC</sup>
BS500	0,0006 <sup>bB</sup>	0,0028 <sup>aA</sup>	0,0001 <sup>aC</sup>	0,0000 <sup>aD</sup>	0,0000 <sup>aD</sup>

\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula para cada variável analisada na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

#### 4.6.1 Valor médio ponderado das emissões de monóxido de carbono ( $V_{mpCO}$ )

O combustível BS10 obteve os menores resultados de emissões do  $V_{mp CO}$ , em relação ao BS500, nas concentrações de 5%, 15% e 20% de etanol, e maior resultado na concentração de 10% de etanol (Tabela 30). Nos combustíveis sem a adição de etanol, não houve diferença significativa para a emissão do  $V_{mp CO}$  entre os combustíveis.

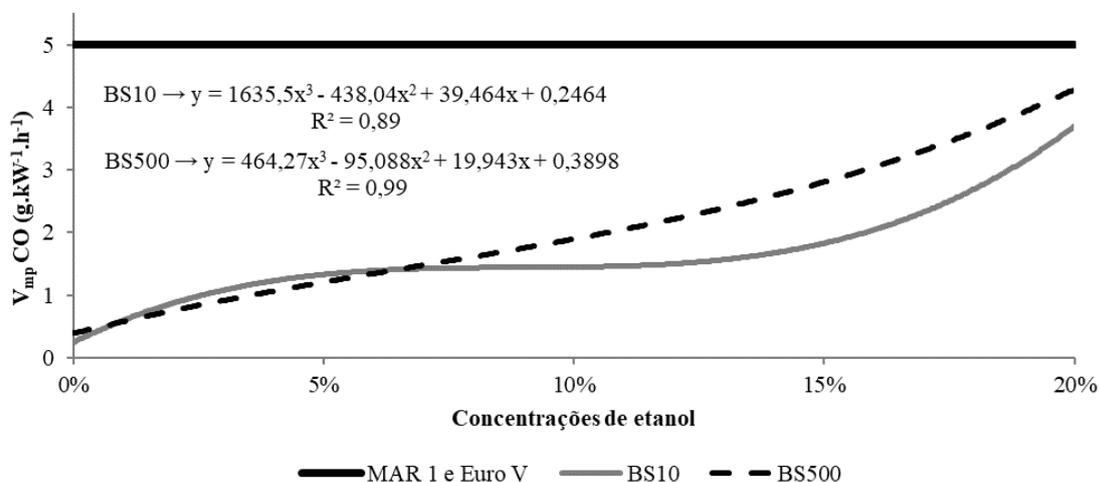
Já para a análise de emissões do  $V_{mp CO}$  entre as concentrações de etanol, ambos os combustíveis apresentaram maiores emissões na concentração de 20% de etanol, e menores emissões na concentração de 0% de etanol (Tabela 30). O segundo menor valor ocorreu na concentração de 5% de etanol para ambos os combustíveis. Já o resultado de emissões do

$V_{mpCO}$  foi de aumento linear das emissões com o incremento de etanol apenas para o BS500, que apresentou o valor intermediário de emissões na concentração de 10% de etanol, e o BS10 na concentração de 15% de etanol.

Uma vez que os motores ciclo Diesel operam com misturas pobres (mais ar e menos combustível), uma alta taxa de CO no escapamento indica excesso de combustível ou falta de oxigênio na mistura, ou seja, mistura rica (CHALLEN e BARANESCU, 1999; MOREIRA, 2008). As emissões de CO geralmente aumentam com o incremento de etanol nas misturas (JHA et al., 2009; PARK, CHA e LEE, 2010; RANDAZZO e SODRÉ, 2011a; SHAMUN et al., 2018). Essas emissões também exibiram uma tendência decrescente de acordo com um aumento na carga do motor e um avanço do tempo de injeção (PARK, YOUN e LEE, 2011).

Na Figura 48 estão representadas as curvas de regressão, as equações e os coeficientes de determinação do  $V_{mpCO}$ , para os combustíveis BS10 e BS500. É possível visualizar que nenhuma concentração de etanol apresentou emissões acima do valor limite das normas MAR-1 e Euro V ( $5,0 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ). O comportamento apresentado das curvas de regressão é de aumento das emissões do  $V_{mpCO}$  com o incremento de etanol na mistura. Utilizando as equações de regressão, é possível estimar que o combustível BS10 atingiria o limite na concentração de 21,83% de etanol, e o BS500 na concentração de 21,74% de etanol.

Figura 48 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de monóxido de carbono nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mpCO}$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da Euro V e MAR-1



Como o CO é o resultado da combustão incompleta, o aumento das emissões indica que o motor não está perfeitamente ajustado para o uso do combustível em concentrações acima de 20% de etanol. Contudo, é possível afirmar que dentre os combustíveis, o BS10 tem menores emissões do  $V_{mp}CO$  em relação ao BS500. Com o incremento da concentração de etanol nos combustíveis, ocorre o aumento das emissões do  $V_{mp}CO$ .

#### 4.6.2 Valor médio ponderado das emissões de hidrocarbonetos ( $V_{mp}HC$ )

Para o as emissões de  $V_{mp}HC$ , o combustível BS10 apresentou menores emissões, em relação ao BS500, em todas as concentrações de etanol (Tabela 30). Na análise de emissões do  $V_{mp}HC$  entre as concentrações de etanol, ambos os combustíveis apresentaram maiores emissões na concentração de 15% de etanol, e menores emissões na concentração de 5% de etanol.

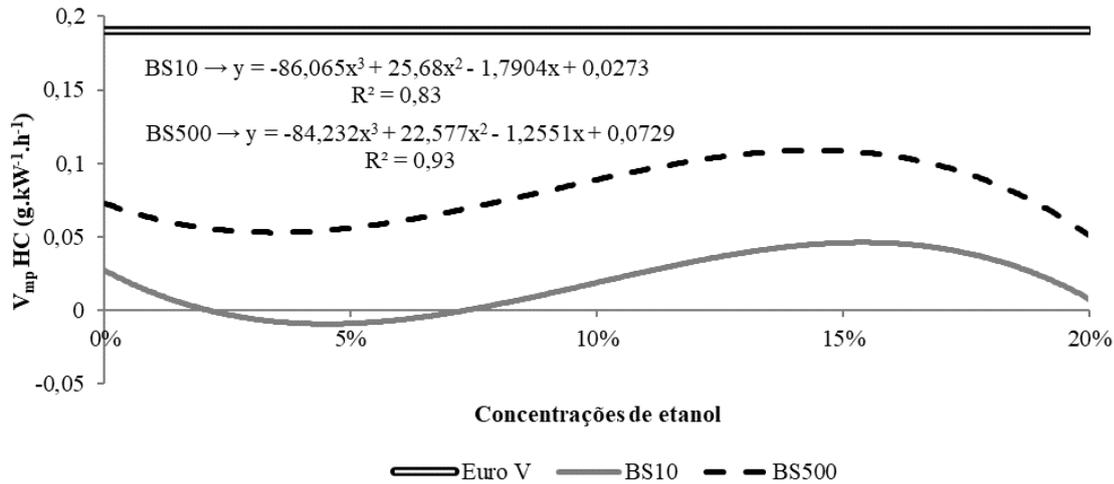
O segundo maior valor de emissões do  $V_{mp}HC$  ocorreu na concentração de 0% de etanol para o BS10 e 10% de etanol para o BS500 (Tabela 30). Já o segundo menor valor de emissões ocorreu para o BS10 nas concentrações de 10% e 20% de etanol, sem diferença significativa entre os valores, e nos 20% de etanol para o BS500.

Na Figura 49 estão representadas as curvas de regressão, as equações e os coeficientes de determinação do  $V_{mp}HC$ , para os combustíveis BS10 e BS500. É possível visualizar que nenhuma concentração de etanol apresentou emissões acima do valor limite da norma Euro V ( $0,19 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ). O comportamento apresentado das curvas de regressão é de redução das emissões do  $V_{mp}HC$  entre as concentrações de 0% a 5% de etanol, aumento até os 15% e novamente redução das emissões até os 20%.

Segundo Park, Cha e Lee (2010), as emissões de HC aumentam com o avanço dos tempos de injeção e com o incremento de etanol na mistura. No entanto, no início da injeção ( $30^\circ$  antes do ponto morto superior), o aumento da mistura de etanol causa a diminuição da emissão HC por causa do aumento da pressão média efetiva no cilindro. Além disso, com a aplicação do EGR e etanol é possível alcançar a redução das emissões de HC.

Quando o teor de etanol é alto, seu maior calor de vaporização (em relação ao óleo Diesel) leva a aumentos nos hidrocarbonetos remanescentes da combustão, tornando-se assim a principal causa das altas de emissões de HC (LAPUERTA, ARMAS e GARCÍA-CONTRERAS, 2009).

Figura 49 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de hidrocarbonetos nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}HC$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da Euro V



Fonte: Autor.

Embora tenham ocorrido as maiores emissões de  $V_{mp}HC$  para ambos os combustíveis em 15%, houve redução das emissões na concentração de 20% de etanol. Nota-se que os valores de emissões do  $V_{mp}HC$  são relativamente baixos, e distantes dos limites impostos pela legislação Euro V.

Por este motivo, as variações que ocorreram entre as concentrações de etanol e, o resultado não linear das emissões de HC com o acréscimo das quantidades de etanol em mistura, podem estar relacionados aos baixos valores de emissões (em ppm). Estes valores de emissões de HC, quando convertidos para emissões específicas (em g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>), apresentam valores próximos de zero, sendo que qualquer variação das emissões em ppm impacta profundamente no resultado em g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.

Diante disso, é possível afirmar que dentre os combustíveis, o BS10 tem menores emissões do  $V_{mp}HC$  em relação ao BS500. Já é inconclusivo o comportamento das emissões de  $V_{mp}HC$  com o incremento da concentração de etanol nos combustíveis.

#### 4.6.3 Valor médio ponderado das emissões de óxidos de nitrogênio ( $V_{mp}NO_x$ )

O combustível BS500 obteve os menores resultados de emissões de  $V_{mp}NO_x$ , em relação ao BS10, nas concentrações de 0%, 5% e 10% de etanol, e nas concentrações de 15% e 20% de etanol, não houve diferença significativa nas emissões (Tabela 30). Na análise de emissões do  $V_{mp}NO_x$  entre as concentrações de etanol, ambos os combustíveis apresentaram as menores emissões na concentração de 0% de etanol, e o segundo menor valor de emissões na concentração de 5% de etanol.

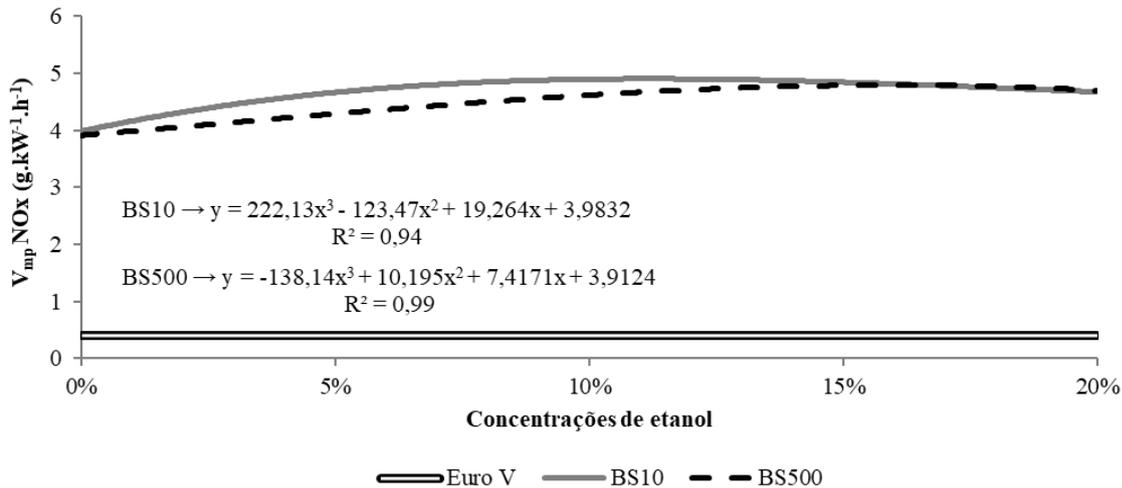
As maiores emissões do  $V_{mp}NO_x$  ocorreram na concentração de 10% de etanol para o BS10 e 15% de etanol para o BS500 (Tabela 30). Estes valores representam um aumento de emissões de aproximadamente 25% para o BS10 e 22% para o BS500, em relação a concentração de 0% de etanol. Os valores são superiores aos encontrados por Shi et al. (2006), onde houve aumento de 5,6 a 11,4% nas emissões de  $NO_x$  com o acréscimo de etanol.

A diminuição das emissões de  $NO_x$  com a uso ou aumento das concentrações de etanol, utilizando motores com gerenciamento eletrônico da injeção e válvula EGR, foi relatada nos trabalhos de Lapuerta, Armas e García-Contreras (2009), Park, Cha e Lee (2010), Park, Youn e Lee (2011), Randazzo e Sodré (2011a) e Shamun et al. (2018). Os autores Estrada et al., (2016b) e Farias et al., 2019 utilizando motores com injeção mecânica também relataram a diminuição das emissões de  $NO_x$ . Já Cheenkachorn e Fungtammasan (2010) não encontraram diferença significativa nas emissões de  $NO_x$ .

O aumento das emissões de  $NO_x$  foi relatado nos trabalhos de Likos, Callahan e Moses (1982), Cole et al.(2000), Corkwell, Jackson e Daly (2003), Can,  elikten, Usta (2004, 2005), Shi et al. (2005), Pang et al. (2006), Shi et al. (2006), Armas, C ardenas e Mata (2007), Jha et al. (2009), L fvenberg (2009), Barabás e Todorut (2011), Magand et al.(2011), Wang et al. (2012) e Sutar et al. (2019).

Na Figura 50 estão representadas as curvas de regressão, as equa es e os coeficientes de determina o do  $V_{mp}NO_x$ , para os combustíveis BS10 e BS500.   possível visualizar que todos os resultados de emissões ocorreram acima do valor limite da norma Euro V (0,4 g.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>). O comportamento apresentado das curvas de regressão   de aumento das emissões do  $V_{mp}NO_x$  com o incremento de etanol na mistura, com tendência a estabiliza o dos valores próximo aos 20% de etanol.

Figura 50 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de óxidos de nitrogênio nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}NO_x$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da Euro V



Fonte: Autor.

É possível concluir que dentre os combustíveis, o BS500 tem menores emissões do  $V_{mp}NO_x$  em relação ao BS10 até a concentração de 10% de etanol, não apresentando diferença significativa após. Com o incremento da concentração de etanol nos combustíveis, ocorre o aumento das emissões do  $V_{mp}NO_x$ , com tendência a estabilização dos valores próximo aos 20% de concentração de etanol.

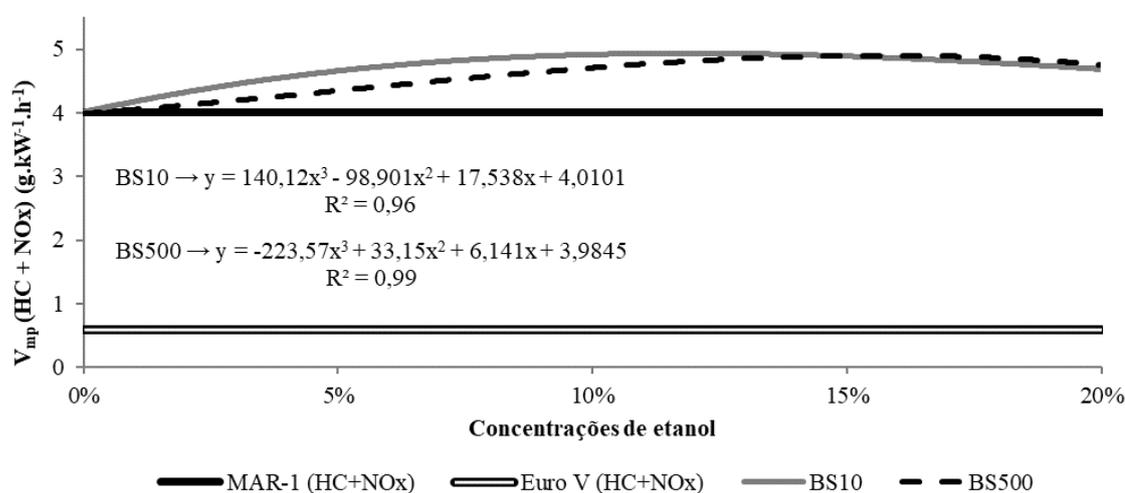
#### 4.6.4 Valor médio ponderado das emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio ( $V_{mp}(HC+ NO_x)$ )

Para o  $V_{mp}(HC+ NO_x)$ , o combustível BS10 obteve os menores resultados de emissões, em relação ao BS500, nas concentrações de 15% e 20% de etanol, e maior resultado nas concentrações de 5% e 10% de etanol (Tabela 30). Nos combustíveis sem a adição de etanol, não houve diferença significativa para a emissão de  $V_{mp}(HC+ NO_x)$ . Na análise de emissões do  $V_{mp}(HC+ NO_x)$  entre as concentrações de etanol, ambos os combustíveis apresentaram as menores emissões na concentração de 0% de etanol, e o segundo menor valor de emissões na concentração de 5% de etanol.

As maiores emissões do  $V_{mp}(\text{HC} + \text{NO}_x)$  ocorreram na concentração de 10% de etanol para o BS10 e 15% de etanol para o BS500 (Tabela 30). Já o segundo maior valor de emissões ocorreu para o BS10 na concentração de 15% de etanol, para o BS500 nas concentrações de 10% e 20% de etanol, sem diferença estatística entre os valores.

Na Figura 51 estão representadas as curvas de regressão, as equações e os coeficientes de determinação do  $V_{mp}(\text{HC} + \text{NO}_x)$ , para os combustíveis BS10 e BS500. É possível visualizar que, com exceção da concentração de 0% de etanol, todos os resultados de emissões ocorreram acima do valor limite da norma MAR-1 ( $4,0 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ). Em relação aos valores limites da norma Euro V, que se somados resultam em  $0,59 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  ( $0,19 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  para HC +  $0,4 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  para  $\text{NO}_x$ ), todos as concentrações de etanol para ambos os combustíveis apresentaram emissões superiores. O comportamento apresentado das curvas de regressão é de aumento das emissões do  $V_{mp}(\text{HC} + \text{NO}_x)$  com o incremento de etanol na mistura, com tendência a estabilização dos valores próximo aos 20% de etanol.

Figura 51 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de hidrocarbonetos mais óxidos de nitrogênio nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}(\text{HC} + \text{NO}_x)$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da MAR-1



Fonte: Autor.

É possível concluir que dentre os combustíveis, o BS500 tem menores emissões do  $V_{mp}(\text{HC} + \text{NO}_x)$  em relação ao BS10 até a concentração de 10% de etanol, e após apresenta maiores emissões que o BS500, até os 20% de concentração de etanol. Com o incremento da

concentração de etanol nos combustíveis, ocorre o aumento das emissões do  $V_{mp}(HC+NO_x)$ , com tendência a estabilização dos valores próximo aos 20% de etanol.

#### 4.6.5 Valor médio ponderado das emissões de material particulado ( $V_{mp}MP$ )

O combustível BS10 obteve os menores resultados de emissões do  $V_{mp}MP$ , em relação ao BS500, nas concentrações de 5% e 10% de etanol, e maior na concentração de 0% de etanol (Tabela 30). Nas concentrações de 15% e 20% de etanol, não houve diferença significativa nas emissões.

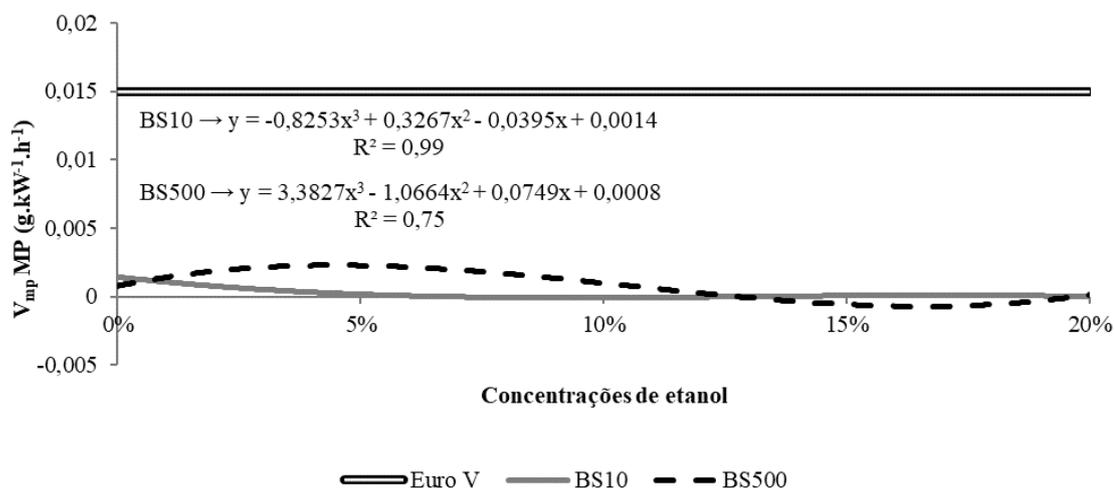
Para a análise de emissões do  $V_{mp}MP$  entre as concentrações de etanol, o BS10 puro apresentou a maior emissão, seguido da concentração de 5% de etanol (Tabela 30). Não houve diferença significativa entre as emissões do  $V_{mp}MP$  para o BS10 nas concentrações de 10%, 15% e 20% de etanol, sendo que os valores foram próximos a zero. Para o BS500, a maior emissão de MP ocorreu na concentração de 5% de etanol, seguido da emissão na concentração de 0% de etanol. Também não houve diferença significativa entre as emissões do  $V_{mp}MP$  para o BS500 nas concentrações de 15% e 20% de etanol, sendo que os valores foram próximos a zero.

Na Figura 52 estão representadas as curvas de regressão, as equações e os coeficientes de determinação do  $V_{mp}MP$ , para os combustíveis BS10 e BS500. É possível visualizar que, todos os resultados de emissões foram inferiores aos valores limites das normas MAR-1 ( $0,3 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ) e Euro V ( $0,015 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ). O comportamento apresentado das curvas de regressão é de diminuição das emissões do  $V_{mp}MP$  com o incremento de etanol na mistura.

A diminuição das emissões de MP com a utilização ou aumento das concentrações de etanol foi relatada nos trabalhos de Pang et al. (2006), Shi et al. (2006), Armas e García-Contreras (2009), Cheenkachorn e Fungtammasan (2010), Lapuerta, Park, Cha e Lee (2010) Estrada et al., (2016b), e Shamun et al. (2018), além de muitos outros autores da bibliografia. Já Hulwan e Joshi (2011) identificaram a redução da opacidade dos gases apenas em altas cargas.

Shamun et al. (2018) identificaram que as emissões de MP a partir dos combustíveis oxigenados foram em geral menores do que os emitidos pelo óleo Diesel. Embora o tamanho das partículas das emissões do óleo Diesel geralmente estivesse no tamanho de aproximadamente 200 nm, as partículas emitidas pelos combustíveis oxigenados não excederam 100 nm.

Figura 52 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de emissões de material particulado nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}MP$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em comparação com o valor limite da Euro V



Fonte: Autor.

Segundo Pickett e Siebers (2004), a redução da opacidade com a utilização de etanol pode ser explicada pelo aumento da quantidade de  $O_2$  proveniente da composição química do etanol, reduzindo a possibilidade de formação de mistura rica na câmara de combustão.

O MP pode aumentar devido aos hidrocarbonetos não queimados, apesar da opacidade diminuir. Lapuerta, Armas e García-Contreras (2009) utilizando mistura na concentração de 17% de etanol no óleo Diesel (D:E), observaram maior redução da opacidade em relação a mistura com concentrações de 30% de biodiesel e 7,7 de etanol (D:B:E). Isso indica que o oxigênio fornecido pelo etanol é mais eficiente do que o fornecido pelo biodiesel. Essa tendência é o oposto das emissões de MP (as emissões obtidas somente com etanol são superiores das obtidas na mistura D:B:E) por causa das altas emissões de HC da mistura apenas com etanol no óleo Diesel.

Randazzo e Sodré (2011a) trabalhando com misturas de 20% de biodiesel e 2-5% de etanol, identificaram o aumento das emissões de material particulado. Justificaram que isso ocorreu devido ao baixo número de cetano do etanol em rela o ao  leo Diesel e biodiesel, e que a utiliza o de aditivos melhoradores de cetano podem reduzir a forma o de MP. Apesar de não relatado pelos autores, as emissões de HC foram crescentes com o aumento da concentra o de etanol na mistura, e o aumento das emissões de MP também pode estar

relacionado a hidrocarbonetos não queimados. Assim, um ajuste nos parâmetros de injeção pode trazer benefícios as emissões de MP, e segundo Park, Cha e Lee (2010), com a aplicação do EGR e etanol é possível alcançar a redução simultânea de  $\text{NO}_x$ , HC e MP.

O maior valor de emissões de MP do BS500 com 5% de etanol, em relação ao BS500 puro, pode estar relacionado a quantidade de enxofre no combustível, pois sua presença contribui para a formação da opacidade. Isso é devido ao enxofre compartilhar o  $\text{O}_2$  livre na fase final da combustão, com o carbono produto da queima incompleta do combustível, aumentando a produção de MP (MAZIERO et al., 2006). O mesmo comportamento não ocorreu para o BS10 com 5% de concentração de etanol.

Portanto, é possível concluir que dentre os combustíveis sem a adição de etanol, o BS500 tem menores emissões do  $V_{mp}MP$  em relação ao BS10. Já com os combustíveis em mistura com etanol, o BS10 apresenta melhor desempenho de emissões do  $V_{mp}MP$ . Com o incremento da concentração de etanol nos combustíveis, ocorre a diminuição das emissões do  $V_{mp}MP$ . Não foi encontrada a relação entre hidrocarbonetos não queimados e emissões de MP, pois na concentração de 15% de etanol, onde ocorreram as maiores emissões de  $V_{mp}HC$ , ocorreram as menores emissões de  $V_{mp}MP$ .

#### 4.7 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL NOS MODOS DE OPERAÇÃO

Os resultados encontrados, para o consumo horário e específico de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, revelam diferença significativa entre todos os fatores de variação, sendo eles os combustíveis (C), concentrações de etanol (E) e modos de operação (M). As interações desses fatores também apresentaram efeito significativo, para combustíveis e concentrações de etanol (C x E), combustíveis e modos de operação (C x M), concentrações de etanol e modos de operação (E x M) e combustíveis, concentrações de etanol e modos de operação (C x E x M) (Tabela 31).

Tabela 31 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de consumo horário de combustível ( $CH_{mop}$ ) e consumo específico de combustível ( $CE_{mop}$ ) no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), modos de operação (M), as interações (C x E), (C x M), (E x M) e (C x E x M), o coeficiente de variação (CV) e a média geral

Fatores de variação	Quadrados médios	
	$CH_{mop}$ (L.h <sup>-1</sup> )	$CE_{mop}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )
Combustíveis (C)	0,963*	5357,51*
Concentrações de etanol (E)	4,957*	18291,46*
Modos de operação (M)	4609,99*	1548202*
C x E	2,032*	3683,41*
C x M	0,257*	2059,44*
E x M	0,833*	5327,87*
C x E x M	0,430*	1300,99*
CV (%)	2,00	5,09
Média geral	15,692	320,96

\* Efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Na Tabela 32 estão representados os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis, concentrações de etanol e modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (C x E x M), para o consumo horário de combustível ( $CH_{mop}$ ). O combustível BS10 apresentou maior consumo horário, em relação ao BS500, no modo 1 com 5% de concentração de etanol, no modo 5 para 0% e 5% de etanol e no modo 7 para 5% de etanol. O combustível BS500 apresentou maior consumo horário no modo 1 para 0% de etanol, e nos modos 4, 5, 6 e 7 para

10% de etanol. Nos demais resultados, não houve diferença significativa para o consumo horário nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4.

Tabela 32 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (C x E x M), para o consumo horário de combustível ( $CH_{mop}$ )

Combustíveis	Modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4							
	1	2	3	4	5	6	7	8
----- 0% de etanol -----								
BS10	26,66 <sup>aA1*</sup>	21,00 <sup>aC12</sup>	14,62 <sup>aE2</sup>	6,99 <sup>aG2</sup>	22,02 <sup>bB2</sup>	17,77 <sup>aD3</sup>	12,27 <sup>aF3</sup>	1,56 <sup>aH2</sup>
BS500	25,84 <sup>bA2</sup>	20,82 <sup>aC3</sup>	14,68 <sup>aE3</sup>	7,05 <sup>aG3</sup>	22,61 <sup>aB12</sup>	17,77 <sup>aD2</sup>	12,54 <sup>aF3</sup>	1,73 <sup>aH2</sup>
----- 5% de etanol -----								
BS10	26,11 <sup>bA2</sup>	21,26 <sup>aC12</sup>	15,09 <sup>aE1</sup>	7,10 <sup>aG12</sup>	22,32 <sup>bB2</sup>	18,09 <sup>aD23</sup>	12,36 <sup>bF3</sup>	1,85 <sup>aH12</sup>
BS500	26,58 <sup>aA1</sup>	20,97 <sup>aC23</sup>	15,06 <sup>aE23</sup>	7,28 <sup>aG23</sup>	22,96 <sup>aB1</sup>	18,09 <sup>aD2</sup>	12,80 <sup>aF23</sup>	1,97 <sup>aH12</sup>
----- 10% de etanol -----								
BS10	26,25 <sup>aA12</sup>	21,44 <sup>aC1</sup>	15,24 <sup>aE1</sup>	7,52 <sup>aG1</sup>	22,96 <sup>aB1</sup>	18,50 <sup>aD12</sup>	13,13 <sup>aF2</sup>	2,26 <sup>aH1</sup>
BS500	26,25 <sup>aA12</sup>	21,03 <sup>bC123</sup>	15,33 <sup>aE2</sup>	7,05 <sup>bG3</sup>	22,49 <sup>bB2</sup>	17,77 <sup>bD2</sup>	12,45 <sup>bF3</sup>	2,20 <sup>aH1</sup>
----- 15% de etanol -----								
BS10	26,02 <sup>aA2</sup>	20,97 <sup>aC2</sup>	15,21 <sup>aE1</sup>	7,40 <sup>bG12</sup>	22,90 <sup>aB1</sup>	18,56 <sup>aD1</sup>	13,77 <sup>aF1</sup>	1,85 <sup>aH12</sup>
BS500	25,96 <sup>aA2</sup>	21,29 <sup>aC12</sup>	15,30 <sup>aE2</sup>	8,33 <sup>aG1</sup>	22,79 <sup>aB12</sup>	18,62 <sup>aD1</sup>	13,71 <sup>aF1</sup>	2,03 <sup>aH12</sup>
----- 20% de etanol -----								
BS10	26,60 <sup>aA1</sup>	21,17 <sup>aC12</sup>	15,30 <sup>bE1</sup>	7,52 <sup>aG1</sup>	22,02 <sup>bB2</sup>	17,74 <sup>bD3</sup>	12,72 <sup>aF23</sup>	1,91 <sup>aH12</sup>
BS500	26,55 <sup>aA1</sup>	21,44 <sup>aC1</sup>	16,00 <sup>aE1</sup>	7,69 <sup>aG2</sup>	22,61 <sup>aB12</sup>	18,56 <sup>aD1</sup>	13,01 <sup>aF2</sup>	2,14 <sup>aH12</sup>

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna entre os combustíveis em cada concentração de etanol, maiúscula na linha e números na coluna entre concentrações de etanol no mesmo combustível não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Os combustíveis BS10 e BS500 apresentaram a mesma ordem de resultados de consumo horário nos modos de operação ( $CH_{mop}$ ) para todas as concentrações de etanol, apresentando diferença estatística entre todos (Tabela 32). O maior valor de consumo horário ocorreu no modo 1, que é o ponto de potência máxima do motor. O segundo maior valor foi o modo 5, que é o ponto de torque máximo do motor. Na sequência, os valores seguiram a ordem do modo 2, 6, 3, 7 e 4, que são aplicações parciais do torque, alternadamente, na rotação de potência máxima e rotação do torque máximo. Por último, o menor valor ocorreu no modo 8, que representa a marcha lenta.

Para a análise do consumo horário nos modos de operação ( $CH_{mop}$ ), segundo a Tabela 32, o combustível BS10 apresentou no modo 1 os maiores valores de consumo horário para as concentrações de 0% e 20% de etanol, sendo que não houve diferença estatística entre os valores de 26,66 L.h<sup>-1</sup> e 26,60 L.h<sup>-1</sup>, respectivamente. Já os menores consumos horários ocorreram para

as concentrações de 5% e 15% de etanol, sem diferença estatística entre ambos. A concentração de 10% de etanol não apresentou diferença estatística entre os valores máximos e mínimos de consumo horário no modo 1.

No modo 2, o combustível BS10 apresentou o maior consumo horário na concentração de 10% de etanol, e o menor consumo em 15% de etanol (Tabela 32), e nas demais concentrações de etanol não houve diferença estatística entre os valores máximo e mínimo de consumo horário. No modo 3, o menor consumo horário ocorreu no BS10 puro, e as concentrações de 5%, 10%, 15% e 20% apresentaram o maior consumo horário, sem diferença estatística entre os valores.

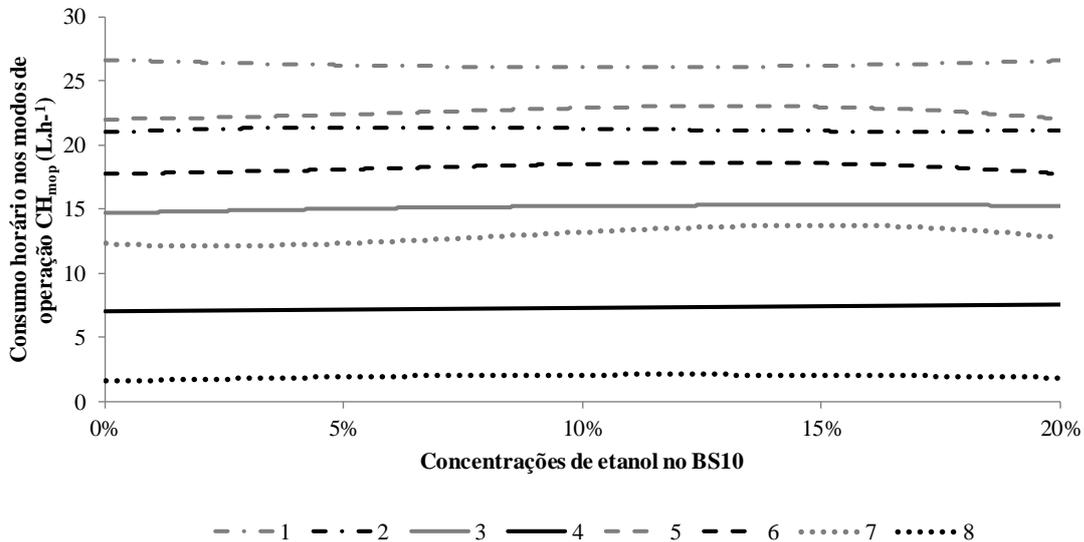
Já para o modo 4, os maiores valores de consumo horário para o BS10 ocorreram nas concentrações de 10% e 20% de etanol, sem diferença estatística entre os valores (Tabela 32). Já o menor consumo horário ocorreu no BS10 puro. As concentrações de 5% e 15% de etanol não apresentaram diferença estatística entre todas as concentrações de etanol no modo 4. O modo 5 apresentou os menores valores de consumo horário em 0%, 5% e 20% de etanol, sem diferença estatística entre os valores. O máximo consumo horário ocorreu nas concentrações de 10% e 15% de etanol, com respectivos valores de  $22,96 \text{ L.h}^{-1}$  e  $22,90 \text{ L.h}^{-1}$ , sem diferença significativa entre ambos.

O modo 6 apresentou os menores valores de consumo horário, sem diferença estatística, nas concentrações de 0% e 20% de etanol em mistura com o BS10 (Tabela 32). O maior consumo horário ocorreu na concentração de 15% de etanol. O consumo horário na concentração de 5% de etanol não apresentou diferença significativa para as concentrações de 0%, 10% e 20% de etanol, e o consumo horário na concentração de 10% de etanol não apresentou diferença significativa para o valor máximo de consumo horário nos 15% de etanol.

No modo 7, os menores consumos horários ocorreram nas concentrações de 0% e 5% de etanol no BS10, sem diferença significativa entre os valores (Tabela 32). O maior consumo horário ocorreu na concentração de 15% de etanol. O resultado de consumo horário com 20% de etanol não diferiu estatisticamente dos menores consumos horários nas concentrações de 0% e 5% de etanol, e também da concentração de 10% de etanol.

O modo 8 teve o menor consumo horário no BS10 puro, com valor de  $1,56 \text{ L.h}^{-1}$ , e o maior consumo na concentração de 10% de etanol, sendo que nas demais concentrações não houve diferença estatística dos consumos horários mínimo e máximo no modo 8. Na Figura 53 estão representadas, para o combustível BS10, as curvas de regressão do consumo horário nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 ( $\text{CH}_{\text{mop}}$ ), e na Tabela 33 as equações e os coeficientes de determinação.

Figura 53 - Representação das curvas de regressão do consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CH_{mop}$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10



Fonte: Autor.

Tabela 33 - Equações das curvas de regressão do consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CH_{mop}$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10

Modo	Equações	$R^2$
1	$y = 54,535x^2 - 11,318x + 26,643$	$R^2 = 0,78$
2	$y = 508,99x^3 - 174,51x^2 + 15,424x + 20,969$	$R^2 = 0,67$
3	$y = -26,848x^2 + 8,3061x + 14,666$	$R^2 = 0,93$
4	$y = 2,7016x + 7,0359$	$R^2 = 0,76$
5	$y = -783,07x^3 + 147,67x^2 + 1,7898x + 22,01$	$R^2 = 0,99$
6	$y = -646,03x^3 + 118,3x^2 + 2,0346x + 17,767$	$R^2 = 0,99$
7	$y = -1585,7x^3 + 406,92x^2 - 15,752x + 12,286$	$R^2 = 0,99$
8	$y = -36,916x^2 + 8,7927x + 1,5597$	$R^2 = 0,67$

Fonte: Autor.

Para o combustível BS500, na análise do consumo horário nos modos de operação ( $CH_{mop}$ ) segundo a Tabela 32, o modo 1 apresentou os maiores valores de consumo horário para as concentrações de 5% e 20% de etanol, com respectivos valores de 26,58 L.h<sup>-1</sup> e 26,55 L.h<sup>-1</sup>, não havendo diferença estatística entre ambos. Já os menores consumos horários ocorreram para 0% e 15% de etanol, sem diferença estatística entre ambos. Como também ocorreu para o BS10, a concentração de 10% de etanol não apresentou diferença estatística entre os valores máximos e mínimos de consumo horário no modo 1.

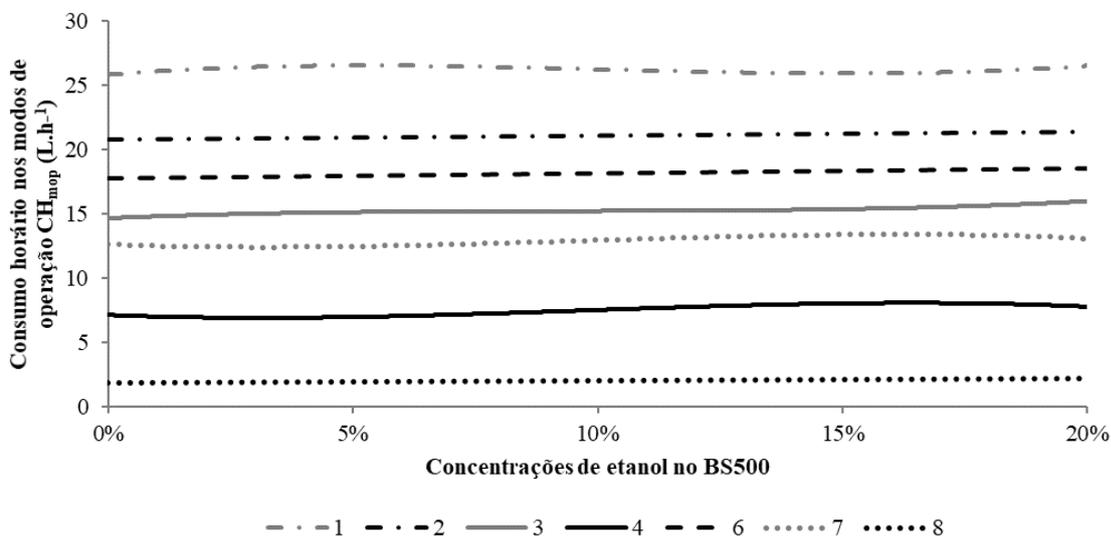
No modo 2, o combustível BS500 apresentou o maior consumo horário na concentração de 20% de etanol, e o menor consumo em 0% de etanol (Tabela 32). O consumo horário na concentração com 15% de etanol não diferiu estatisticamente das concentrações de 5%, 10% e 15% de etanol, e o consumo horário com 5% de etanol não diferiu das concentrações de 0% e 10% de etanol. O consumo horário com 10% de etanol não diferiu de todas as outras concentrações de etanol. No modo 3, o menor consumo horário ocorreu no BS500 puro, e o maior consumo horário ocorreu aos 20% de etanol, sem diferença significativa para a concentração de 5% de etanol. As concentrações de 10% e 15% de etanol apresentaram valores intermediários, que não diferiram estatisticamente.

No modo 4, o maior valor de consumo horário para o BS500 ocorreu na concentração de 15% de etanol, e os menores consumos, que não diferiram estatisticamente entre ambos, ocorreram nas concentrações de 0% e 10% de etanol (Tabela 32). O consumo horário na concentração de 5% de etanol não apresentou diferença estatística para as concentrações de 0%, 10% e 20% de etanol. O modo 5 apresentou o menor valor de consumo horário na concentração de 10% de etanol, com valor de  $22,49 \text{ L.h}^{-1}$ , e o maior consumo com 5% de etanol na mistura, com valor de  $22,6 \text{ L.h}^{-1}$ , sendo que nas demais concentrações não houve diferença estatística entre o menor e o maior valor de consumo no modo 5.

O modo 6 apresentou os menores valores de consumo horário, sem diferença estatística, nas concentrações de 0%, 5% e 10% de etanol em mistura com o BS500 (Tabela 32). Já os maiores consumos horários ocorreram nas concentrações de 15% e 20% de etanol, sem diferença significativa entre os valores. No modo 7, os menores consumos horários ocorreram nas concentrações de 0% e 10% de etanol no BS500, sem diferença significativa entre os valores e também em relação ao consumo horário com 5% de etanol. O maior consumo horário ocorreu na concentração de 15% de etanol. O resultado de consumo horário com 20% de etanol não diferiu estatisticamente da concentração com 5% de etanol

O modo 8 apresentou para o BS500 comportamento idêntico do que ocorreu com o BS10, sendo que o menor consumo horário ocorreu no BS10 puro, com valor de  $1,73 \text{ L.h}^{-1}$ , e o maior consumo na concentração de 10% de etanol, com valor de  $2,20 \text{ L.h}^{-1}$  (Tabela 32). Nas demais concentrações não houve diferença estatística dos consumos horários mínimo e máximo. Na Figura 54 estão representadas, para o combustível BS500, as curvas de regressão do consumo horário nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CH_{mop}$ ), e na Tabela 34 as equações e os coeficientes de determinação.

Figura 54 - Representação das curvas de regressão do consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CH_{mop}$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500



Fonte: Autor.

Tabela 34 - Equações das curvas de regressão do consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CH_{mop}$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500

Modo	Equações	$R^2$
1	$y = 1292,1x^3 - 395,17x^2 + 30,875x + 25,845$	$R^2 = 0,99$
2	$y = 3,1127x + 20,796$	$R^2 = 0,97$
3	$y = 567,73x^3 - 160,25x^2 + 15,948x + 14,665$	$R^2 = 0,98$
4	$y = -978,84x^3 + 286,94x^2 - 15,004x + 7,1256$	$R^2 = 0,64$
5	não significativo	
6	$y = 4,2286x + 17,737$	$R^2 = 0,65$
7	$y = -900,53x^3 + 260,93x^2 - 13,816x + 12,622$	$R^2 = 0,52$
8	$y = 1,7619x + 1,8383$	$R^2 = 0,58$

Fonte: Autor.

Na Tabela 35 estão representados os resultados do teste de médias da interação entre combustíveis, concentrações de etanol e modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 ( $C \times E \times M$ ), para o consumo específico de combustível ( $CE_{mop}$ ). O combustível BS10 apresentou maior consumo específico, em relação ao BS500, apenas no modo 4 na concentração de 10% de etanol. O combustível BS500 apresentou maior consumo específico no modo 4 para 15% de etanol, e no modo 8 para 0%, 5%, 15% e 20% de etanol.

As diferenças estatísticas encontradas nos modos 4 e 8 (Tabela 35), entre o BS10 e BS500, podem ser justificadas pela baixa carga aplicada pelo dinamômetro, sendo que pequenas variações do consumo horário de combustível impactam profundamente nos valores de consumo específico. Nos demais resultados, não houve diferença significativa para o consumo específico de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4.

Tabela 35 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis, dentro de cada nível das concentrações de etanol no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para o consumo específico de combustível ( $CE_{mop}$ )

Comb.	Modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4							
	1	2	3	4	5	6	7	8
----- 0% de etanol -----								
BS10	233,13 <sup>aCD1*</sup>	243,06 <sup>aCD1</sup>	252,81 <sup>aC1</sup>	604,05 <sup>aA2</sup>	225,97 <sup>aD1</sup>	237,25 <sup>aCD1</sup>	244,98 <sup>aCD2</sup>	340,12 <sup>bB3</sup>
BS500	233,42 <sup>aD1</sup>	248,83 <sup>aCD1</sup>	261,89 <sup>aC2</sup>	614,71 <sup>aA3</sup>	227,63 <sup>aD1</sup>	235,97 <sup>aCD1</sup>	246,88 <sup>aCD1</sup>	391,21 <sup>aB3</sup>
----- 5% de etanol -----								
BS10	232,92 <sup>aD1</sup>	248,42 <sup>aCD1</sup>	264,38 <sup>aC1</sup>	616,72 <sup>aA2</sup>	225,85 <sup>aD1</sup>	241,49 <sup>aCD1</sup>	245,86 <sup>aCD12</sup>	412,56 <sup>bB2</sup>
BS500	236,30 <sup>aD1</sup>	247,38 <sup>aCD1</sup>	263,62 <sup>aC2</sup>	617,58 <sup>aA3</sup>	227,25 <sup>aD1</sup>	235,33 <sup>aD1</sup>	248,29 <sup>aCD1</sup>	437,29 <sup>aB2</sup>
----- 10% de etanol -----								
BS10	235,10 <sup>aDE1</sup>	254,12 <sup>aCDE1</sup>	270,44 <sup>aC1</sup>	671,84 <sup>aA1</sup>	231,62 <sup>aE1</sup>	243,81 <sup>aDE1</sup>	258,25 <sup>aCD12</sup>	505,89 <sup>aB1</sup>
BS500	233,34 <sup>aD1</sup>	249,97 <sup>aCD1</sup>	270,82 <sup>aC12</sup>	623,01 <sup>ba3</sup>	227,46 <sup>aD1</sup>	236,04 <sup>aD1</sup>	245,27 <sup>aCD1</sup>	489,48 <sup>aB1</sup>
----- 15% de etanol -----								
BS10	235,39 <sup>aD1</sup>	252,18 <sup>aCD1</sup>	271,76 <sup>aC1</sup>	649,07 <sup>ba1</sup>	226,75 <sup>aD1</sup>	242,23 <sup>aD1</sup>	269,60 <sup>aC1</sup>	418,16 <sup>bB2</sup>
BS500	234,37 <sup>aE1</sup>	255,43 <sup>aCDE1</sup>	274,56 <sup>aC12</sup>	744,90 <sup>aA1</sup>	230,94 <sup>aE1</sup>	245,18 <sup>aDE1</sup>	268,63 <sup>aCD1</sup>	456,19 <sup>aB2</sup>
----- 20% de etanol -----								
BS10	242,93 <sup>aD1</sup>	254,25 <sup>aCD1</sup>	272,42 <sup>aC1</sup>	665,92 <sup>aA1</sup>	234,35 <sup>aD1</sup>	243,96 <sup>aD1</sup>	259,77 <sup>aCD12</sup>	435,39 <sup>bB2</sup>
BS500	241,76 <sup>aD1</sup>	260,12 <sup>aD1</sup>	288,68 <sup>aC1</sup>	678,65 <sup>aA2</sup>	235,60 <sup>aD1</sup>	249,55 <sup>aD1</sup>	261,75 <sup>aD1</sup>	486,89 <sup>aB1</sup>

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna entre os combustíveis em cada concentração de etanol, maiúscula na linha e números na coluna entre concentrações de etanol no mesmo combustível não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Os combustíveis BS10 e BS500 apresentaram praticamente as mesmas ordens de resultados do consumo específico de combustível nos modos de operação ( $CE_{mop}$ ) (Tabela 35). O maior valor de consumo específico ocorreu para ambos os combustíveis no modo 4, que é o ponto onde é aplicado 10% do torque da potência máxima do motor, na rotação de potência máxima. O segundo maior valor foi no modo 8, que representa o consumo específico na marcha lenta do motor.

Os menores consumos específicos de combustível ocorreram no modo 5, sendo que não houve diferença estatística para todos os resultados dos modos 1, 2 e 6 (Tabela 35). Também não houve diferença estatística do modo 5 para o modo 7, com exceção do BS10 com 10% de

etanol e BS10 e BS500 aos 15% de concentração de etanol. O modo 3 apresentou resultados intermediários de consumo específico de combustível.

Na análise do consumo específico de combustível nos modos de operação ( $CE_{mop}$ ), segundo a Tabela 35, o combustível BS10 não apresentou diferença estatística entre as concentrações de etanol nos modos 1, 2, 3, 5 e 6. No modo 4, os maiores valores de consumo específico ocorreram nas concentrações de 10%, 15% e 20% de etanol, sem diferença estatística entre os valores. Já o menor consumo específico ocorreu no BS10 puro e em mistura com 5% de etanol, sem diferença estatística entre os valores.

No modo 7, o maior consumo específico ocorreu na concentração de 15% de etanol, e o menor no BS10 puro, apresentando diferença de aproximadamente 10% entre os valores (Tabela 32). Esta diferença de 10% no consumo específico pode ser amortizada pelos preços menores do etanol anidro em relação ao BS10. Os resultados das concentrações de 5%, 10% e 15% não diferiram estatisticamente de todos os valores do modo 7. O modo 8 teve o menor consumo específico no BS10 puro, e o maior consumo na concentração de 10% de etanol, sendo que nas demais concentrações, 5%, 15% e 20% de etanol, ocorreram valores intermediários, sem diferença estatística entre eles.

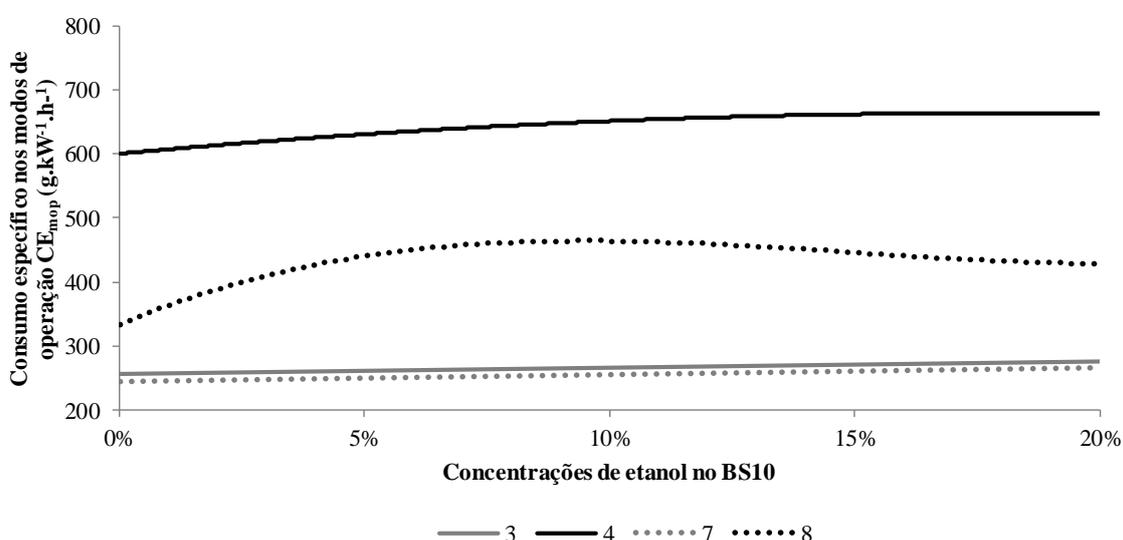
Para ocorrer o aumento da eficiência térmica em um motor é necessário que haja melhora significativa na eficiência de combustão, e segundo Guarieiro et al. (2009), é justamente a adição de etanol e biodiesel (combustíveis oxigenados) que melhoram a eficiência da combustão do óleo Diesel no motor. Alguns autores atribuíram o aumento da eficiência do motor à carga aplicada a eles, onde para cargas médias e altas ocorre maior eficiência térmica, e nas cargas baixas notaram valores similares ao óleo Diesel puro (BARABÁS et al., 2010; FERREIRA et al., 2013). Para o consumo de combustível é aumentado com o uso de etanol misturado ao óleo Diesel, mas sua taxa de aumento é reduzida em cargas elevadas como consequência do aumento da eficiência térmica (LAPUERTA, ARMAS e HERREROS, 2008).

Os modos de operação 1, 2, e 3 (cargas altas e médias) são os mais utilizados nas operações agrícolas, tanto que a norma ABNT NBR ISO 8178-4 pondera com 15%, ao invés de 10%, estes modos para o cálculo do valor médio ponderado (Quadro 5 – página 90). Assim, juntamente com os modos de operação 5 e 6 (cargas altas), que não apresentaram diferença estatística entre as concentrações de etanol, e no modo 7 (cargas médias), em que as concentrações de 5%, 10% e 20% também não apresentaram diferença estatística em relação ao BS10 puro, é possível afirmar que em 75% das operações agrícolas, a utilização de 20% de etanol anidro aditivado no BS10 não apresenta diferença estatística no consumo específico de combustível. Para a concentração de 5% de etanol, esta mesma relação chega a 90% das

atividades agrícolas desempenhadas em que o consumo específico será o mesmo do BS500 puro.

Na Figura 55 estão representadas, para o combustível BS10, as curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), e na Tabela 36 as equações e os coeficientes de determinação.

Figura 55 - Representação das curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10



Fonte: Autor.

Tabela 36 - Equações das curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS10

Modo	Equações	$R^2$
1	não significativo	
2	não significativo	
3	$y = 93,218x + 257,04$	$R^2 = 0,80$
4	$y = -1986,7x^2 + 709,53x + 600,37$	$R^2 = 0,77$
5	não significativo	
6	não significativo	
7	$y = 106,65x + 245,03$	$R^2 = 0,66$
8	$y = 56050x^3 - 25143x^2 + 3262,9x + 333,15$	$R^2 = 0,76$

Fonte: Autor.

Na análise do consumo específico de combustível nos modos de operação ( $CE_{mop}$ ), segundo a Tabela 35, o combustível BS500 não apresentou diferença estatística entre as concentrações de etanol nos modos 1, 2, 5, 6 e 7. No modo 3, o maior valor de consumo específico ocorreu na concentração de 20% de etanol, e os menores valores de consumo específico ocorreram no BS500 puro e em mistura com 5% de etanol, sem diferença estatística entre os valores. As misturas com 10% e 15% de etanol não diferiram estatisticamente de todos os resultados de consumo específico para o BS500 no modo 3. Como ocorreu para o BS10 no modo 7, a diferença entre os 20% de concentração de etanol e o BS500 puro foi de aproximadamente 10% no consumo específico, valor pode ser amortizado pelos preços menores do etanol anidro em relação ao BS10.

No modo 4, o maior consumo específico ocorreu na concentração de 15% de etanol, e os menores valores ocorreram para o BS500 puro, com 5 e 10% de etanol, sem diferença estatística entre os menores valores (Tabela 32). O resultado da concentração de 20% de etanol apresentou valor intermediário, diferindo estatisticamente de todas as demais no modo 4. O modo 8 teve o menor consumo específico no BS500 puro, e os maiores consumos nas concentrações de 10% e 20% de etanol, sem diferença significativa entre os maiores consumos. Nas demais concentrações, 5% e 15%, ocorreram valores intermediários, sem diferença estatística entre os valores.

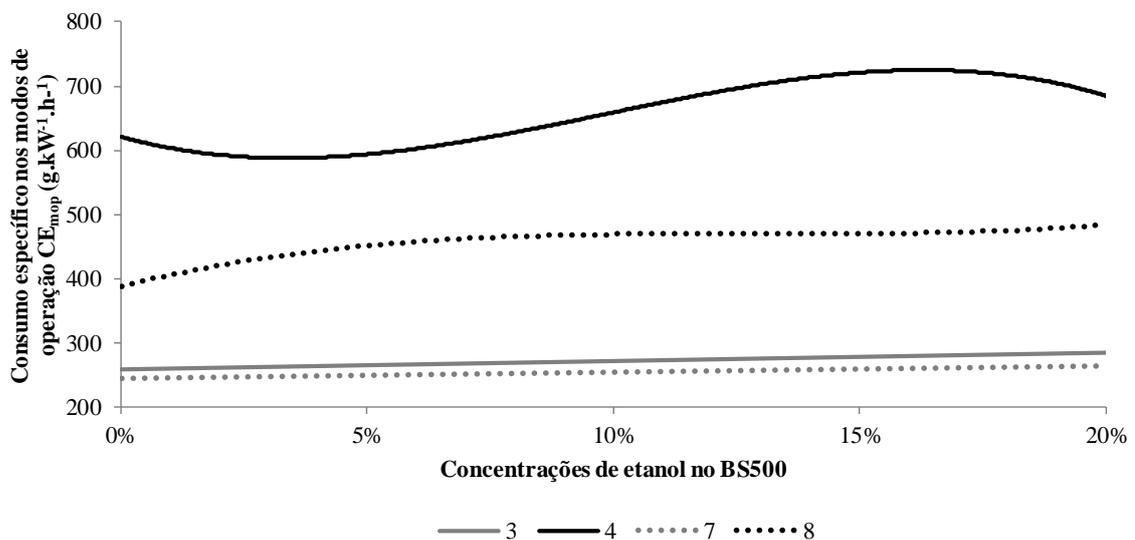
Shamun et al. (2018) em seu trabalho concluíram que na grande maioria dos pontos de operação testados, o consumo específico de combustível é maior para os combustíveis oxigenados do que para o óleo Diesel (ULSD). No entanto, devido à sua menor densidade de energia e, conseqüentemente, a maior razão ar/combustível, nas operações em altas cargas o consumo específico de combustível é menor para os combustíveis oxigenados (biodiesel e etanol anidro) do que para o óleo Diesel, apresentando alto rendimento térmico.

Para Park et al. (2012), com uma carga baixa do motor (30%), a mistura de etanol causou um aumento no consumo específico na ordem de 30,2%. Nesta condição, o etanol atrapalhou a combustão devido ao baixo número de cetano, que foi responsável pelo aumento repentino do consumo específico nos combustíveis com concentrações de 10% e 20% de etanol anidro. Já em altas cargas do motor (90%), o consumo específico aumentou apenas 9,6%. De acordo com o aumento da quantidade de injeção correspondente à carga do motor, o oxigênio componente do etanol melhorou a atividade e a qualidade da combustão. Portanto, na condição de alta carga do motor, o consumo específico do combustível com 20% de etanol foi apenas ligeiramente superior em comparação com o óleo Diesel (ULSD).

Os modos de operação 1, 2, 5, 6 e 7 representam pontos de funcionamento do motor que abrange 60% das atividades desenvolvidas por uma máquina agrícola segundo a ABNT NBR ISO 8178-4. Somado ao modo 4, que não apresentou diferença significativa no consumo específico de combustível do BS500 puro até a concentração de 15% de etanol, é possível afirmar que, em 70% das operações agrícolas a utilização de 15% de etanol anidro aditivado no BS500 não apresenta diferença estatística no consumo específico de combustível. Para a concentração de 10% de etanol, esta mesma relação sobe para 90% das atividades agrícolas em que o consumo específico é o mesmo do BS500 puro.

Na Figura 56 estão representadas, para o combustível BS10, as curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), e na Tabela 37 as equações e os coeficientes de determinação.

Figura 56 - Representação das curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500



Fonte: Autor.

Tabela 37 - Equações das curvas de regressão do consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $CE_{mop}$ ), juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para as misturas de etanol com óleo Diesel BS500

Modo	Equações	$R^2$
1	não significativo	
2	não significativo	
3	$y = 129,06x + 259,01$	$R^2 = 0,91$
4	$y = -127132x^3 + 37517x^2 - 2098,4x + 620,69$	$R^2 = 0,80$
5	não significativo	
6	não significativo	
7	$y = 100,14x + 244,15$	$R^2 = 0,58$
8	$y = 38589x^3 - 14898x^2 + 1914,3x + 387,77$	$R^2 = 0,87$

Fonte: Autor.

Na Tabela 38 estão descritos os resultados da análise de variância, para os valores médios ponderados de consumo horário ( $V_{mp}CH_{mop}$ ) e específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ ), nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4. Houve diferença significativa entre todos os fatores de variação, sendo eles os combustíveis (C), concentrações de etanol (E) e a interação combustíveis e concentrações de etanol (C x E), exceto para o  $V_{mp}CH_{mop}$  no fator de variação combustíveis.

Tabela 38 - Resumo da ANOVA com os valores dos quadrados médios para os parâmetros de valor médio ponderado de consumo horário de combustível ( $V_{mp}CH_{mop}$ ) e o valor médio ponderado de consumo específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ ) no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para os fatores de variação combustíveis (C), concentrações de etanol (E), a interação (C x E), o coeficiente de variação (CV) e a média geral

Fatores de variação	Quadrados médios	
	$V_{mp}CH_{mop}$ ( $L.h^{-1}$ )	$V_{mp}CE_{mop}$ ( $g.kW^{-1}.h^{-1}$ )
Combustíveis (C)	0,017	582,366*
Concentrações de etanol (E)	0,218*	1304,46*
C x E	0,057*	140,079*
CV (%)	0,77	2,82
Média geral	10,60	199,66

\* Efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

O teste de médias, da interação entre combustíveis e concentrações de etanol nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 (C x E), está descrito na Tabela 39. Para o valor médio ponderado de consumo horário de combustível ( $V_{mp}CH_{mop}$ ), o combustível BS10 obteve resultados 0,97% e 0,85% superiores, em relação ao BS500, nas concentrações de 0% e 10% de etanol. Já o combustível BS500 apresentou maior consumo nas concentrações de 15% e 20% de etanol, com valores 0,85% e 1,84% superiores ao BS10. Na concentração de 5% de etanol não houve diferença significativa entre o BS10 e BS500 para o valor médio ponderado de consumo horário de combustível.

Tabela 39 - Resultados do teste de médias do desdobramento dos combustíveis dentro de cada nível das concentrações de etanol, no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4, para o valor médio ponderado de consumo horário de combustível ( $V_{mp}CH_{mop}$ ) e o valor médio ponderado de consumo específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ )

Combustíveis	Concentrações de etanol				
	0%	5%	10%	15%	20%
	----- $V_{mp}CH_{mop}$ (L.h <sup>-1</sup> ) -----				
BS10	10,46 <sup>aC*</sup>	10,54 <sup>aBC</sup>	10,71 <sup>aA</sup>	10,55 <sup>bBC</sup>	10,65 <sup>bAB</sup>
BS500	10,36 <sup>bC</sup>	10,60 <sup>aB</sup>	10,62 <sup>bB</sup>	10,64 <sup>aB</sup>	10,85 <sup>aA</sup>
Diferença (%)	-0,97%	0,57%	-0,85%	0,85%	1,84%
	----- $V_{mp}CE_{mop}$ (g.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ) -----				
BS10	180,1 <sup>bC</sup>	193,7 <sup>aB</sup>	210,9 <sup>aA</sup>	197,4 <sup>bB</sup>	201,8 <sup>bB</sup>
BS500	190,2 <sup>aC</sup>	197,6 <sup>aBC</sup>	206,5 <sup>aA</sup>	205,4 <sup>aAB</sup>	213,0 <sup>aA</sup>
Diferença (%)	5,31%	1,97%	-2,13%	3,89%	5,26%

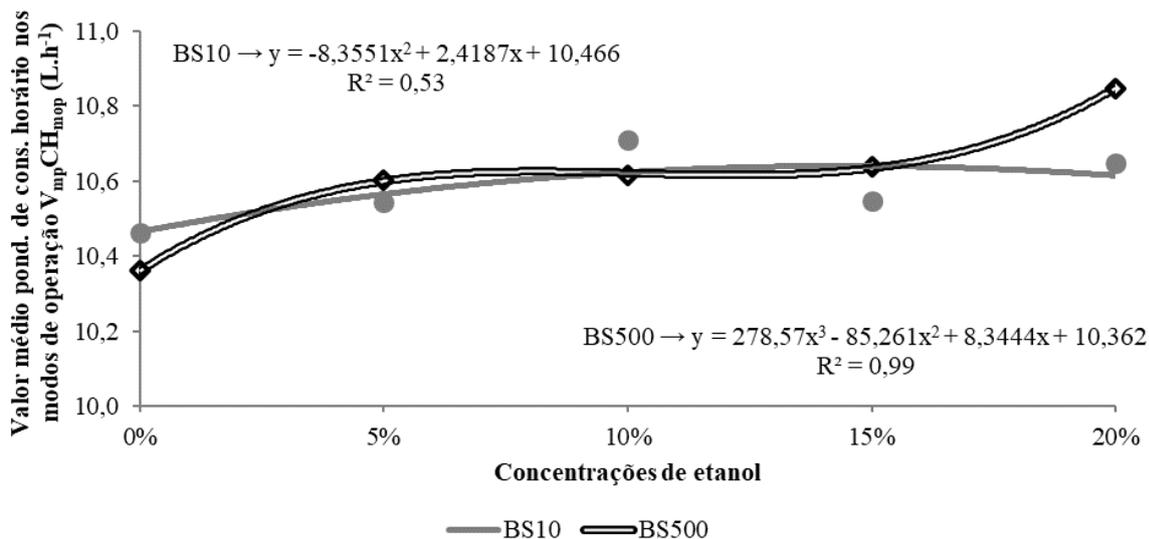
\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula para cada variável analisada na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Autor.

Os resultados do valor médio ponderado de consumo horário de combustível ( $V_{mp}CH_{mop}$ ), demonstram que entre as concentrações de etanol, o combustível BS10 apresentou diferença significativa entre os resultados (Tabela 39). O maior valor de consumo horário ponderado ocorreu para a concentração de 10% de etanol, com valor de 10,71 L.h<sup>-1</sup>, não diferindo estatisticamente do resultado com 20% de etanol. O menor consumo horário ocorreu no BS10 puro, apresentando valor de 10,46 L.h<sup>-1</sup>, não diferindo estatisticamente para as concentrações de 5% e 15% de etanol. Também, a mistura de BS10 com a concentração de 20% de etanol não diferiu estatisticamente para as misturas com 5% e 15% de etanol.

Na Figura 57 é possível visualizar que a curva de regressão do BS10, para o valor médio ponderado de consumo horário de combustível ( $V_{mp}CH_{mop}$ ), aumenta dos 0% aos 10% de concentração de etanol, se mantém estável até os 15% e decresce após, até os 20% de etanol. As diferenças percentuais do valor médio ponderado de consumo horário, das concentrações de etanol em relação ao BS10 puro, em ordem crescente foram 0,76%, 0,86%, 1,82% e 2,39%, respectivamente para 5%, 15%, 20% e 10% de etanol.

Figura 57 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de consumo horário de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}CH_{mop}$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



Fonte: Autor.

Os resultados do valor médio ponderado de consumo horário de combustível ( $V_{mp}CH_{mop}$ ), demonstram que entre as concentrações de etanol, o combustível BS500 também apresentou diferença significativa entre os resultados (Tabela 39). O maior valor de consumo horário ponderado ocorreu para a concentração de 20% de etanol, com valor de 10,85 L.h<sup>-1</sup>. O menor consumo horário ocorreu no BS500 puro, apresentando valor de 10,36 L.h<sup>-1</sup>. O consumo horário ponderado do BS500 em misturas com concentrações de 5%, 10% e 15% de etanol não diferiu estatisticamente, e apresentou valores intermediários.

Na Figura 57 é possível visualizar que a curva de regressão do BS500, para o valor médio ponderado de consumo horário de combustível ( $V_{mp}CH_{mop}$ ), aumenta dos 0% aos 5% de

concentração de etanol, se mantém estável até os 15% e volta a aumentar após, até os 20% de etanol. As diferenças percentuais do valor médio ponderado de consumo horário, das concentrações de etanol em relação ao BS500 puro, em ordem crescente foram 2,32%, 2,51%, 2,70% e 4,73%, respectivamente para 5%, 10%, 15% e 20% de etanol.

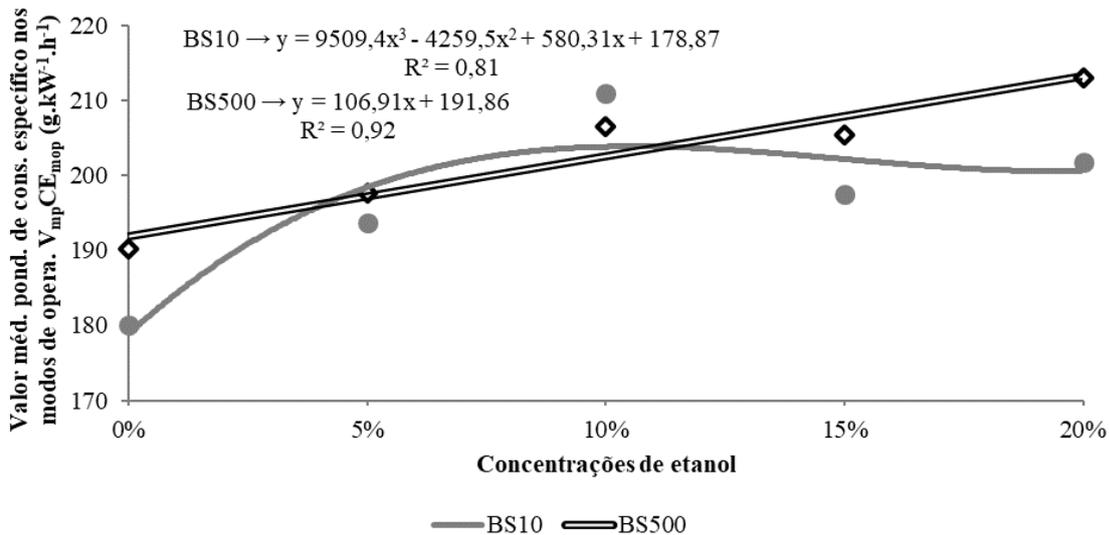
Para o valor médio ponderado de consumo específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ ), o combustível BS500 apresentou maiores valores, em relação ao BS10, nas concentrações de 0%, 15% e 20% de etanol, com resultados 5,31%, 3,89% e 5,26% superiores, respectivamente (Tabela 39). Nas concentrações de 5% e 10% de etanol não houve diferença estatística entre o BS10 e BS500, para o valor médio ponderado de consumo específico de combustível.

Os resultados do valor médio ponderado de consumo específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ ), demonstram que entre as concentrações de etanol, o combustível BS10 apresentou diferença significativa entre os resultados (Tabela 39). O maior valor de consumo específico ponderado ocorreu para a concentração de 10% de etanol, com valor de  $210,9 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . O menor consumo específico ponderado ocorreu no BS10 puro, apresentando valor de  $180,1 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . As concentrações de 5%, 15% e 20% de etanol apresentaram valores intermediários, e não houve diferença significativa entre estes valores.

Na Figura 58 é possível visualizar que a curva de regressão do BS10, para o valor médio ponderado de consumo específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ ), aumenta dos 0% aos 5% de etanol, tende a estabilizar o crescimento até os 10% de concentração de etanol, e decresce após, até os 20% de etanol. As diferenças percentuais do valor médio ponderado de consumo específico, das concentrações de etanol em relação ao BS10 puro, em ordem crescente foram 7,55%, 9,61%, 12,05% e 17,10%, respectivamente para 5%, 15%, 20% e 10% de etanol.

Já para o BS500, os resultados do valor médio ponderado de consumo específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ ) demonstram que entre as concentrações de etanol, houve diferença significativa entre os resultados (Tabela 39). Os maiores valores de consumo específico ponderado ocorreram para as concentrações de 10% e 20% de etanol, com valores de  $206,5 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$  e  $213 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . O resultado de consumo específico ponderado com 15% de etanol não diferiu dos resultados com 5%, 10% e 20% de etanol. O menor consumo específico ponderado ocorreu no BS500 puro, apresentando valor de  $190,2 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ .

Figura 58 - Representação das curvas de regressão do valor médio ponderado de consumo específico de combustível nos modos de operação da norma ABNT NBR ISO 8178-4 ( $V_{mp}CE_{mop}$ ), dentro de cada nível das concentrações de etanol em misturas com óleo Diesel BS10 e BS500, e as respectivas equações e os coeficientes de determinação ( $R^2$ )



Fonte: Autor.

Na Figura 58 é possível visualizar que a curva de regressão do BS500, para o valor médio ponderado de consumo específico de combustível ( $V_{mp}CE_{mop}$ ), aumenta linearmente com o acréscimo de etanol na mistura. As diferenças percentuais do valor médio ponderado de consumo específico, das concentrações de etanol em relação ao BS500 puro, em ordem crescente foram 3,89%, 7,99%, 8,57% e 11,99%, respectivamente para 5%, 15%, 10% e 20% de etanol.

Os valores médios ponderados de consumo horário e consumo específico de combustível simulam a utilização do trabalho do trator em campo, com diversas porcentagens de ponderação para cada modo de operação da ABNT NBR ISO 8178-4. Estas ponderações padronizam as diversas atividades realizadas por uma máquina agrícola, resultando em um valor médio para permitir a comparação entre os valores médios de emissões e os limites das normativas.

#### 4.7.1 Considerações do ensaio de consumo de combustível nos modos de operação

A metodologia proposta no presente trabalho, para avaliar o consumo de combustível nos modos de operação, demonstrou que os resultados obtidos divergem das médias do ensaio dinamométrico a plena carga (Tabela 10 – Página 115). No teste dinamométrico a plena carga,

as maiores diferenças entre o consumo específico ocorreram em ambos os combustíveis, BS10 e BS500, para a concentração de 20% de etanol, com valores 5,95% e 7,90% superiores aos combustíveis puros, respectivamente.

Já no ensaio de consumo de combustível nos modos de operação, o incremento das concentrações de etanol nos combustíveis impactou em maiores diferenças percentuais. Para o BS10, o maior consumo específico ocorreu na concentração de 10% de etanol, com diferença de 17,10% para o combustível puro, e aos 20% de etanol o consumo foi 12,05% superior. Para o BS500, os maiores consumos específicos, com valores que não diferiram estatisticamente, ocorreram nas concentrações de 10% e 20% de etanol, com valores 8,57% e 11,99% superiores, respectivamente. Nota-se que dentre os combustíveis, o BS500 apresentou melhor desempenho no ensaio de consumo específico nos modos em relação ao BS10, devido as menores diferenças percentuais entre as concentrações de etanol.

Também no ensaio dinamométrico a plena carga, o BS10 e o BS500 puros não apresentaram diferença significativa para a concentração de 5% de etanol. Já para o ensaio de consumo nos modos de operação, o BS10 puro apresentou diferença significativa para a concentração de 5% de etanol, sendo que a concentração de 5% de etanol não apresentou diferença estatística para os resultados nas concentrações de 15% e 20% de etanol. Já o BS500 puro não apresentou diferença estatística para a concentração de 5% de etanol, e a concentração de 15% de etanol não apresentou diferença estatística para a concentração de 5% de etanol. Isso ressalta a necessidade de metodologias para a avaliação de máquinas agrícolas e combustíveis com uma maior aproximação do que realmente ocorre no trabalho em campo. Um combustível pode apresentar distintos desempenhos, seja ele em um ensaio dinamométrico em plena carga ou nas diversas atividades e demandas de potência do meio agrícola.

## 5 CONCLUSÕES

Com a análise dos principais resultados da bibliografia que utilizam misturas de etanol com óleo Diesel (D:E), é possível concluir que com a utilização de etanol ocorre a tendência do aumento do consumo específico de combustível e a diminuição das emissões de material particulado. Para o desempenho de torque e potência, e as emissões de CO, HC e NO<sub>x</sub>, os resultados divergem, variando conforme tipo de motor, combustíveis, condições de ensaio, dentre outros fatores.

Quando são selecionados apenas os trabalhos que usam misturas de óleo Diesel, biodiesel e etanol (D:B:E), com gerenciamento eletrônico da injeção de combustível e sistema de tratamento de gases EGR, constata-se o aumento do consumo específico de combustível, aumento das emissões de CO e HC (principalmente em baixas e médias cargas), e a diminuição das emissões de NO<sub>x</sub> e MP.

No ensaio de desempenho do motor, que com o aumento das concentrações de etanol, tanto o BS10 quanto o BS500 apresentam diminuição do torque e potência, e aumento nos consumos horário e específico de combustível. As exceções ficam para o combustível BS500 com 5% de etanol para os resultados de torque e potência, onde apresentam valores 0,62% e 0,57% superiores ao BS500 puro, respectivamente. Também no consumo específico de combustível, do BS10 e BS500 na concentração de 5% de etanol, onde não há diferença significativa para a concentração de 0% de etanol.

Dentre os resultados de desempenho máximo do motor no ensaio dinamométrico, ocorre também a diminuição do desempenho de torque máximo e potência máxima com o acréscimo de etanol na mistura. As exceções foram no torque máximo para o combustível BS500, nas concentrações até 10% de etanol, onde não há diferença nos resultados de desempenho em relação ao BS500 puro, e na potência máxima para o BS500 nas concentrações até 15% de etanol, onde também não há diferença para o BS500 puro.

Em relação as emissões de gases, o CO aumenta com o incremento de etanol na mistura, sendo que com 20% de etanol, as emissões não excedem os valores limites da MAR-1 e Euro V. Já as emissões de HC não apresentam relação com aumento das concentrações de etanol nos combustíveis, e também não supera o valor limite estabelecido pela Euro V. Dentre os combustíveis, o BS10 tem menores emissões de CO e HC em relação ao BS500.

Para as emissões de NO<sub>x</sub>, com o aumento das concentrações de etanol ocorre o aumento das emissões de NO<sub>x</sub>, com tendência a estabilização dos valores próximo a concentração de 20% de etanol. Todas as emissões de NO<sub>x</sub> superam os limites da norma Euro V. A comparação

das emissões de  $\text{NO}_x$  com a MAR-1 não foi realizada devido esta normativa utilizar para análise o somatório de  $\text{HC} + \text{NO}_x$ , sendo equivalente a Euro IIIA. Dentre os combustíveis o BS500 apresenta menores emissões de  $\text{NO}_x$ , em relação ao BS10, até a concentração de 10% de etanol, não apresentando diferença significativa após.

Devido aos valores de emissões específicas do  $\text{NO}_x$  serem superiores ao HC, as emissões de  $\text{HC} + \text{NO}_x$  ocorrem de forma similar ao ocorrido para o  $\text{NO}_x$ . Com o incremento das concentrações de etanol ocorre o aumento das emissões de  $\text{HC} + \text{NO}_x$ , com tendência a estabilização dos valores próximo a concentração de 20% de etanol. Apenas as emissões para os combustíveis com 0% de etanol atendem aos limites estabelecidos pela MAR-1. O BS500 tem menores emissões dos  $\text{HC} + \text{NO}_x$  em relação ao BS10 até a concentração de 10% de etanol, e após apresenta maiores emissões que o BS10, até os 20% de concentração de etanol.

Em relação ao material particulado, com o incremento das concentrações de etanol ocorre a diminuição das emissões de MP, sendo que todos os resultados atendem as normativas MAR-1 e Euro V. Para os combustíveis com concentração de 0% de etanol, o BS500 obteve menores emissões do que o BS10, e para os combustíveis em mistura com o etanol ocorre o inverso, com o BS10 apresentando menores emissões.

Os resultados de consumo de combustível nos modos de operação da ABNT NBR ISO 8178-4 ocorrem de forma distinta dos resultados médios obtidos no ensaio dinamométrico a plena carga. Constata-se que com o incremento de etanol nas misturas, não ocorre um comportamento linear de aumento do consumo horário e específico de combustível, como no ensaio dinamométrico a plena carga, além de diferenças percentuais maiores. Isto expõe a necessidade de metodologias para avaliação de máquinas nas condições reais enfrentadas a campo, pois um combustível pode apresentar distintos desempenhos, seja a plena carga em um ensaio dinamométrico, em ensaios reais a campo ou em simulações de cargas das atividades cotidianas realizadas no meio agrícola.

Dentre os resultados, os menores valores do valor médio ponderado de consumo horário nos modos de operação ocorrem para os combustíveis com 0% de etanol (puros). Não há diferença estatística entre os resultados do BS10 puro para as concentrações de 5% e 15% de etanol, e também para o BS500 entre as concentrações de 5% e 15% de etanol.

Já para o valor médio ponderado do consumo específico de combustível nos modos de operação, os menores valores ocorrem para os combustíveis com 0% de etanol. Para o BS10, as concentrações de 5%, 15% e 20% não apresentam diferença estatística nos valores de consumo específico. Já para o BS500, a concentração de 5% de etanol não apresenta diferença estatística nos resultados de consumo específico para as concentrações de 0% e 15% de etanol.

## **6 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Analisar a viabilidade econômica da utilização de etanol aditivado em misturas com óleo Diesel mineral. Construir cenários de inserção de percentuais no óleo Diesel comercializado no mercado brasileiro, como uma alternativa de combustível renovável em relação ao biodiesel.

Avaliar outros modelos de motores, pois o comportamento pode ser diferente. Utilizar também motores sem gerenciamento eletrônico da injeção de combustível ou com a adoção de outro sistema de tratamento de gases, como o SCR. Variar a atuação da válvula EGR, simulando maior ou menor quantidade de gases na recirculação.

Atuar na programação eletrônica do motor (mapas de injeção), variando a quantidade e o ponto de injeção de combustível

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 1585**. Veículos rodoviários - Código de ensaio de motores - Potência líquida efetiva. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7148**: 2013. Petróleo e derivados de petróleo – Determinação da massa específica, densidade relativa e °API – Método do densímetro. Rio de Janeiro, 2013

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 8178-4**: motores alternativos de combustão interna - medição das emissões de gases de exaustão. Parte 4: ciclos de ensaio em regime constante para diferentes aplicações do motor. Rio de Janeiro, 2012.

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.

AGARWAL, A. K.; GUPTA, J. G.; DHAR A. Potential and challenges for large-scale application of biodiesel in automotive sector. **Progress in Energy and Combustion Science**, 2017.

ALI, Y.; HANNA, M. A.; BORG, J. E. Optimization of diesel, methyl tallowate and ethanol blend for reducing emissions from diesel engine. **Bioresource Technology**. 1995; 52:237–43. DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(95\)00033-B](https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00033-B).

AL-HASSAN, M.; MUJAFET, H.; AL-SHANNAG, M. An experimental study on the solubility of a diesel-ethanol blend and on the performance of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 6, n. 2, p. 147–153, 2012

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. 2016. **Cartilha MAR-1**. 2016. São Paulo: ANFAVEA Disponível em: < <https://goo.gl/GqrRoU> >. Acesso em: 5 jun. 2018.

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. 2013.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 45, de 25.8.2014 – DOU 26.8.2014**. 2014. Disponível em: < <https://goo.gl/J9h4kk> >. Acesso em: 05 jul. 2018.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 19, de 15.04.2015 – DOU 16.04.2015- Republicada DOU 20.04.2015**. 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/kn8Cjs>>. Acesso em 09 Jul. 2018.

ARAPATSAKOS, C. Application of diesel–ethanol mixtures in tractor engine. **International Journal of Energy and Environment**. 2009; 3:77–84.

ARMAS, O.; CÁRDENAS, M. D.; MATA, C. Smoke Opacity and NO<sub>x</sub> Emissions from a Bioethanol-Diesel Blend during Engine Transient Operation. **SAE Technical Papers**, vol. 15, 2007. <https://doi.org/10.4271/2007-24-0131>.

ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers. **ASAE EP496.3**. Agricultural Machinery Management Data. St. Joseph, 2006. p. 384 – 390, 7p.

ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers. **ASAE D497.7**. Agricultural Machinery Management Data. St. Joseph, 2015. p. 1 – 14, 14p.

BARABÁS, I.; TODORUT, I-A. Utilization of Biodiesel-Diesel-Ethanol Blends in CI Engine. In: Montero G, editor. **Biodiesel – Quality, Emissions and By-Products**, Rijeka (Croácia): InTech Published; 2011, p. 215–34.

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.

BEATRICE, C.; NAPOLITANO, P.; GUIDO, C. Injection parameter optimization by DoE of a light-duty diesel engine fed by Bio-ethanol/RME/diesel blend. **Applied Energy**, v. 113, p. 373–384, Jan. 2014.

BERTINATTO, R. et al. Typical performance behavior of a Diesel cycle agricultural tractor engine with electronic injection management and turbocharge. **Ciência Rural**, Santa Maria, 2021.

BIETRESATO, M. et al. Use of diesel-biodiesel-bioethanol blends in farm tractors: first results obtained with a mixed experimental-numerical approach. **Energy Procedia** 2019;158:965–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.237>.

BORETTI, A. Advantages of converting Diesel engines to run as dual fuel ethanol-Diesel, **Applied Thermal Engineering**. v. 47, 9p., 2012.

BOSCH; **Sistemas de injeção eletrônica Diesel**. Catálogo Técnico, Campinas – SP, 74p., 2016.

BOSCH; Funcionamento do sistema *Common Rail* de injeção eletrônica Diesel. Wahnfried, 5 p., 2018. Disponível em: < <https://goo.gl/YCCETk> >. Acesso em 22 Fev. 2019.

BRIJESH, P.; SREEDHARA, S. Exhaust emissions and its control methods in compression ignition engines: a review. **Internacional Journal of Automotive Technology**, v.14, n.2, p.195-206, 2013.

CAMPOS, T. A. R. **Análise da capacidade de produção de energia de sistemas de cogeração por meio da biomassa e sua representação na matriz energética brasileira**. 2010. 54f. Monografia (Conclusão de Curso) - Engenharia de Produção, Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2010. Disponível em: < <https://goo.gl/Vjo6kC> >. Acesso em 09 Jul. 2018.

- 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, Sep. 2004.
- CAN, Ö.; ÇELIKTEN, İ.; USTA, N. Effects of Ethanol Blended Diesel Fuel on Exhaust Emissions from a Diesel Engine. **Journal of Engineering Sciences**. 2005;11:219–24.
- CASTILLO-HERNÁNDEZ, P. MENDOZA-DOMÍNGUEZ, A. CABALLERO-MATA, P. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y Diesel mexicanos reformulados com etanol. **Ingeniería Investigación y Tecnología**. v. 13, n. 3, p. 293-306, 2012.
- CECH, R; TOMCÍK, P. Measurement of combustion engine porwer characteristics, correction factors. **Transactions of the VSB – Technical Universitu of Ostrava, Mechanical Series**, v. LVI, n. 1, p. 31-39, 2010.
- CHALLENGER B, BARANESCU. R. **Diesel engine reference book**. 2nd ed.. England: Butterworth and Heinemann Publishing; 1999.
- CHAUHAN, B.S. et al. A study on the performance and emission of a Diesel engine fueled with Karanja biodiesel and its blends. **Energy**, v.56, p.1-7, 2013. DOI:10.1016/j.energy.2013.03.083.
- CHEN, H. et al. Study of oxygenated biomass fuel blends on a diesel engine. **Fuel** 2008;87:3462–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.034>.
- CHEN, Z.Q. et al. Physical-chemical properties of ethanol- Diesel blend fuel and its effect on the performance and emissions of a turbocharged Diesel engine. **International Journal of Automotive Technology**, v.10, n.3, p.297-303, Jun. 2009. DOI: 10.1007/s12239-009-0034-0.
- CHEENKACHORN, K; FUNGTAMMASAN, B. An investigation of Diesel–ethanol–biodiesel blends for Diesel engine: Part 2 – emission and engine performance of a light-duty truck. **Energy Sources, Part A: Recov, Util Environ Effects**. p. 894-900, v. 32, 2010.
- COLE, R. L. et al. Effect of Ethanol Fuel Additive on Diesel Emissions. **Technology** 2000:52.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n° 433, de 13 de julho de 2011. 2011. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=654>>. Acesso em: 23 fev. 2021.
- CORKWELL, K. C.; JACKSON, M. M.; DALY, D.T. Review of exhaust emissions of compression ignition engines operating on e diesel fuel blends. **SAE Technical Papers**, vol. 1, 2003. <https://doi.org/10.4271/2003-01-3283>.
- CRUZ, Y. R. **Combustíveis alternativos: Mistura de etanol anidro ao óleo diesel para motores de ciclo diesel com sistema de injeção de bomba rotativa**. Tese ((Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

DEEP, A.; SANDHU, S. S.; CHANDER, S. Experimental investigations on the influence of fuel injection timing and pressure on single cylinder C.I. engine fueled with 20% blend of castor biodiesel in Diesel. **Fuel**, v.210, p.15-22, 2017.

DIN. Deutsches Institut Fur Normung. **DIN 70020**: Automotive Engineering; Maximum Speed; Acceleration and Other Terms; Definitions and Tests. German National Standard, 1986

DUDA, K. et al. Comparison of performance and emissions of a CRDI Diesel engine fueled with biodiesel of different origin. **Fuel**. n.212, 202-222, 2018.

EIA. Energy Information Administration . **U.S. fuel ethanol production capacity increased by 3% in 2019**, 2020. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=45316> >. Acesso em 27 out. 2020.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2016: Relatório Final – ano base 2015**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: < <https://goo.gl/t8Z8Tj> >. Acesso em 09 Jul. 2018.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017: Relatório Final – ano base 2016**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: < <https://goo.gl/B7p5Td> >. Acesso em 09 Jul. 2018.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2018: Relatório Final – ano base 2017**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: < <https://goo.gl/sPKNeB> >. Acesso em 03 Dez. 2018.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2019: Relatório Final – ano base 2018**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>. Acesso em 10 Jun. 2020.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2020: Relatório Final – ano base 2019**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf)>. Acesso em 23 Out. 2020.

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.

ESTRADA, J. S. et al. Desempenho de um motor agrícola usando misturas de Diesel e etanol. **Cienc. Rural** , Santa Maria, v. 46, n. 7, p. 1200-1205, 2016a. Disponível em: < <https://goo.gl/UT9B6r> >. Acesso em: 09 de julho de 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20150469>.

ESTRADA, J. S. et al. Emissões de gases poluentes de um motor ciclo Diesel utilizando misturas de biocombustíveis. **Agrarian**. Dourados, v. 9, n. 33, p. 274-279, 2016b. Disponível em: < <https://goo.gl/gLzXpB> >. Acesso em: 12 Jul. 2018.

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

FARIAS, M. S. de et al. Performance of an agricultural engine using mineral Diesel and ethanol fuels. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 3, 2017a. Disponível em: < <https://goo.gl/4aDCx7> >. Acesso em 09 Jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20151387>

FARIAS, M. S. de et al. Eficiência no consumo de combustível de um trator agrícola equipado com transmissão continuamente variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 6, 2017b. Disponível em < <https://goo.gl/rsX9tJ> >. Acesso em 11 Mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20160>

FARIAS, M. S. de et al. Emissions of an agricultural engine using blends of diesel and hydrous ethanol. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 7, 15 Feb. 2019.

FARIAS, M. S.; SCHLOSSER, J. F. **Ensaio de Motores Ciclo Diesel**. Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 1, n. 1, 2018.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**. v.38, n.2 p. 109-112, 2014.

FERREIRA, V. P. et al. Performance and emissions analysis of additional ethanol injection on a diesel engine powered with A blend of diesel-biodiesel. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 6, p. 649–657, Dec. 2013.

FIORESE, D. A. et al. Desempenho de um motor de trator agrícola em bancada dinamométrica com biodiesel de óleo de frango e misturas binárias com óleo Diesel. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 4, p. 660-666, 2012. Disponível em: < <https://goo.gl/utrpfg> >. Acesso em 09 Jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012000400013>.

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

GERALD LIU, Z. et al. Analysis of C1, C2, and C10 through C33 particle-phase and semi-volatile organic compound emissions from heavy-duty diesel engines. **Atmospheric Environment**, v.44, n.8, p.1108-1115, 2010.

GIAKOUMIS, E. G.; RAKOPOULOS, C. D.; DIMARATOS, A. M.; RAKOPOULOS, D.C. Exhaust emissions with ethanol or n-butanol diesel fuel blends during transient operation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.17, p. 170–190, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.017>

GOERING, C.E. **Engine and tractor power**. St. Joseph: ASAE, 1992. 3º ed., 539 p.

GUARIEIRO, L. L. N. et al. Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> 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.

GUEDES, A. D. M. **Estudo Experimental sobre o Impacto do Etanol em Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol nos Motores de Ignição por Compressão**. 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2017.

GUEDES, A. D. M.; BRAGA, S. L.; PRADELLE, F. Performance and combustion characteristics of a compression ignition engine running on Diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends – Part 2: Optimization of injection timing. **Fuel**. v. 225, p. 174-183, 2018. Disponível em: <<https://goo.gl/1Q56RY>>. Acesso em 09 jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.120>.

GUIDO, C.; BEATRICE C.; NAPOLITANO, P. Application of bioethanol/RME/diesel blend in a Euro5 automotive diesel engine: Potentiality of closed loop combustion control technology. **Applied Energy**. 2013; 102:13–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.051>.

HANSEN, A. C.; ZHANG, Q.; LYNE, P. W. L. Ethanol – diesel fuel blends – a review. **Bioresource Technology**. v.96, p. 277-285, 2005. doi:10.1016/j.biortech.2004.04.007

HE, B.; SHUAI, S.; WANG, J.; HE, H. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. **Atmos Environ** 2003;37:4965–71.

HESEDING, M; NITSCHKE, M.; SLAMA, J. **Exhaust emission legislation Diesel and gas engines**. VDMA: Engines and Systems, 2010.

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, p. 5042–5055, 2011.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook**, 2017. Disponível em: <<https://goo.gl/ZAAvg>>. Acesso em 09 jul. 2018.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 14396:2002**. Reciprocating internal combustion engines — Determination and method for the measurement of engine power — Additional requirements for exhaust emission tests in accordance with ISO 8178. Genebra, 2002.

IACONO, G. E. P. **Desempenho do motor de um trator agrícola utilizando misturas Diesel-biodiesel-etanol**. 2017. 98p. Dissertação (mestrado em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

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.

KASS M. D. et al. Emissions From a 5.9 Liter Diesel Engine Fueled With Ethanol Diesel Blends. **SAE Technical Papers**, vol. 1, 2001. DOI: <https://doi.org/10.4271/2001-01-2018>.

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-gerador.** 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2016.

KLAJN, F. F. et al. Comparison of the emissions and performance of ethanol-added diesel–biodiesel blends in a compression ignition engine with those of pure diesel. **Environmental Technology**, v. 41, n. 4, p. 511–520, 10 Feb. 2020.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, v.24, p.223-253, 2010. DOI: 10.1590/S0103-40142010000100017.

KUMAR, S.; CHO, A. H.; PARK, J.; MOON, I. Advances in diesel–alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.22, p.46–72, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.017>

KWANCHAREON, P.; LUENGNARUEMITCHAI, A.; JAIN-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. Disponível em: < <https://goo.gl/h1VnAE>>. Acesso em 09 jul. 2018. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.09.034.

LABECKAS, G.; SLAVINSKAS, S.; MAŽEIKI, 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, n. 2014, p. 698–720, Mar. 2014.

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

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.; HERREROS, J. M. Emissions from a diesel–bioethanol blend in an automotive diesel engine. **Fuel** v. 87, 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.

LIKOS, B.; CALLAHAN, T.J.; MOSES, C.A. Performance and emissions of ethanol and ethanol–diesel blends in direct–injected and pre–chamber diesel engines. **SAE Technical Papers**, vol. 1, 1982, p. 37–50. <https://doi.org/10.4271/821039>.

LILJEDAHL, J.B. et al. **Tractors and their power units**. St. Joseph: ASAE, 1996. 4º ed.

LÖFVENBERG, U. Short report from emission test using low blend of ethanol derivative in diesel fuel. Region, **Bio Fuel**, 2009.

MACHADO, P. R. M. **Avaliação de desempenho do óleo de soja como combustível para motores diesel**. 2003. 212 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

MACHADO, P. R. M. **Ésteres combustíveis em motor de ciclo diesel sob condições de pré-aquecimento e variação no avanço da injeção**. 2003. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

MAGAND, S. et al. Utilisation d'un carburant diesel éthanolé à l'aide de méthodes de calibration avancées afin de satisfaire les normes euro 5 sans filtre à particules. **Oil and Gas Science and Technology**, 2011;66:855–75. DOI: <https://doi.org/10.2516/ogst/2011136>.

MÁRQUEZ, L. **Tractores Agrícolas: Tecnología y utilización**. España: B&H Grupo Editorial, 2012. 844 p.

MAZIERO, J. V. G. et al. Avaliação de emissões poluentes de um motor Diesel utilizando biodiesel de girassol como combustível. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 14, n. 4, p. 287-292, 2006.

MAZZARO, R. S. et al. Numerical analysis of the air flow in internal combustion engine intake ducts using Herschel-Quincke tubes. **Applied Acoustics**, Aug. 2020. v. 165.

MEIRING, P. et al.. Tractor Performance and Durability with Ethanol-Diesel Fuel. **Transactions of the ASAE**. 1983; 26:0059–62. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.33876>.

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

MIRAVALL, C. et al. Influence of Selective Catalytic Reduction (SCR) system on stainless steel durability. **Revista Escola de Minas**, v.66, n.2, p.153-158, 2013.

MOFIJUR, M.; RASUL, M. G.; HYDE, J.; AZAD, A. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.046>

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. 98p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

NICULESCU, R.; CLENCI, A.; IORGA-SIMAN, V. Review on the use of diesel-biodiesel-alcohol blends in compression ignition engines. **Energies**, v. 12, n. 7, p. 1–41, 2019.

NIETIEDT, G. H. et al. Performance evaluation of a direct injection engine using different blends of soybean (*Glycine max*) methyl biodiesel. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.5, p.916-922, 2011.

OLIVEIRA, A. DE et al. Combustion characteristics, performance and emissions from a diesel power generator fuelled by B7-ethanol blends. **Fuel Processing Technology**, v. 139, n. X, p. 67–72, Nov. 2015.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. **Tractores – Técnica y seguridad**. España. Mundi-Prensa, 222 p., 2012.

PAN, H. et al. Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 39, n. 21, p. 11336-11345, 2014. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.010

PANG, X. et al. Characteristics of carbonyl compounds emission from a Diesel-engine using biodiesel–ethanol– Diesel as fuel. **Atmospheric Environment**, v.40, p. 7057–7065, 2006.

PANWAR, N.L. et al. Performance evaluation of a Diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil. **Applied Thermal Engineering**. 2010.

PARK, S. H. H.; CHA, J.; LEE, C. S. S. Effects of bioethanol-blended diesel fuel on combustion and emission reduction characteristics in a direct-injection diesel engine with exhaust gas recirculation (EGR). **Energy and Fuels**, v. 24, n. 7, p. 3872–3883, 2010.

PARK, S. H. et al. Effect of Bioethanol Blended Diesel Fuel and Engine Load on Spray, Combustion, and Emissions Characteristics in a Compression Ignition Engine. **Energy & Fuels**, v. 26, n. 8, p. 5135–5145, 16 Aug. 2012.

PARK, S. H.; YOUN, I. M.; LEE, C. S. Influence of ethanol blends on the combustion performance and exhaust emission characteristics of a four-cylinder diesel engine at various engine loads and injection timings. **Fuel**, v. 90, n. 2, p. 748–755, Feb. 2011.

PEDROZO, V. B. et al. Experimental analysis of ethanol dual-fuel combustion in a heavy-duty diesel engine: An optimisation at low load. **Applied Energy**, v. 165, p. 166–182, Mar. 2016.

PENIDO FILHO, P. **O álcool combustível: obtenção e aplicação nos motores**. 1 ed. São Paulo: Nobel, 1981.

PEREIRA, C. M. P. et al. Biodiesel renovável derivado de microalgas: avanços e perspectivas tecnológicas. Artigo. **Rev. Química Nova**. Vol 35, nº 10. São Paulo. 2012. Disponível em: <<https://goo.gl/2RC3j5>>. Acesso em: 22 de out de 2018.

PERIN, G.F. **Desempenho e emissões de motor agrícola ciclo Diesel utilizando diferentes combustíveis**. 2014. 124f. Tese. (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PERIN, G. F. et al. Emissões de motor agrícola com o uso de diferentes tipos de Diesel e concentrações de biodiesel na mistura combustível. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 12, p. 1168-1176, 2015.

PICKETT, M. P.; SIEBERS, D. L. Soot in Diesel fuel jets: effect of ambient density, and injection pressure. **Combustion and Flame**, v. 138, n. 1–2, p. 114–135, 2004.

PIDOL, L. et al. Ethanol–biodiesel–Diesel fuel blends: Performances and emissions in conventional Diesel and advanced Low Temperature Combustions. **Fuel**, v.93, p. 329–338, 2012.

PILUSA, T. J. et al. Reduction of Vehicle Exhaust Emissions from Diesel Engines Using the Whale Concept Filter. **Aerosol and Air Quality Research**, v.12, n.5, p.994-1006, 2012. doi: 10.4209/aaqr.2012.04.0100.

PRADELLE, F. A. Y. **Use of biofuels in compression ignition engines: potential of Diesel-biodiesel-ethanol blends**. 2017. 302p. Tese. (Doutorado em Ciências – Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PRADELLE, F. et al. Performance and combustion characteristics of a compression ignition engine running on diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends e Potential as diesel fuel substitute on an Euro III engine. **Renewable Energy**. v. 136, 13p., p. 586-598, 2019.

RAHIMI, H. et al. Diesterol: an environment-friendly IC engine fuel. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 335–342, 2009.

RAKOPOULOS, D. C. et al. **Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol Diesel fuel blends in heavy-duty DI Diesel engine**. *Fuel*, v.90, p. 1855–1867, 2011.

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, n. 1, p. 98–103, Jan. 2011a.

RANDAZZO, M. L.; SODRÉ, J. R. Cold start and fuel consumption of a vehicle fuelled with blends of diesel oil–soybean biodiesel–ethanol. **Fuel**, v. 90, n. 11, p. 3291–3294, Nov. 2011b.

REYES, Y. **Combustíveis Alternativos: Mistura de Etanol Anidro ao Óleo Diesel para Motores de Ciclo Diesel com Sistema de Injeção de Bomba Rotativa**. 2009. 181f. Tese. (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

REYNOLDS, R. E. et al. **Changes in Diesel fuel**. 52p. 2007. Disponível em: <<https://goo.gl/iokYqd>>. Acesso em: 22 de fev. de 2019.

ROSA, H. A. et al. Avaliação das emissões de Monóxido de carbono (CO) em um motor-gerador ciclo Diesel utilizando Diesel e biodiesel. **Acta Iguazu**, p. 8-14, 2012;

ROSA, L. S. **Estação atmosférica portátil**. Desenvolvimento de protótipo. Santa Maria, 2018.

SATHIYAMOORTHY, R; SANKARANARAYANAN, G. The effects of using ethanol as additive on the combustion and emissions of a direct injection Diesel engine fuelled with neat lemongrass oil-Diesel fuel blend. **Renewable Energy**, p. 747-756, 2017. Disponível em: <<https://goo.gl/3cDQcj>>. Acesso em: 09 de jul. de 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.044>.

SATGÉ DE CARO, P. et al. Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines. **Fuel**. 2001;80:565–74.

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.

SCHLOSSER, J.F. et al. **Alcohol combustível: La experiencia de Brasil**. IV Premio Eladio Aranda. Editorial Agrícola Española. Madrid. 1995.

SCHLOSSER, J. F. et al. Anuário de tratores 2020. **Revista Cultivar Máquinas**. v. Agosto, 110p., 2020.

SCHLOSSER, J. F.; BERTINATTO, R.; HERZOG, D. As “diferentes” potências dos motores. **Revista Cultivar Máquinas**. v. Agosto, p.09, 2020.

SCHLOSSER, J. F.; MACHADO, P. R. M.; CAMARGO, M. N. Desempenho de misturas pré-aquecidas de óleo de soja cru e diesel como combustível para motores agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1329-1335, Oct. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782007000500017>.

SHAHIR, S. A. et al. Feasibility of Diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blend as existing CI engine fuel: An assessment of properties, material compatibility, safety and combustion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.32, p. 379–395, 2014.

SHAHIR, V. K.; JAWAHAR, C. P., SURESH, P. R. Comparative study of Diesel and biodiesel on CI engine with emphasis to emissions da review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015a.

SHAHIR, S. A.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; IMRAN, A.; ASHRAFUL, A. M. 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, 2015b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.049>

SHAMUN, S. et al. Performance and emissions of diesel-biodiesel-ethanol blends in a light duty compression ignition engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 145, n. December 2017, p. 444–452, Dec. 2018.

SHI, X. et al.. Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine. **Fuel**, 2005;84:1543–9. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.001>.

SHI, X. et al. Emission reduction potential of using ethanol–biodiesel–Diesel fuel blend on a heavyduty Diesel engine. **Atmospheric Environment**, v.40, p. 2567–2574, 2006.

SILVA, M.J. et al. Motor gerador ciclo Diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo Diesel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p. 320-326, 2012.

SILVEIRA, G. M.; GIL SIERRA, J.. Eficiência energética de tratores agrícolas fabricados no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 4, 2010.

SIMONE, M. et al. **El tractor agrícola: fundamentos para su selección y uso**. INTA, 2006.

SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P. **Engineering principles of agricultural machines**. Michigan: ASAE, 1996.

SUBBAIAH, G. V. V. et al. Rice Bran Oil Biodiesel As an Additive in Diesel- Ethanol Blends for Diesel Engines. **International Journal of Recent Research and Applied Studies**, v. 3, n. June, p. 334–342, 2010.

SUTAR, P. S. et al. Development of Diesel-Ethanol Engine for HCV. **SAE Technical Paper Series**, vol. 1, 2019. <https://doi.org/10.4271/2019-26-0089>.

TORRES J. et al. Exhaust emissions evaluation of Colombian commercial Diesel fuels C.T.F. **Cies. Tecnol. Futuro**, v.2, n.4, Bucaramanga, 2003.

TORRES-JIMENEZ, E. et al. Physical and chemical properties of ethanol-Diesel fuel blends. **Fuel**, v.90, n.2, p.795-802, Feb. 2011. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.09.045.

VANZELLA, E. et al. Processo fermentativo na indústria sucroalcooleira. **Acta Iguazu**. v.3, p. 50-58, 2014.

VSÓROV, B.A. **Manual de Motores Diesel para Tractores**. URSS: Ed. MIR-Moscú,1986. 700 p.

WALSH, M.P. **Global Trends in Diesel Particulate Control**, Update. SAE Technical Paper, 1993.

WANG, X.; et al. Diesel engine gaseous and particle emissions fueled with diesel-oxygenate blends. **Fuel** 2012;94:317–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.016>.

WERONKA, F. **Inventário da emissão do material particulado e gasoso proveniente de motores Euro V: eficiência dos sistemas de pós-tratamentos EGR e SCR**. 2015. 78 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

XUE, J.; GRIFT, T. E.; HANSEN, A. C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.15, 2011.

YILMAZ, N. et al. Investigation of CI engine emissions in biodiesel–ethanol–Diesel blends as a function of ethanol concentration. **Fuel**, v. 115, p. 790–793, 2014.

YASIN, M. H . M. et al. Characterization of a diesel engine operating with a small proportion of methanol as a fuel additive in biodiesel blend. **Appl Energ**. 2014; 114:865–73.

ZAHARIN, M. S. M. M. et al. Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, n. March, p. 475–493, 2017.

ZÖLDY, M. Ethanol-biodiesel-diesel blends as a diesel extender option on compression ignition engines. **Transport**. 2011; 26:303–9. DOI: <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.623824>

## APÊNDICE A – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 1 - TABELA DE RESULTADOS

Tabela 40 – Behavior of the addition of ethanol in mixtures with Diesel oil, specifications and their impact on engine performance and pollutant gas emissions. Results of the main works published worldwide in scientific journals, theses, dissertations and other academic publications

(continua)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[1]	1-cylinder, 211 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT/GR, DG3LE	00:00:100 90:05:05 90:00:10 85:10:05 85:05:10 85:00:15 80:15:05 80:10:10 80:05:15 85:15:00 75:25:00 50:50:00	Diesel	Palm oil 99,5%				▼HL		▼HL	▲	
[2]	1-cylinder, 290 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT/GR, Farymann 15 W430	25:75:00 97:00:03 82:15:03 72:25:03 47:50:03 00:97:03						▼				▼
[3]	1-cylinder, 368 cm <sup>3</sup> , TB, Diesel TDI engine	76:00:16,5 (+7,5% ADT)	Diesel		Stability additive			▲LL ▼HL		▲LL ▼HL	▼HL	
[4]	1-cylinder, 373.3 cm <sup>3</sup> , CR, TB, MT/GR, modified Hyundai U	75:05:20 70:10:20 60:20:20	Diesel				▲	▼		▲	▼	▼
[5]	1-cylinder, 373.3 cm <sup>3</sup> , CR, AP, EGR, MT, Diesel cycle engine	85:05:10 75:05:20 65:05:30	ULSD 10 ppm	Soybean oil methyl ester 99,9%				▲		▲	▼	▼

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM	
[6]	1-cylinder, 406 cm <sup>3</sup> , DI, AP, BD-6500 CF Diesel cycle engine	92:07:01											
		88:07:05											
		83:07:10											
		78:07:15											
		89:10:01											
		85:10:05											
		80:10:10											
		75:10:15											▼
		81:15:01											
		80:15:05											
		75:15:10											
		70:15:15											
		79:20:01											
75:20:05													
70:20:10													
65:20:15													
[7]	1-cylinder, 406 cm <sup>3</sup> , DI, AP, BD-6500 CF Diesel cycle engine	84:15:01											
		80:15:05											
		75:15:10											
		70:15:15						▲				▼	
		79:20:01											
75:20:05													
70:20:10													
65:20:15													
[8]	1-cylinder, 406 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Rainbow 186	00:80:20	Diesel	Sunflower oil methyl ester		▲LS, MS ▼HS	▼	▼	▲LS, HS ▼MS		▲		
[9]	1-cylinder, 418 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT/GR, Kipor KDE 6500E	70:25:05											
		55:30:15						▼	▼	▲			
		45:45:10											
[10]	1-cylinder, 450 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Ricardo-Cussons 'Hydra' experimental engine (Otto and Diesel cycle)	95:00:05 90:00:10 85:00:15	Diesel 350 ppm		1,5% GE Betz additive		▲	▼		▲	▼	▼	
[11]	1-cylinder, 450 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Ricardo-Cussons 'Hydra' experimental engine (Otto and Diesel cycle)	95:00:05 (+1,5% ADT) 90:00:10 (+1,5% ADT) 85:00:15 (+1,5% ADT)	Diesel	0,999		GE Betz additive		▲	▼		▲	▼	▼
[12]	1-cylinder, 454 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Lombardini LDA450	95:00:05 90:00:10 80:00:20	Diesel			1,5% n/a							
						▲Torque (E10) ▼T (others), P	▼LL						

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[13]	1-cylinder, 475 cm <sup>3</sup> , CR/PFI, AP, EGR, derived from a Euro 5 LD engine compliant four cylinder engine	83:00:17 80:00:20 70:00:30 66:00:34 (Fumigation)						▲		▲		▼
[14]	1-cylinder, 477.5 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, EGR, MT, EV5 based on the Fiat/GM JTD 1.9l engine	68:17:15 56:14:30	ULSD 10 ppm	Soybean oil methyl ester E: Anhydrous			▲	▲	▼	▲	▼	▼
[15]	1-cylinder, 487 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kubota RK95-1-NB-RDK	80:15:05 80:10:10 80:05:15				▼	▲	▼LS, MS ▲HS	▼		▼MS ▲LS, HS	
[16]	1-cylinder, 498 cm <sup>3</sup> , CR/PFI, AP, Single-cylinder automotive size engine	90:00:10 85:00:15 80:00:20 70:00:30 60:00:40 50:00:50 40:00:60 20:00:80				▲Power		▲		▲		▼
[17]	1-cylinder, 510 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Antor 3LD510	85:15:00 80:15:05 75:15:10						▼				▼
[18]	1-cylinder, 510 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Lombardini 3 LD510	97:02:01 94:04:02 91:06:03						▼		▼		
[19]	1-cylinder, 553 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kirloskar AV1	85:10:05 80:10:10 75:10:15	Diesel	Rice bran oil 99,5%			▲	▼LL ▲HL	▲	▲LL, ML ▼HL	▼LL ▲ML, HL	▲E5 ▼Others
[20]	1-cylinder, 553 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kirloskar AV1	70:20:10 60:20:20 50:20:30						▼	▲	▼	▲	▼
[21]	1-cylinder, 567 cm <sup>3</sup> , IDI, AP, MT/GR, Agrale M85	70:30:05 70:30:09 70:30:15 70:30:15 (+0,4% ADT)						▲	▼	▲		▼

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[22]	1-cylinder, 573 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, 1CA90 Diesel cycle engine	76:19:05 72:18:10 68:17:15 64:16:20 60:15:25 56:14:30 52:13:35 48:12:40 44:11:45 40:10:40						▲LL ▼HL	▼	▼		
[23]	1-cylinder, 573, DI/PFI, AP, 1CA90 Diesel cycle engine	Dual-Fuel (Fumigation)				▲Power		▼		▲		
[24]	1-cylinder, 584 cm <sup>3</sup> , DI, AP, Yanmar Diesel engine	85:10:04		Soybean methyl ester			=	▲		▼	▼	▼
[25]	1-cylinder, 638 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Yanmar TF-120	90:05:05 80:10:10 75:15:10 70:20:10 65:20:15					▼90:05:05 , 80:10:10 ▲others	▼			▲	▼
[26]	1-cylinder, 661 cm <sup>3</sup> , CR, AP, MT, Kirloskar TV1	15:70:15 10:80:10 05:90:05 00:90:10						▼		▼	▲	▼
[27]	1-cylinder, 661 cm <sup>3</sup> , CR, AP, MT, Kirloskar TV1	15:70:15 10:80:10 05:90:05 00:90:10						▲		▲	▼	▲
[28]	1-cylinder, 661 cm <sup>3</sup> , CR, AP, MT, Kirloskar TV1	38:60:02 34:60:06 28:60:12						▲		▲		
[29]	1-cylinder, 661 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kirloskar SV1	90:00:10 80:00:20 70:00:30 60:00:40 100:00:00	Diesel		1% ethyl acetate and 1% diethyl carbonate			▲LL ▼HL (E10, E20)		▲LL ▲HL		▼LL (E10, E20) ▼HL
[30]	1-cylinder, 661 cm <sup>3</sup> , DI, AC, MT	70:00:20 (+10% hexanol) 65:00:25 (+10% hexanol) 55:00:35 (+10% hexanol) 45:00:45 (+10% hexanol)	Diesel							▲	▲HL	▼

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[31]	1-cylinder, 661 cm <sup>3</sup> , DI, AP, Kirloskar TV1 with 200 hours of use	10:80:10	Diesel	Mahua oil		=	=	=	▼	▼	▼	▼
[32]	1-cylinder, 661 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kirloskar TV-1	45:50:05 40:50:10 35:50:15 30:50:20								▼		
[33]	1-cylinder, 661 cm <sup>3</sup> , DI, Kirloskar TV1	60:20:20		Waste cooking oil methyl ester			▲	▼	▼	▼		▼
[34]	1-cylinder, 661.45 cm <sup>3</sup> , DI, AP, WC, MT, Kirloskar TV1 engine	70:00:30 60:00:40 50:00:50	Diesel		Yes, n/a						▲	▼
[35]	1-cylinder, 662 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kirloskar TAF 1	40:40:20 40:40:20 (+5% ADT)					▲LL =HL	▲LL =ML ▲HL	▲	▲	▲	▼
[36]	1-cylinder, 662 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kirloskar TAF 1	70:20:10 70:20:10 (10ppm ADT) 70:20:10 (20ppm ADT) 70:20:10 (30ppm ADT)						▼		▼	▲	▼
[37]	1-cylinder, 662 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kirloskar TAF 1	70:20:10 70:20:10 (10ppm ADT) 70:20:10 (20ppm ADT) 70:20:10 (30ppm ADT)						▼		▼	▲	▼
[38]	1-cylinder, 662 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kirloskar TAF1	84:00:15 (+1% ADT) 84:00:15 (+2% ADT)						▲2% additive, LL ▼2% additive, HL ▼0%, 1% additive		▲2% additive =0% additive ▼1% additive		▼
[39]	1-cylinder, 662 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Kirloskar TV1	00:90:10 00:70:30 00:50:50						▲LL ▼HL		▲LL ▼HL		▼
[40]	1-cylinder, 662 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT/GR, Kirloskar TAF1	72,5:25:2,5 70:25:05					▲		▲	▼	▲	▼

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[41]	1-cylinder, 667 cm <sup>3</sup> , DI, AP, HATZ 1D80	90:00:10 90:00:10 (+2% ADT) 80:00:20 80:00:20 (+2% ADT)				▼ Power		▼		▲	▼	▼
[42]	1-cylinder, 668 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT/GR, Agrale M90	90:01:09 80:02:18 70:03:27 60:04:36 50:05:45 00:10:90 00:20:80 00:25:75					▲					
[43]	1-cylinder, 669 cm <sup>3</sup> , DI, WC, MT, Diesel cycle engine	90:00:10 85:00:15 80:00:20 75:00:25	Diesel		1% stability additive		▲	▲		▲		
[44]	1-cylinder, 763 cm <sup>3</sup> , WC, Tecquipment four-stroke Diesel cycle engine	98,4:00:1,96 96,15:00:3,85 94,34:00:5,66	Diesel			▲	▼					
[45]	1-cylinder, 770 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Super Star 7710	95:00:05 90:00:10	Diesel 50 ppm	0,99	1% dodecanol		▲	▼		▼	▲	▼
[46]	1-cylinder, 780 cm <sup>3</sup> , DI, AC, Kirloskar DAF 8 Diesel engine	10%, 20%, 30%, 40% and 50% ethanol (Fumigation)	Diesel					▼	▼	▲	▼	▼
[47]	1-cylinder, 780 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Agrale M95W	Dual-Fuel (Fumigation)					▲	▼	▼	▲		▼
[48]	1-cylinder, 815 cm <sup>3</sup> , DI, Nanji Machinery S195	85:00:10 75:00:20 70:00:25 65:00:30	Diesel		5% n-Butanol	=	▲	▲LL		▲LL	▼LL(except E10)	▼LL
[49]	1-cylinder, 900 cm <sup>3</sup> , DI, Diesel cycle engine	95:00:05, 90:00:10 85:00:15 80:00:20	Diesel		1,5% stability additive		▲	▼		▲	▼	▼

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[50]	1-cylinder, 903 cm <sup>3</sup> , DI, Chinese Nan Yang Diesel cycle engine	95:00:05 90:00:10 85:00:15 80:00:20 95:00:05 (+0,2% ADT) 90:00:10 (+0,2% ADT) 85:00:15 (+0,2% ADT) 80:00:20 (+0,2% ADT)	Diesel		Isoamyl nitrate							
[51]	1-cylinder, 903 cm <sup>3</sup> , DI, Diesel cycle engine	95:00:05 90:00:10 85:00:15 80:00:20	Diesel		Isoamyl nitrate (% n/a)		▲				=LL ▼HL	▼
[52]	1-cylinder, 903 cm <sup>3</sup> , DI, WC, ZS1100 Diesel cycle engine	100:00:00 93,5:00:05 88,5:00:10 83,5:00:15 78,5:00:20	Diesel	0,997	1,5% stability additive		▲	▼		▲	▼	▼(except HS and LL (E5, E10))
[53]	1-cylinder, 916 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Super Star engine	85:00:15	Diesel			▼	▲	▼HL		▲HL	▼HL	
[54]	1-cylinder, 920 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Super Star engine	95:2,5:2,5 90:05:05 92,5:05:2,5 92,5:2,5:05				=		▼LS, HS ▲MS	▲	▲		
[55]	1-cylinder, 996 cm <sup>3</sup> , DI, AP, Diesel cycle engine	70:25:05		Soybean methyl ester			▼	▼		▲	▲	▼
[56]	1-cylinder, 1.102 cm <sup>3</sup> , DI, WC, MT, Kirloskar TV-110	89:00:11 83:00:17	Diesel		27,8, 33,3% stability additive			▼		▲	▲	
[57]	1-cylinder, 1.102 cm <sup>3</sup> , WC, Kirloskar TV110	95:00:05 90:00:10 85:00:15 80:00:20	HSD			=	▲	▼			▼	
[58]	1-cylinder, 1.433 cm <sup>3</sup> , AP, MT, Diesel cycle engine	85:10:05 80:10:10 75:10:15 70:10:20	Diesel	Waste frying oil methyl ester			▲					
[59]	1-cylinder, 1.800 cm <sup>3</sup> , CR, AP, High-speed Direct Injection (HSDI) engine	Dual-Fuel (Fumigation)										▼

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[60]	1-cylinder, 1.858 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, JSC "Altaiskij motornij zavod" 1A41	40:02:58 35:09:56 16:07:77 11:31:58 21:46:33 06:65:29				=Power		▼				
[61]	1-cylinder, 1.999 cm <sup>3</sup> , EGR, MT, AVL 501 research engine	90:00:10	Diesel							▲		▼
[62]	1-cylinder, 2.026 cm <sup>3</sup> , CR/PFI, AP, EGR, MT, Single-cylinder heavy-duty engine	Dual-Fuel (Fumigation)						▼		▼		▼
[63]	1-cylinder, 2.026 cm <sup>3</sup> , CR/PFI, AP, EGR, MT, Single-cylinder heavy-duty engine	Dual-Fuel (Fumigation)				▲Power						▼
[64]	1-cylinder, 2.026 cm <sup>3</sup> , CR/PFI, AP, EGR, MT, Single-cylinder heavy-duty engine	Dual-Fuel (Fumigation)						▲		▲		
[65]	1-cylinder, 2.026 cm <sup>3</sup> , CR/PFI, AP, EGR, MT, Single-cylinder heavy-duty engine	Dual-Fuel (Fumigation)				▲Power				▲		▲HL ▼LL
[66]	1-cylinder, 2.060 cm <sup>3</sup> , PFI, AP, Single cylinder research engine (SCRE)	Dual-Fuel (Fumigation)						▲		▲		
[67]	1-cylinder, AC, Lister Petter engine	13,6:50:36,4		Neat animal fat				▼		▼	▼	▼
[68]	1-cylinder, DI, AP, AC, Diesel cycle engine	80:00:13 (+7% ADT) 70:00:17 (+13% ADT) 60:00:23 (+17% ADT)	Diesel		7, 13, 17% stability additive		▲	▲LL ▼HL		▲LL ▼HL	▼HL	▼HL
[69]	1-cylinder, DI, AP, Diesel cycle engine	00:80:20		Soybean methyl ester			▲				▼	▼
[70]	1-cylinder, DI, AP, EGR, MT, Diesel cycle engine	00:80:20		Soybean methyl ester								▼
[71]	1-cylinder, DI, MT, Diesel cycle engine	65:10:25		Jatropha methyl ester								
[72]	1-cylinder, DI, WC, Diesel cycle engine	98:00:02 96:00:04 94:00:06 92:00:08 90:00:10	Diesel				▲	▼				

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[73]	1-cylinder, DI, AP, EGR, MT, Diesel cycle engine	76:04:00 76:04:05 76:04:10 76:04:15	B5		DGE E0: 20% E5: 15% E10: 10% E15: 5%			▼		▼	▲(E5, E10)	▼
[74]	2-cylinder, 479 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT/GR, Kubota GL-7000	45:45:10 40:40:20					▲	▲		▲		
[74]	2-cylinder, 479 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT/GR, Kubota GL-7000	48,5:48,5:03 47,5:47,5:05 42,5:42,5:15 37,5:37,5:25						▲		▲LL (E15, E25) =ML and HL (E15, E25) ▼E03 and E05		
[75]	2-cylinder, 1.205 cm <sup>3</sup> , DI, AP, AC, MT, Ruggerini RD270	94,95:2,05:3 89,9:4,1:6 84,85:6,15:9 79,8:8,2:12 89,5:10,5:00 78,9:21,1:00 68,3:31,7:00 57,8:42,2:00 00:40:60	Diesel	Sunflower oil methyl ester		=	▲	▼	▼	▼		
[76]	2-cylinder, 1.272 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Agrale M790	90:00:10 80:05:15 80:03:07	Diesel	Soybean oil, castor oil and residual oil 99,5%			▼HL	▲LL, ML ▼HL	▼	▲	▼	
[77]	2-cylinder, 1.630 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Fujikawa 295D	97,5:00:2,5 (+1% ADT) 95:00:05 (+1% ADT) 92,5:00:7,5 (+1% ADT) 90:00:10 (+1% ADT)	Diesel (SOLAR)		Sorbitan methyl ester	▲Power	▲	▼HL		▼HL(exc ept E10)		▼HL(exc ept E2,5)
[78]	2-cylinder, 1.880 cm <sup>3</sup> , DI, WC, 2102QB Diesel cycle engine	100:00:00 67:00:30 (+3% ADT) 66.7:00:30 (+3 ADT + 0,3% CN Improver) 66.4:00:30 (+3% ADT3 + 0.6% CN Improver)	Commercial China 0 Diesel	0,995	Emulsifier			▼	▼	▼	=	

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[79]	3-cylinder, 977 cm <sup>3</sup> , DI/PFI, AP, MT/GR, Iveco AIFO 8031	Dual-Fuel (Fumigation) 80:00:20 50:00:50 25:00:75 10:00:90						▲		▲	▼	▼
[80]	3-cylinder, 2.490 cm <sup>3</sup> , DI/PFI, AP, PTO, Ford 960E	Dual-Fuel (PFI) 20, 30 e 40%		0,995		▲					▲	▲
[81]	3-cylinder, 2.589 cm <sup>3</sup> , DI, AP, Ford 2000 Diesel engine	84:00:16	Diesel No.2 400 ppm		4,1, 12,5% stability additive			▼		▲		▼
[82]	3-cylinder, 2.900 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, John Deere 5103	70:20:10 70:15:15						▲			▼	
[82]	3-cylinder, 3.294 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Ford 4000 (+2.000 hours of use)	70:20:10 70:15:15						▲			▲	
[83]	3-cylinder, 3.300, DI, AP, MT, Diesel cycle engine	70:10:20 50:20:30 50:10:40	Diesel				▲	▲	▲LL =HL			▼
[84]	3-cylinder, DI, diesel tractor engine	85:00:15			3% ethyl acetate	▼Power	▲					▼
[85]	3-cylinder, DI, WC, Diesel cycle engine	95:00:05	Diesel		Yes, n/a		▲	▼			▲	▼
[86]	4-cylinder, 1.187 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, MTZ Minsk engine	95:00:05 90:00:10 85:00:15 80:05:15	LSD				▲	▲LL(exc ept 1400 rpm and EB5) ▼HL		▲LL(exc ept 1400, 1800 rpm and E15, EB5) ▼HL(exc ept E15, EB5)	▲LL(exc ept 2000 rpm) ▼HL	▼
[87]	4-cylinder, 1.248 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, EGR, CH, 16-valve vehicular engine	78:20:02 75:20:05	Diesel B20 500 ppm	Soybean oil 99,6%				▲	▼	▲	▼	▲
[88]	4-cylinder, 1.248 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, EGR, CH, 16-valve vehicular engine	78:20:02 75:20:05	Diesel B20 500 ppm	Soybean oil 99,6%			▲E5 =E2					
[89]	4-cylinder, 1.300 cm <sup>3</sup> , CR, AP, MT, Maruti Suzuki engine	46:50:04 42:50:08 38:50:12						▲		▲		

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[90]	4-cylinder, 1.450 cm <sup>3</sup> , DI, WC, Automotive 30 test bed engine	95:00:05 90:00:10 85:00:15	Diesel			▼	▲					
[91]	4-cylinder, 1.560 cm <sup>3</sup> , CR, TB, EGR, DOC and DPF, PSA Peugeot Citroën DV6	40:40:20 (synthetic Diesel) 40:40:20 (fossil Diesel) 40:40:20 (synthetic Diesel + isopentane)	Diesel 10 ppm	Rapeseed oil 99,9%	Isopentane	▲Power	▲			▲	▼	▼
[91]	4-cylinder, 1.560 cm <sup>3</sup> , CR, TB, EGR/DOC/DPF, PSA Peugeot Citroën DV6	40:40:20 (synthetic Diesel) 40:40:20 (fossil Diesel) 40:40:20 (synthetic Diesel + isopentane)				▲Power				▲		▼
[92]	4-cylinder, 1.582 cm <sup>3</sup> , CR, TB, EGR, MT, Diesel cycle engine	80:10:10 70:10:20	ULSD 10 ppm	Soybean oil methyl ester 99,9%			▲	▲LL and ML		▲LL and ML		
[93]	4-cylinder, 1.582 cm <sup>3</sup> , CR, TB, EGR, MT, Diesel cycle engine	80:10:10 70:10:20	ULSD 10 ppm	Soybean oil methyl ester 99,9%				▲LL and ML		▲LL and ML	▼	
[94]	4-cylinder, 1.600 cm <sup>3</sup> , CR, TB, DOC, DV6 ATED PSA Peugeot-Citroën	80:00:20	<10 ppm					▲	▼	▲	▲	▼
[95]	4-cylinder, 1.753 cm <sup>3</sup> , IDI, TB, Ford XLD 418T	90:00:10 85:00:15	Diesel No.2		1% stability additive	▼		▼			▲	▼
[96]	4-cylinder, 1.796 cm <sup>3</sup> , DI, TB, CH, Ford Escort 1.8 TD	80:00:15 (+5% ADT) 74,4:5,6:15 (+5% ADT)				▼		▼		▼		▼
[97]	4-cylinder, 1.800 cm <sup>3</sup> , IDI, TB, Ford-1998-XLD 418T	90:00:10 85:00:15	Diesel No.2 400 ppm		Yes, n/a			▼			▲	▼
[41]	4-cylinder, 1.870 cm <sup>3</sup> , IDI, WC, Renault F8Q 706	90:00:10 90:00:10 (+2% ADT) 80:00:20 80:00:20 (+2% ADT)	Diesel		(1% 1-octylamino-3-octyloxy-2-propanol e 1% N-octyl nitramine)	▼Power		▲LL ▼HL		▲	▼	▼HL
[98]	4-cylinder, 1.896 cm <sup>3</sup> , DI, TB, MT, Audio 1.9l TDI engine	94:04:02 88:08:04				▼Power				=LL and HS ▲MS		
[99]	4-cylinder, 1.900 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, MT, Fiat JTD	85:00:15							=	▲		

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[100]	4-cylinder, 1.900 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, MT, Fiat JTD	60:20:20 (B animal) 52:20:28 (B animal) 60:20:20 (B vegetable) 52:20:28 (B vegetable)						▲		▼	▼	▼
[101]	4-cylinder, 1.900 cm <sup>3</sup> , DI, TB, 2001 Volkswagen Jetta engine	90:00:10	<10 ppm					▲		▲	▲	▼
[102]	4-cylinder, 1.900 cm <sup>3</sup> , DI, TB, EGR and DOC, VW TDI	88:00:10 83:00:15	Standard No. 2 Diesel		2% GE Betz additive	▼		▼		▲	▲	▼
[103]	4-cylinder, 1.900 cm <sup>3</sup> , DI, TB, EGR, Volkswagen industrial Diesel engine	90:00:10 85:00:15						▼		=	▼	▼
[104]	4-cylinder, 1.900 cm <sup>3</sup> , DI, TB, Volkswagen TDI engine	90:00:10 85:00:15	Diesel No.2 400 ppm					▼		▼	▼	▼
[105]	4-cylinder, 1.943 cm <sup>3</sup> , DI, TB, DOC and CC-CDPF, CH, Diesel cycle engine	90:10:00 70:10:20	B10	Rapeseed Methyl Ester			▲	▲LL ▼HL	▲	▲LL ▼HL	▼	▼
[106]	4-cylinder, 1.956 cm <sup>3</sup> , CR, TB, EGR and CC-CDPF, CH, Diesel cycle engine	70:10:20	B10	Rapeseed Methyl Ester	▼Power		▲	▲LL ▼HL		▲	▼	▼
[107]	4-cylinder, 2.184 cm <sup>3</sup> , DI, TB, MT, Nissan YD22	90:00:10						▲		▲		▼
[108]	4-cylinder, 2.200 cm <sup>3</sup> , CR, TB, EGR, DOC and DPF, MT, Nissan M1D	90:00:10	LSD					▲ Cold start ▼ Warm start		▲ Cold start ▼ Warm start	▲ Cold start ▼ Warm start	▲ Cold start ▼ Warm start
[109]	4-cylinder, 2.200 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, EGR, MT, Diesel cycle engine	90:00:10	LSD	0,994			▲			▲LL	=LL ▲HL	▼
[110]	4-cylinder, 2.200 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, EGR, Diesel cycle engine	90:00:10	LSD 260 ppm	0,9994							▲	▼
[111]	4-cylinder, 2.210 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, EGR, MT/GR, Nissan Standard 4-cylinder Diesel engine	91,68:00:7,7 62,3:30:7,7 83:00:17	Diesel 33.9 ppm	Soybean oil methyl ester 99.7%	0.62% Stabilizer and CN improver					▲	▼	▼
[112]	4-cylinder, 2.497 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, WCC and CPF, MT, Diesel cycle engine	85:00:15 80:20:00	ULSD	0,995	2-ethylhexyl nitrate (7500 ppm)		▲	▲(ECE R49) ▼(ESC)		▼	▲(ECE R49) ▲(ESC)	▼ECE R49 ▼ESC

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[113]	4-cylinder, 2.497 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, WCC, MT, Diesel cycle engine	85:00:15 (2% ADT1) 85:00:15(2% ADT2)	ULSD 30 ppm	0,997	Additive 1 (THF) and Additive 2 (THF + 2EHN)		▲	▲LL =HL		▲		▼
[114]	4-cylinder, 2.500 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Diesel cycle engine	94,25:00:4,96 (+0.8% ADT) 88,11:00:11,01 (+0.8% ADT) 84,16:00:14,85 (+1% ADT)	Diesel		CLZ			▲LL ▼HL		▲LL ▼HL	▼LL =HL	▼
[115]	4-cylinder, 2.500 cm <sup>3</sup> , DI, CH, Isuzu D-MAX pickup truck	90,25:05:4,75 85,5:10:4,5 80,75:15:4,25 76:20:04	Diesel	Palm oil 99,5%			=	▼LL ▲HL	▼	▼	▼	▼
[116]	4-cylinder, 2.500 cm <sup>3</sup> , DI, CH, Isuzu D-MAX pickup truck	84:11:05				= Power		▼	▼	▼		▼
[117]	4-cylinder, 2.800 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, MT, Sofim 8140.43C	85:12:03 80:16:04	Diesel	Soybean oil 99,7%			▲	▼		▲	▲	▼
[118]	4-cylinder, 3.168 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT/GR, Diesel cycle engine	85:00:15 85:00:15 (+0,2% ADT) 85:00:15 (+0,4% ADT)	Diesel		CN improver		▲	▲LL ▼HL		▲LL ▼HL(0,4 % ADT)	▼	▼
[119]	4-cylinder, 3.168 cm <sup>3</sup> , DI, AP, WC, Diesel cycle engine	95:00:05, 90:00:10 85:00:15 80:00:20	Diesel		0,2, 0,4% stability additive			▼		▲	▼	
[120]	4-cylinder, 3.200 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, PTO, New Holland Tractor T4020V - F5A E9484A*A001 engine	82:15:03 72:25:03				▼Torque						
[121]	4-cylinder, 3.298 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, Diesel cycle engine	90:00:10 80:00:20 70:00:30						▲		▼		▼
[122]	4-cylinder, 3.810 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Mercedes Benz OM 314 Euro II	78:15:07 67:13:20 60:35:05 54:31:15 84:00:16 50:40:10 56:22:22 62,5:25:12,5						▼	▲	▼		▼

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[82]	4-cylinder, 3.900 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, John Deere 4039	70:20:10 70:15:15						▲				
[123]	4-cylinder, 3.920 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Cummins 4B	85:05:10 70:10:20 60:10:30				▼Torque		▲LL, ML ▼HL		▼		▼
[124]	4-cylinder, 3.920 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Cummins 4B	85:05:10 60:10:30 85:05:10 (+5% ADT) 70:10:20 (+10% ADT) 60:10:30 (+10% ADT)	Diesel	0,997	Ester					▼		▼
[125]	4-cylinder, 3.920 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Cummins 4B	75:20:05										▼
[126]	4-cylinder, 3.920 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Cummins 4B	75:20:05	Diesel			▼	▲	=	=	▼	▲	▼
[127]	4-cylinder, 3.922 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Diesel cycle engine	90:00:10 (+2% ADT1) 70:00:30 (+2% ADT1) 90:00:10 (+2% ADT2 0,1%) 70:00:30 (+2% ADT2 1%)	Diesel		Additive (1) and Additive 2 (additive + 0,1%, 1% isoctyl nitrate)			▲LL ▲HL(exc ept E10,E30 ignition improver)	▼	▼LL(exc ept E10, E30 no ignition improver) ▼HL(exc ept E30 no ignition improver)	▼	▼
[128]	4-cylinder, 3.922 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT/GR, Diesel cycle engine	93:07:00 88,35:6,65:05 83,7:6,3:10 79,05:5,95:15						▲LL, ML ▼HL	▼	▲LL ▼HL		
[129]	4-cylinder, 3.922 cm <sup>3</sup> , DI, TB, MT/GR, Cummins-4B	75:20:05	Diesel	Soybean oil 99,7%				▲LS ▼HS ▲Consta nt speed		▼	▲	▼
[130]	4-cylinder, 3.922 cm <sup>3</sup> , DI/PFI, AP, MT/GR, Diesel cycle engine	Dual-Fuel (Fumigation) 88,35:6,65:05 83,7:6,3:10 79,05:5,95:15 74,4:5,6:20 69,75:5,25:25 65,1:4,9:30						▲	▼	▲		

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[131]	4-cylinder, 4.160 cm <sup>3</sup> , DI, TB, EGR, MT, tractor engine Zetor 1505	00:90:10	Diesel	Rapeseed oil E85 (85% ethanol +15% gasoline)				▲LL ▼HL		▲LL ▼HL	▼HL	
[132]	4-cylinder, 4.300 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, MWM 4.10 TCA	80:15:05 75:15:10 70:15:15 65:15:20				▲Torque						
[133]	4-cylinder, 4.300 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, MWM 4.10 TCA	80:15:05 75:15:10 70:15:15 65:15:20				▲Torque						
[134]	4-cylinder, 4.300 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, MWM 4.10 TCA	80,75:14,25:05 76,5:13,5:10 72,25:12,75:15 68:12:20				▼Torque						
[135]	4-cylinder, 4.300 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, MWM 4.10 TCA	87,4:02:08(+2,6% ADT) 89,5:02:08(+0,5% ADT)				▼	▲	=	▼	▼	▼	
[136]	4-cylinder, 4.334 cm <sup>3</sup> , DE, AP, MT, Isuzu 4HF1	78:20:02 76:20:04 75:20:05	Diesel	Soybean oil			▲	▲	▼	▲	▼	▼
[137]	4-cylinder, 4.334 cm <sup>3</sup> , DI, AP, DOC, MT, Isuzu 4HF1	92,9:00:6,1 (+1% ADT) 86,8:00:12,2 (+1% ADT) 80,8:00:18,2 (+1% ADT) 74,3:00:24,2 (+1,5% ADT)	ULSD	0,997	1-dodecanol			▲LL ▼HL		▲LL ▼HL	▼LL ▲HL	▼
[138]	4-cylinder, 4.334 cm <sup>3</sup> , DI, AP, Isuzu 4HF1	95:00:05 90:00:10 85:00:15 80:00:20	Euro V Diesel fuel				▲	▲		▲	▼	▼
[139]	4-cylinder, 4.334 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, DOC, Isuzu 4HF1	92,9:00:6,1 (+1% ADT) 86,8:00:12,2 (+1% ADT) 80,8:00:18,2 (+1% ADT) 74,3:00:24,2 (+1,5% ADT)	ULSD	0,997	1-dodecanol		▲	▲		▲	▼LL ▲HL	▼
[140]	4-cylinder, 4.334 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Isuzu 4HF1	00:95:05 00:90:10 00:85:15					▲	▲	▲	▲	▼	▼

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[141]	4-cylinder, 4.334 cm <sup>3</sup> , DI, AP, WC, Isuzu 4HF1	92,9:00:6,1 (+1% ADT) 86,8:00:12,2 (+1% ADT) 80,8:00:18,2 (+1% ADT) 74,3:00:24,2 (+1,5% ADT)	ULSD	99.5% and 99.7%	stability additive (1-dodecanol)			▲		▲	▲	
[142]	4-cylinder, 4.400 cm <sup>3</sup> , DI, TB, PTO, MF4291 Tractor - Perkins 1104A-44T (100h used)	89,3:4,7:06 83,6:4,4:12 80,75:4,25:15	Diesel S500	0,945					▼			▼
[143]	4-cylinder, 4.400 cm <sup>3</sup> , DI, TB, PTO, MF4291 Tractor - Perkins 1104A-44T (100h used)	92,15:4,85:03 89,3:4,7:06 86,45:4,55:09 83,6:4,4:12 80,75:4,25:15	Diesel S500	0,945		▼						
[144]	4-cylinder, 4.400 cm <sup>3</sup> , DI, TB, PTO, MF4291 Tractor - Perkins 1104A-44T	92,15:4,85:03 89,3:4,7:06 86,45:4,55:09 83,6:4,4:12 80,75:4,25:15	Diesel S500	0,945					▼		▼	▼
[145]	4-cylinder, 4.500 cm <sup>3</sup> , CR, TB, EGR/DPF, Cummins QSB 4.5l T4L	76:19:05 68:17:15 47,5:47,5:05 42,5:42,5:15 00:95:5 00:85:15						▲68:17:15		▼	▲HS ▼LS, MS	
[146]	4-cylinder, 4.500 cm <sup>3</sup> , DI, TB, PTO, JD 641 5 Tractor - 4045T modified engine	95:05:00 00:00:100				▼	▲					
[147]	4-cylinder, 4.752 cm <sup>3</sup> , CR, TB, EGR and DPF. Diesel cycle engine	80:10:10 70:10:20		Waste cooking oil methyl ester 99,7%			▲	▲		▲	▼	▼
[148]	4-cylinder, 4.760 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, D-2402.000 Diesel cycle engine	85:10:05 80:10:10 70:25:05						▼	▲	▼		▼
[149]	4-cylinder, 4.760 cm <sup>3</sup> , DI, MT, Diesel cycle engine	85:10:05 80:15:05 70:25:05	Diesel	Rapeseed oil 99,3%			▲	▼	▲B15E5	▼	▲	▼

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
		92:07:01 89:10:01 94:15:01 79:20:01 90:07:03 87:10:03 82:15:03 77:20:03 88:07:05 85:10:05 80:15:05 75:20:05										
[150]	4-cylinder, 4.983 cm <sup>3</sup> , DI, TB, PTO, Ford/New Holland tractor - Model 7630					▼		▼	▲			
[151]	4-cylinder, 4500 cm <sup>3</sup> , CR/PFI, TB/AF, EGR, John Deere Power Tech Plus engine	40:00:60 20:00:80 00:00:100 (Fumigation)	Diesel No.2 400 ppm				▲	▲		▲	▼	
[152]	4-cylinder, 5.120 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, SCR, Diesel cycle engine	75:20:05	Diesel	Soybean oil				▼		▼	▼	▼
[153]	4-cylinder, Ford 2701C test engine	10%, 20% and 40% ethanol (Fumigation)	Diesel					▲		▲		▼
[154]	4-cylinder, John Deere tractor engine	80:00:20 70:00:30	Diesel			▼		▼		▼		
[155]	6-cylinder, 4.300 cm <sup>3</sup> , DI, PTO, Allis-Chalmers D-17 diesel tractor	0, 1.32, 2.08, 2.76, and 3.16 L/h. (Fumigation)				▲		▲LL e HL				▲HL
[156]	6-cylinder, 5.670 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, DOC/POC, MT, Diesel cycle engine	95:00:05 (+2% ADT) 92,3:00:7,7 (+2% ADT) 90:00:10 (+2% ADT) 87,5:00:12,5 (+2% ADT) 85:00:15 (+2% ADT)				▼		▼		▲	▲	▼
[157]	6-cylinder, 5.785 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, Dongfeng Chaoyang Diesel engine	95:00:05 90:00:10 85:00:15 80:00:20	Diesel					▲		▲	=	▼
[158]	6-cylinder, 5.800 cm <sup>3</sup> , DI, AP, PTO, Perkinz A63544	98:00:02 96:00:04 94:00:06 92:00:08 90:00:10 88:00:12				▲	▲		▲	▼		

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[159]	6-cylinder, 5.900 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, Cummins ISB	88:00:12	Phillips Petroleum certification fuel 350 ppm		2% GE Betz additive	▼		▲		▲	▼	▼
[135]	6-cylinder, 5.900 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, Cummins MOD BTAA	89,5:02:08 (+0,5% ADT)				▼	▲	▲	▼	▼	▼	
[160]	6-cylinder, 5.958 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Diesel cycle engine	90,25:4,75:05 92,15:4,85:03 93,10:4,90:02				=				▲		
[161]	6-cylinder, 5.958 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, Mercedes Benz OM 366	95:00:05 90:00:10					▲				▼	▼
[162]	6-cylinder, 5.958 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, Mercedes-Benz OM 366 LA	95:00:05 88,5:00:10 (+1,5% ADT)	LSD		1,5% GE Betz additive		▲	▼		▲	▼	▼
[163]	6-cylinder, 5.958 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, Mercedes-Benz OM 366 LA	95:00:05 90:00:10 88,5:00:10 (+1,5% ADT)	Diesel		GE Betz additive							▼
[164]	6-cylinder, 5.958 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, Mercedes-Benz OM 366 LA	95:00:05 90:00:10						▼		▲	▼	▼
[165]	6-cylinder, 5.960 cm <sup>3</sup> , DI, AP, MT, Diesel cycle engine	90,25:4,75:05 92,15:4,85:03 93,10:4,90:02				=						
[166]	6-cylinder, 6.000 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, Diesel cycle engine	75:20:05 70:20:10 60:20:20							▼	▼LL, ML ▲HL		
[167]	6-cylinder, 6.600 cm <sup>3</sup> , DI, TB, MT, Diesel cycle engine	90:00:10 80:00:20 70:00:30	Diesel		1% solvent	▼Torque	▲	▲LL ▼HL		▲LL =HL	▼LL ▲HL	▼
[168]	6-cylinder, 7.600 cm <sup>3</sup> , DE, TB/AF, AC, EGR and DOC, International - Navistar DT466E	93:00:07	Canadian n.1 and n.2 > 400 ppm; LSD 150 ppm; Equilon Ultralow Sulfur Diesel (EULSD) and Tosco Ultralow Sulfur Diesel (TULSD) <30 ppm; 450 ppm					▲	▲	▲	▼	▼

(continuação)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[169]	6-cylinder, 7.800 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, MT, Guangxi Yulin LTD/YC6G270-30	63:27:10 56:24:20 49:21:30 42:18:30 35:15:50 28:12:60 21:09:70 14:06:80 07:03:90						▲LL		▲LL		▼
[170]	6-cylinder, 7.800 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, MT, Guangxi Yulin LTD/YC6G270-30	60:20:20 40:40:20 40:20:40						▲LL		▲		
[171]	6-cylinder, 8.100 cm <sup>3</sup> , CR, TB/AF, John Deere 6081HRW28 engine; 6-cylinder, 6.800 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, 6068HF275 engine; 6-cylinder, 12.500 cm <sup>3</sup> , DE, TB/AF, 6125HR02 engine	92,3:00:7,7 90:00:10 85:00:15	Diesel No.2 400 ppm									▼
[172]	6-cylinder, 9.000 cm <sup>3</sup> , DI, DOC, Scania DC9 16 engine	90:00:10 85:05:10	Diesel Mk.1 <10 ppm	Rapeseed Methyl Ester				▲	▲	▲	▲	▼
[173]	6-cylinder, 9.000 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, Detroit Diesel 6V92 two-stroke Diesel engine; 6-cylinder, 11.100 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, Detroit Diesel Series 60 four-stroke Diesel engine	Two-stroke: 99:01:00 99:00:01 99:00:01 99:00:01 Four-stroke: 98:02:00 98:00:02 98:00:02 98:00:02	Diesel					▼		▲ except soybean methyl ester blend	▲ except octanol blend	▼
[174]	6-cylinder, 11.100 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, Detroit Diesel Series 60 four-stroke Diesel engine	92,3:00:7,7	500 ppm					▼		▲	▼	▼
[175]	6-cylinder, 12.700 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, DDC series 60	87,65:00:10 82,65:00:15	Emissions grade fuel meeting 1998 EPA specifications		2,35% Pure Energy Corporation additive			▲▼		▲	▼	▼
[176]	6-cylinder, 14.000 cm <sup>3</sup> , DI, TB/AF, MT, Cummins N14-410	80:13:07 70:19,5:10,5 60:26:14				▼				▼		▲

(conclusão)

Ref. <sup>3</sup>	Engine specifications <sup>1</sup>	% Volume (D:B:E)	Reference fuel Sulfur (ppm)	Biodiesel and ethanol purity	Additive	Power and torque	BSFC <sup>2</sup>	CO	CO <sub>2</sub>	HC	NO <sub>x</sub>	PM
[177]	6-cylinder, DI, TB, Diesel cycle engine	80:00:10 (+10% ADT) 60:00:25 (+15% ADT) 30:00:50 (+20% ADT)	D-2 Diesel		Stability additive			▲HL ▼Other		▲HL ▼Other	▲	
[178]	6-cylinder, DI, TB/AF, MT, Diesel cycle engine	85:00:15	Diesel		0,3, 1,2% stability additive			▲		▲		

<sup>1</sup> Sequence of engine specifications - Number of cylinders, displacement, type of injection, aspiration, emission gas treatment system, dynamometer coupling, engine make and model, other specifications.

Fonte: Autor.

## <sup>2</sup> LEGEND

▲ Increases with the addition of ethanol;  
▼ Decreases with the addition of ethanol;  
= Does not change with the addition of ethanol;  
AC – Air cooled;  
ADT – Additive;  
AP – Naturally aspirated engine;  
BSFC - Brake specific fuel consumption;  
CC-CDPF - Close-coupled catalyzed Diesel particulate filter;  
CH – Chassis dynamometer;  
CN – Cetane number;  
CO – Carbon monoxide;  
CO<sub>2</sub> - Carbon dioxide;  
CPF - Catalyzed particulate filter;

CR – Common Rail – electronic injection;  
DE – Electronic and direct fuel injection;  
DI – Mechanical and direct fuel injection;  
DOC - Diesel oxidation catalyst;  
DPF – Diesel particulate filter;  
D:B:E – Diesel: Biodiesel: Ethanol;  
D:G:E – Diesel: Gasoline: Ethanol;  
EGR – Exhaust gas recirculation;  
HC – Hydrocarbons;  
HL – High loads;  
HS – High speed;  
IDI – Mechanical and indirect fuel injection;  
LL – Low loads;  
LS – Low speed;  
ML – Medium loads;

MS – Medium speed;  
MT – Engine dynamometer;  
MT/GR – Engine/generator dynamometer;  
NO<sub>x</sub> - Nitrogen oxides;  
PFI – Port fuel Injection - ethanol;  
PM - Particulate matter;  
POC - Particle Oxidation Catalyst;  
PTO – Power take off;  
SCR – Selective Catalytic Reduction;  
TB – Turbocharged;  
TB/AF - Turbo/Aftercooler;  
ULSD – Ultra Low Sulfur Diesel;  
WC - Water cooled;  
WCC - Warm-up catalytic converter;

### <sup>3</sup> REFERENCES

- [1] 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, May 2007.
- [2] CALIGIURI, C. et al. Experimental investigation on the effects of bioethanol addition in diesel-biodiesel blends on emissions and performances of a micro-cogeneration system. **Energy Conversion and Management**, v. 185, n. September 2018, p. 55–65, Apr. 2019.
- [3] PISCHINGER, F. F. et al. **Investigations on a Passenger Car Swirl-Chamber Diesel Engine Using Different Alcohol Fuels**. SAE International. **Anais...** 1 Feb. 1983Disponível em: <<https://www.sae.org/content/830552/>>
- [4] PARK, S. H.; CHA, J.; LEE, C. S. Impact of biodiesel in bioethanol blended diesel on the engine performance and emissions characteristics in compression ignition engine. **Applied Energy**, v. 99, p. 334–343, Nov. 2012.
- [5] PARK, S. H. H.; CHA, J.; LEE, C. S. S. Effects of bioethanol-blended diesel fuel on combustion and emission reduction characteristics in a direct-injection diesel engine with exhaust gas recirculation (EGR). **Energy and Fuels**, v. 24, n. 7, p. 3872–3883, 2010.
- [6] 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-gerador**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2016.
- [7] KLAJN, F. F. et al. Comparison of the emissions and performance of ethanol-added diesel–biodiesel blends in a compression ignition engine with those of pure diesel. **Environmental Technology**, v. 41, n. 4, p. 511–520, 10 Feb. 2020.
- [8] AYDIN, H.; İLKILIÇ, C. Effect of ethanol blending with biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a CI engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 10, p. 1199–1204, Jul. 2010.
- [9] UM MIN ALLAH, F.; GRUIA, A. Experimental Investigation on the Effect of Bioethanol on Emission Performance of Diesel Engine for Rapeseed Biodiesel-Diesel Blends. **Applied Mechanics and Materials**, v. 823, p. 319–322, Jan. 2016.
- [10] 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, Oct. 2007.
- [11] RAKOPOULOS, D. C. et al. Influence of properties of various common bio-fuels on the combustion and emission characteristics of high-speed DI (direct injection) diesel engine: Vegetable oil, bio-diesel, ethanol, n-butanol, diethyl ether. **Energy**, v. 73, p. 354–366, Aug. 2014.
- [12] MURCAK, A. et al. Effects of ethanol-diesel blends to performance of a DI diesel engine for different injection timings. **Fuel**, v. 109, p. 582–587, 2013.
- [13] GARGIULO, V. et al. Chemico-physical features of soot emitted from a dual-fuel ethanol–diesel system. **Fuel**, v. 150, p. 154–161, Jun. 2015.
- [14] SHAMUN, S. et al. Performance and emissions of diesel-biodiesel-ethanol blends in a light duty compression ignition engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 145, n. December 2017, p. 444–452, Dec. 2018.

- [15] TAN, Y. H. et al. Engine performance and emissions characteristics of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol emulsions. **Energy Conversion and Management**, v. 132, p. 54–64, Jan. 2017.
- [16] PADALA, S. et al. Ethanol utilisation in a diesel engine using dual-fuelling technology. **Fuel**, v. 109, p. 597–607, Jul. 2013.
- [17] ÖRS, İ.; KAHRAMAN, A.; CINIVIZ, M. Effects on Performance, Emission and Combustion Parameters of Addition Biodiesel and Bioethanol Into Diesel Fuel. **International Journal of Automotive Engineering and Technologies**, v. 6, n. 4, p. 148–156, 2018.
- [18] NOOROLLAHI, Y.; AZADBAKHT, M.; GHOBADIAN, B. The effect of different diesterol (diesel–biodiesel–ethanol) blends on small air-cooled diesel engine performance and its exhaust gases. **Energy**, v. 142, p. 196–200, Jan. 2018.
- [19] SUBBAIAH, G. V. V. et al. Rice Bran Oil Biodiesel As an Additive in Diesel- Ethanol Blends for Diesel Engines. **International Journal of Recent Research and Applied Studies**, v. 3, n. June, p. 334–342, 2010.
- [20] 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.
- [21] FERREIRA, V. P. et al. Performance and emissions analysis of additional ethanol injection on a diesel engine powered with A blend of diesel-biodiesel. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 6, p. 649–657, Dec. 2013.
- [22] JAMROZIK, A. et al. Effect of diesel-biodiesel-ethanol blend on combustion, performance, and emissions characteristics on a direct injection diesel engine. **Thermal Science**, v. 21, n. 1 Part B, p. 591–604, 2017.
- [23] JAMROZIK, A. et al. Performance, emission and combustion characteristics of CI dual fuel engine powered by diesel/ethanol and diesel/gasoline fuels. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 32, n. 6, p. 2947–2957, 21 Jun. 2018.
- [24] LEE, W. J. et al. Assessment of energy performance and air pollutant emissions in a diesel engine generator fueled with water-containing ethanol-biodiesel-diesel blend of fuels. **Energy**, v. 36, n. 9, p. 5591–5599, Sep. 2011.
- [25] SILITONGA, A. S. et al. Evaluation of the engine performance and exhaust emissions of biodiesel-bioethanol-diesel blends using kernel-based extreme learning machine. **Energy**, v. 159, p. 1075–1087, Sep. 2018.
- [26] RAJESH, S. et al. Experimental investigations on CRDI diesel engine fuelled with acid oil methyl ester (AOME) and its blends with ethanol. **International Journal of Engineering, Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 69, 10 Apr. 2017.
- [27] RAJESH, S. et al. Performance, emission and combustion characteristics of a multicylinder common rail direct injection diesel engine fuelled with ethanol-acid oil methyl ester-diesel blends. **Biofuels**, v. 11, n. 1, p. 109–120, 2 Jan. 2020.
- [28] RAJESH, S. et al. Effect of injection parameters on performance and emission characteristics of a CRDi diesel engine fuelled with acid oil biodiesel–ethanol blended fuels. **Biofuels**, v. 9, n. 3, p. 353–367, 2018.
- [29] GNANAMOORTHY, V.; DEVARADJANE, G. Effect of compression ratio on the performance, combustion and emission of DI diesel engine fueled with ethanol – Diesel blend.

**Journal of the Energy Institute**, v. 88, n. 1, p. 19–26, Feb. 2015.

[30] SATHIYAGNANAM, A. P.; SARAVANAN, C. G.; GOPALAKRISHNAN, M. **Hexanol-ethanol diesel blends on DI-diesel engine to study the combustion and emission**. WCE 2010 - World Congress on Engineering 2010. **Anais...2010**

[31] 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, Mar. 2009.

[32] PAUL, A.; PANUA, R.; DEBROY, D. An experimental study of combustion, performance, exergy and emission characteristics of a CI engine fueled by Diesel-ethanol-biodiesel blends. **Energy**, v. 141, p. 839–852, Dec. 2017.

[33] KANNAN, G. R.; ANAND, R. Experimental investigation on diesel engine with diestrol–water micro emulsions. **Energy**, v. 36, n. 3, p. 1680–1687, Mar. 2011.

[34] GANESH, R. S.; KUMAR, S. S.; DINESH, S. **Effect of ethanol addition on performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine at various injection angles**. Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering -2010. **Anais...IEEE**, Nov. 2010Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148110004520>>

[35] VENU, H.; MADHAVAN, V. Influence of diethyl ether (DEE) addition in ethanol-biodiesel-diesel (EBD) and methanol-biodiesel-diesel (MBD) blends in a diesel engine. **Fuel**, v. 189, p. 377–390, Feb. 2017.

[36] VENU, H.; RAJU, V. D.; SUBRAMANI, L. Combined effect of influence of nano additives, combustion chamber geometry and injection timing in a DI diesel engine fuelled with ternary (diesel-biodiesel-ethanol) blends. **Energy**, v. 174, p. 386–406, May 2019.

[37] VENU, H. An experimental assessment on the influence of fuel-borne additives on ternary fuel (diesel–biodiesel–ethanol) blends operated in a single cylinder diesel engine. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 14, p. 14660–14672, 15 May 2019.

[38] HANSDAH, D.; MURUGAN, S. Comparative studies of a bioethanol fuelled DI diesel engine with a cetane improver. **International Journal of Oil, Gas and Coal Technology**, v. 11, n. 4, p. 429, 2016.

[39] PRBAKARAN, B.; VISWANATHAN, D. Experimental investigation of effects of addition of ethanol to bio-diesel on performance, combustion and emission characteristics in CI engine. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 1, p. 383–389, Mar. 2018.

[40] SATHIYAMOORTHY, R.; SANKARANARAYANAN, G. The effects of using ethanol as additive on the combustion and emissions of a direct injection diesel engine fuelled with neat lemongrass oil-diesel fuel blend. **Renewable Energy**, v. 101, p. 747–756, Feb. 2017.

[41] SATGÉ DE CARO, P. et al. Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines. **Fuel**, v. 80, n. 4, p. 565–574, 2001.

[42] ALEX VAILATT, M. I et al. Experimental Analysis of a Small Generator set Operating on Dual Fuel Diesel-Ethanol. **Scientia cum Industria**, v. 5, n. 1, p. 1–9, 18 Aug. 2017.

[43] BANUGOPAN, V. N. et al. **Experimental investigation on D.I. diesel engine fuelled by ethanol diesel blend with varying inlet air temperature**. Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering -2010. **Anais...IEEE**, Nov. 2010Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5714809/>>

[44] BHATTACHARYA, T. K.; CHATTERJEE, S.; MISHRA, T. N. Performance of a constant speed CI engine on alcohol-diesel microemulsions. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 3, p. 253–257, 2004.

- [45] SAYIN, C. Engine performance and exhaust gas emissions of methanol and ethanol–diesel blends. **Fuel**, v. 89, n. 11, p. 3410–3415, Nov. 2010.
- [46] CHAUHAN, B. S. et al. Experimental studies on fumigation of ethanol in a small capacity Diesel engine. **Energy**, v. 36, n. 2, p. 1030–1038, Feb. 2011.
- [47] TELLI, G. D. et al. Experimental investigation of a compression ignition engine operating on B7 direct injected and hydrous ethanol fumigation. **Energy**, v. 165, p. 106–117, Dec. 2018.
- [48] HUANG, J. et al. Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with ethanol–diesel blends. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 11–12, p. 2484–2490, Aug. 2009.
- [49] XINGCAI, L. et al. The influence of ethanol additives on the performance and combustion characteristics of diesel engines. **Combustion Science and Technology**, v. 176, n. 8, p. 1309–1329, 2004.
- [50] LI, W. et al. Combustion characteristics of a compression ignition engine fuelled with diesel–ethanol blends. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 222, n. 2, p. 265–274, 26 Feb. 2008.
- [51] REN, Y. et al. Effects of the addition of ethanol and cetane number improver on the combustion and emission characteristics of a compression ignition engine. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 222, n. 6, p. 1077–1087, 18 Jun. 2008.
- [52] LI, D. et al. 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, May 2005.
- [53] KARABEKTAS, M.; ERGEN, G.; HOSOZ, M. Effects of the blends containing low ratios of alternative fuels on the performance and emission characteristics of a diesel engine. **Fuel**, v. 112, p. 537–541, 2013.
- [54] AYDIN, F.; ÖĞÜT, H. Effects of using ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions. **Renewable Energy**, v. 103, p. 688–694, Apr. 2017.
- [55] QI, D. H. et al. Effect of diethyl ether and ethanol additives on the combustion and emission characteristics of biodiesel-diesel blended fuel engine. **Renewable Energy**, v. 36, n. 4, p. 1252–1258, 2011.
- [56] LUND, H. **Renewable Energy Systems**. [s.l.] Elsevier, 2010.
- [57] AJAV, E. A.; SINGH, B.; BHATTACHARYA, T. K. Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol–diesel blends as fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, n. 4, p. 357–365, Oct. 1999.
- [58] AL-HASSAN, M.; MUJAFET, H.; AL-SHANNAG, M. An experimental study on the solubility of a diesel-ethanol blend and on the performance of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 6, n. 2, p. 147–153, 2012.
- [59] LEE, J.; LEE, S.; LEE, S. Experimental investigation on the performance and emissions characteristics of ethanol/diesel dual-fuel combustion. **Fuel**, v. 220, n. December 2017, p. 72–79, May 2018.
- [60] LEBEDEVAS, S. et al. Usage of Fuel Mixtures Containing Ethanol and Rapeseed Oil Methyl Esters in a Diesel Engine. **Energy & Fuels**, v. 23, n. 1, p. 217–223, 22 Jan. 2009.

- [61] BALLESTEROS, R.; GUILLÉN-FLORES, J.; BARBA, J. Environmental and health impact assessment from a heavy-duty diesel engine under different injection strategies fueled with a bioethanol–diesel blend. **Fuel**, v. 157, p. 191–201, Oct. 2015.
- [62] PEDROZO, V. B. et al. Experimental analysis of ethanol dual-fuel combustion in a heavy-duty diesel engine: An optimisation at low load. **Applied Energy**, v. 165, p. 166–182, Mar. 2016.
- [63] PEDROZO, V. B. et al. Potential of internal EGR and throttled operation for low load extension of ethanol–diesel dual-fuel reactivity controlled compression ignition combustion on a heavy-duty engine. **Fuel**, v. 179, p. 391–405, Sep. 2016.
- [64] PEDROZO, V. B.; MAY, I.; ZHAO, H. Exploring the mid-load potential of ethanol-diesel dual-fuel combustion with and without EGR. **Applied Energy**, v. 193, p. 263–275, May 2017.
- [65] PEDROZO, V. B. et al. High efficiency ethanol-diesel dual-fuel combustion: A comparison against conventional diesel combustion from low to full engine load. **Fuel**, v. 230, n. February, p. 440–451, Oct. 2018.
- [66] BRITTO, R. F.; MARTINS, C. A. Emission analysis of a Diesel Engine Operating in Diesel-Ethanol Dual-Fuel mode. **Fuel**, v. 148, p. 191–201, 2015.
- [67] KUMAR, M. S. et al. Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel - Part 2: Engine test analysis. **Fuel**, v. 85, n. 17–18, p. 2646–2652, Dec. 2006.
- [68] KUMAR, C. et al. **Effects of ethanol addition on performance, emission and combustion of di diesel engine running at different injection pressures**. SAE Technical Papers. **Anais...** 16 Apr. 2007Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2007-01-0626/>>
- [69] QI, D. H. et al. Experimental Studies of a Naturally Aspirated, DI Diesel Engine Fuelled with Ethanol–Biodiesel–Water Microemulsions. **Energy & Fuels**, v. 24, n. 1, p. 652–663, 21 Jan. 2010.
- [70] ZHU, H. et al. Effect of biodiesel and ethanol on load limits of high-efficiency premixed low-temperature combustion in a diesel engine. **Fuel**, v. 106, n. x, p. 773–778, Apr. 2013.
- [71] ARUL MOZHI SELVAN, V.; ANAND, R. B.; UDAYAKUMAR, M. Combustion Characteristics of Diesohol Using Biodiesel as an Additive in a Direct Injection Compression Ignition Engine under Various Compression Ratios. **Energy & Fuels**, v. 23, n. 11, p. 5413–5422, 19 Nov. 2009.
- [72] ŞAHIN, Z.; DURGUN, O. Prediction of the Effects of Ethanol-Diesel Fuel Blends on Diesel Engine Performance Characteristics, Combustion, Exhaust Emissions, and Cost. **Energy & Fuels**, v. 23, n. 3, p. 1707–1717, 19 Mar. 2009.
- [73] HERREROS, J. M. et al. Extending the environmental benefits of ethanol–diesel blends through DGE incorporation. **Applied Energy**, v. 146, n. x, p. 335–343, May 2015.
- [74] YILMAZ, N. Comparative analysis of biodiesel–ethanol–diesel and biodiesel–methanol–diesel blends in a diesel engine. **Energy**, v. 40, n. 1, p. 210–213, Apr. 2012.
- [75] RAHIMI, H. et al. Diesterol: An environment-friendly IC engine fuel. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 335–342, Jan. 2009.
- [76] GUARIEIRO, L. L. N. L. N. et al. Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> 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.

- [77] PUTRASARIA, Y. et al. Performance and Emission Characteristic on a Two Cylinder DI Diesel Engine Fuelled with Ethanol-Diesel Blends. **Energy Procedia**, v. 32, p. 21–30, 2013.
- [78] LIU, S. et al. Effect of a Cetane Number (CN) Improver on Combustion and Emission Characteristics of a Compression-Ignition (CI) Engine Fueled with an Ethanol–Diesel Blend. **Energy & Fuels**, v. 24, n. 4, p. 2449–2454, 15 Apr. 2010.
- [79] TUTAK, W. Bioethanol E85 as a fuel for dual fuel diesel engine. **Energy Conversion and Management**, v. 86, p. 39–48, Oct. 2014.
- [80] NOGUCHI, N.; TERAOKA, H.; SAKATA, C. Performance improvement by control of flow rates and diesel injection timing on dual-fuel engine with ethanol. **Bioresource Technology**, v. 56, n. 1, p. 35–39, 1996.
- [81] BORUFF, P. A. et al. Evaluation of Diesel Fuel - Ethanol Microemulsions. **Transactions of the ASAE**, v. 25, n. 1, p. 0047–0053, 1982.
- [82] S. K. JHA et al. **A Comparative Study of Exhaust Emissions Using Diesel-Biodiesel-Ethanol Blends in New and Used Compression Ignition Engines**. ASABE Annual International Meeting. **Anais...** St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=5&AID=21512&CID=por2006&T=1>>
- [83] 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, Dec. 2011.
- [84] P. MEIRING et al. Tractor Performance and Durability with Ethanol-Diesel Fuel. **Transactions of the ASAE**, v. 26, n. 1, p. 0059–0062, 1983.
- [85] KOGANTI, R. B. et al. **Performance Evaluation Of Ethanol Diesel Blend In Tractors**. Sae. **Anais...** 16 Jan. 2004. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2004-28-0085/>>
- [86] LABECKAS, G.; SLAVINSKAS, S.; MAŽEIKI, 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, n. 2014, p. 698–720, Mar. 2014.
- [87] 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, n. 1, p. 98–103, Jan. 2011.
- [88] RANDAZZO, M. L.; SODRÉ, J. R. Cold start and fuel consumption of a vehicle fuelled with blends of diesel oil–soybean biodiesel–ethanol. **Fuel**, v. 90, n. 11, p. 3291–3294, Nov. 2011.
- [89] RAJESH, S.; KULKARNI, B. M. M.; KUMARAPPA, S. An Experimental Study on performance and emission characteristics of multi cylinder CRDI diesel engine fueled with Ethanol, Acid oil based Biodiesel and Diesel blends. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v. 7, n. 1, p. 256–265, 1 Jan. 2011.
- [90] HAMDAN, M. A.; KHALIL, R. H. Simulation of compression engine powered by Biofuels. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 8, p. 1714–1718, Aug. 2010.
- [91] PIDOL, L. et al. Ethanol–biodiesel–Diesel fuel blends: Performances and emissions in conventional Diesel and advanced Low Temperature Combustions. **Fuel**, v. 93, n. x, p. 329–338, Mar. 2012.
- [92] PARK, S. H. et al. Effect of Bioethanol Blended Diesel Fuel and Engine Load on Spray, Combustion, and Emissions Characteristics in a Compression Ignition Engine. **Energy &**

**Fuels**, v. 26, n. 8, p. 5135–5145, 16 Aug. 2012.

[93] PARK, S. H.; YOUN, I. M.; LEE, C. S. Influence of ethanol blends on the combustion performance and exhaust emission characteristics of a four-cylinder diesel engine at various engine loads and injection timings. **Fuel**, v. 90, n. 2, p. 748–755, Feb. 2011.

[94] MAGAND, S. et al. Utilisation d'un carburant diesel éthanolé à l'aide de méthodes de calibration avancées afin de satisfaire les normes euro 5 sans filtre à particules. **Oil and Gas Science and Technology**, v. 66, n. 5, p. 855–875, 25 Sep. 2011.

[95] 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, Sep. 2004.

[96] ODZIEMKOWSKA, M.; MATUSZEWSKA, A.; CZARNOCKA, J. Diesel oil with bioethanol as a fuel for compression-ignition engines. **Applied Energy**, v. 184, p. 1264–1272, Dec. 2016.

[97] CAN, Ö.; ÇELIKTEN, İ.; USTA, N. Effects of Ethanol Blended Diesel Fuel on Exhaust Emissions from a Diesel Engine. **Journal of Engineering Sciences**, v. 11, n. 2, p. 219–224, 2005.

[98] ZÖLDY, M. Ethanol-biodiesel-diesel blends as a diesel extender option on compression ignition engines. **Transport**, v. 26, n. 3, p. 303–309, 2011.

[99] ALPTEKIN, E. Evaluation of ethanol and isopropanol as additives with diesel fuel in a CRDI diesel engine. **Fuel**, v. 205, p. 161–172, Oct. 2017.

[100] TURKCAN, A. Effects of high bioethanol proportion in the biodiesel-diesel blends in a CRDI engine. **Fuel**, v. 223, n. March, p. 53–62, 2018.

[101] CORKWELL, K. C.; JACKSON, M. M.; DALY, D. T. **Review of exhaust emissions of compression ignition engines operating on e diesel fuel blends**. SAE Technical Papers. **Anais...**27 Oct. 2003Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2003-01-3283/>>

[102] COLE, R. L. et al. Effect of Ethanol Fuel Additive on Diesel Emissions. **Technology**, p. 52, 2000.

[103] AHMED, I. **Oxygenated Diesel: Emissions and Performance Characteristics of Ethanol-Diesel Blends in CI Engines**. SAE Technical Papers. **Anais...**20 Aug. 2001Disponível em: <<https://saemobilus.sae.org/content/2001-01-2475/>>

[104] COLE, R. L. et al. **Effects of Ethanol Additives on Diesel Particulate and NOx Emissions**. SAE Technical Papers. **Anais...**Argonne: 7 May 2001Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2001-01-1937/>>

[105] BEATRICE, C.; NAPOLITANO, P.; GUIDO, C. Injection parameter optimization by DoE of a light-duty diesel engine fed by Bio-ethanol/RME/diesel blend. **Applied Energy**, v. 113, p. 373–384, Jan. 2014.

[106] GUIDO, C.; BEATRICE, C.; NAPOLITANO, P. Application of bioethanol/RME/diesel blend in a Euro5 automotive diesel engine: Potentiality of closed loop combustion control technology. **Applied Energy**, v. 102, p. 13–23, Feb. 2013.

[107] PINZI, S. et al. Influence of ethanol/diesel fuel and propanol/diesel fuel blends over exhaust and noise emissions. **Energy Procedia**, v. 142, p. 849–854, Dec. 2017.

[108] ARMAS, O.; GARCÍA-CONTRERAS, R.; RAMOS, Á. Pollutant emissions from engine starting with ethanol and butanol diesel blends. **Fuel Processing Technology**, v. 100, p. 63–

72, Aug. 2012.

[109] 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, Jan. 2008.

[110] ARMAS, O.; CÁRDENAS, M. D.; MATA, C. **Smoke Opacity and NO<sub>x</sub> Emissions from a Bioethanol-Diesel Blend during Engine Transient Operation**. SAE Technical Papers. **Anais...** 16 Sep. 2007. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2007-24-0131/>>

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

[112] KIM, H.; CHOI, B. The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on nanoparticles and exhaust emissions from CRDI diesel engine. **Renewable Energy**, v. 35, n. 1, p. 157–163, Jan. 2010.

[113] KIM, H. N. N.; CHOI, B. C. C. Effect of ethanol-diesel blend fuels on emission and particle size distribution in a common-rail direct injection diesel engine with warm-up catalytic converter. **Renewable Energy**, v. 33, n. 10, p. 2222–2228, 2008.

[114] LEI, J. et al. A novel emulsifier for ethanol–diesel blends and its effect on performance and emissions of diesel engine. **Fuel**, v. 93, p. 305–311, Mar. 2012.

[115] CHEENKACHORN, K.; FUNGTAMMASAN, B. Biodiesel as an Additive for Diesohol. **International Journal of Green Energy**, v. 6, n. 1, p. 57–72, 4 Mar. 2009.

[116] CHEENKACHORN, K.; FUNGTAMMASAN, B. An Investigation of Diesel-Ethanol-Biodiesel Blends for Diesel Engine: Part 2—Emission and Engine Performance of a Light-Duty Truck. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 32, n. 10, p. 894–900, 12 Mar. 2010.

[117] SHI, X. et al. Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine. **Fuel**, v. 84, n. 12–13, p. 1543–1549, 2005.

[118] XING-CAI, L. et al. Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol–diesel blend fuel. **Fuel**, v. 83, n. 14–15, p. 2013–2020, Oct. 2004.

[119] LÜ, X. et al. Improving the Combustion and Emissions of Direct Injection Compression Ignition Engines Using Oxygenated Fuel Additives Combined with a Cetane Number Improver. **Energy & Fuels**, v. 19, n. 5, p. 1879–1888, Sep. 2005.

[120] BIETRESATO, M. et al. Use of diesel-biodiesel-bioethanol blends in farm tractors: first results obtained with a mixed experimental-numerical approach. **Energy Procedia**, v. 158, p. 965–971, Feb. 2019.

[121] LEI, J. L. L. et al. Emission characteristics of diesel engine fueled with ethanol-diesel blends in different altitude regions. **Journal of Biomedicine and Biotechnology**, v. 20, p. 10, 2011.

[122] KHOOBBAKHT, G. et al. Optimization of operating factors and blended levels of diesel, biodiesel and ethanol fuels to minimize exhaust emissions of diesel engine using response surface methodology. **Applied Thermal Engineering**, v. 99, p. 1006–1017, Apr. 2016.

[123] CHEN, H. et al. Study of oxygenated biomass fuel blends on a diesel engine. **Fuel**, v. 87, n. 15–16, p. 3462–3468, Nov. 2008.

[124] CHEN, H.; SHI-JIN, S.; JIAN-XIN, W. Study on combustion characteristics and PM

emission of diesel engines using ester–ethanol–diesel blended fuels. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 31, n. 2, p. 2981–2989, Jan. 2007.

[125] PANG, X. et al. Carbonyls emission from ethanol-blended gasoline and biodiesel-ethanol-diesel used in engines. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 6, p. 1349–1358, Feb. 2008.

[126] PANG, X. et al. Characteristics of carbonyl compounds emission from a diesel-engine using biodiesel–ethanol–diesel as fuel. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 36, p. 7057–7065, Nov. 2006.

[127] 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, Nov. 2003.

[128] OLIVEIRA, A. DE et al. Combustion characteristics, performance and emissions from a diesel power generator fuelled by B7-ethanol blends. **Fuel Processing Technology**, v. 139, n. X, p. 67–72, Nov. 2015.

[129] SHI, X. et al. Emission reduction potential of using ethanol-biodiesel-diesel fuel blend on a heavy-duty diesel engine. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 14, p. 2567–2574, 2006.

[130] OLIVEIRA, A. DE et al. Combustion, performance and emissions of a diesel power generator with direct injection of B7 and port injection of ethanol. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 39, n. 4, p. 1087–1096, Apr. 2017.

[131] VOJTÍŠEK, M. et al. Combustion of ethanol-vegetable oil blends in diesel engines. **Technical University of Liberec**, v. 127, n. 5.6.2016, p. 185–189, 2011.

[132] GUEDES, A. D. M. **Estudo Experimental sobre o Impacto do Etanol em Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol nos Motores de Ignição por Compressão**. 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2017.

[133] GUEDES, A. D. M.; BRAGA, S. L.; PRADELLE, F. A. Y. Performance and combustion characteristics of a compression ignition engine running on diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends – Part 2: Optimization of injection timing. **Fuel**, v. 225, n. April, p. 174–183, Aug. 2018.

[134] PRADELLE, F. A. Y. et al. Performance and combustion characteristics of a compression ignition engine running on diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends – Potential as diesel fuel substitute on an Euro III engine. **Renewable Energy**, v. 136, n. x, p. 586–598, Jun. 2019.

[135] CRUZ, Y. R. **Combustíveis alternativos: Mistura de etanol anidro ao óleo diesel para motores de ciclo diesel com sistema de injeção de bomba rotativa**. 2009. 181 f. Tese ((Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009.

[136] ZHU, L. et al. Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol–biodiesel blends. **Fuel**, v. 90, n. 5, p. 1743–1750, May 2011.

[137] CHEUNG, C. S.; DI, Y.; HUANG, Z. Experimental investigation of regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with ultralow-sulfur diesel fuel blended with ethanol and dodecanol. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 39, p. 8843–8851, Dec. 2008.

[138] TSANG, K. S. et al. Reducing Emissions of a Diesel Engine Using Fumigation Ethanol and a Diesel Oxidation Catalyst. **Energy & Fuels**, v. 24, n. 11, p. 6156–6165, 18 Nov. 2010.

[139] DI, Y.; CHEUNG, C. S.; HUANG, Z. Comparison of the Effect of Biodiesel-Diesel and Ethanol-Diesel on the Particulate Emissions of a Direct Injection Diesel Engine. **Aerosol Science and Technology**, v. 43, n. 5, p. 455–465, 20 Apr. 2009.

- [140] WEI, L.; CHEUNG, C. S. S.; NING, Z. Effects of biodiesel-ethanol and biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel engine. **Energy**, v. 155, n. x, p. 957–970, 2018.
- [141] WANG, X. et al. Diesel engine gaseous and particle emissions fueled with diesel-oxygenate blends. **Fuel**, v. 94, p. 317–323, Apr. 2012.
- [142] ESTRADA, J. S. et al. Emissões de gases poluentes de um motor ciclo Diesel utilizando misturas de biocombustíveis. **Revista Agrarian**, v. 9, n. 33, p. 274–279, 2016.
- [143] ESTRADA, J. S. et al. Performance of an agricultural engine using blends of diesel and ethanol. **Ciência Rural**, v. 46, n. 7, p. 1200–1205, Jul. 2016.
- [144] FARIAS, M. S. DE et al. Emissions of an agricultural engine using blends of diesel and hydrous ethanol. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 7, 15 Feb. 2019.
- [145] ROY, M. M. et al. Cold start idle emissions from a modern Tier-4 turbo-charged diesel engine fueled with diesel-biodiesel, diesel-biodiesel-ethanol, and diesel-biodiesel-diethyl ether blends. **Applied Energy**, v. 180, n. x, p. 52–65, Oct. 2016.
- [146] FARIAS, M. S. DE et al. Performance of an agricultural engine using mineral diesel and ethanol fuels. **Ciência Rural**, v. 47, n. 3, p. 1–6, 2017.
- [147] FANG, Q. et al. Effects of ethanol-diesel-biodiesel blends on combustion and emissions in premixed low temperature combustion. **Applied Thermal Engineering**, v. 54, n. 2, p. 541–548, 2013.
- [148] BARABÁS, I.; TODORUȚ, A.; BĂLDEAN, D. Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends. **Fuel**, v. 89, n. 12, p. 3827–3832, Dec. 2010.
- [149] BARABÁS, I.; TODORUȚ, I.-A. Utilization of Biodiesel-Diesel-Ethanol Blends in CI Engine. In: MONTERO, G. (Ed.). **Biodiesel – Quality, Emissions and By-Products**. Rijeka (Croácia): InTech Published, 2011. p. 215–234.
- [150] IACONO, G. E. P. **Desempenho Do Motor De Um Trator Agrícola Utilizando Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol Desempenho Do Motor De Um Trator Agrícola Utilizando Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol**. 2017. 98 f. Dissertação (mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2017.
- [151] JANOUSEK, G. S. **Evaluation of Ethanol and Water Introduction via Fumigation on Efficiency and Emissions of a Compression Ignition Engine Using an Atomization Technique**. 2010. 124 f. Tese (Doutorado em Agricultural and Biological Systems Engineering) - University of Nebraska. 2010.
- [152] SHI, X. et al. Combination of biodiesel-ethanol-diesel fuel blend and SCR catalyst assembly to reduce emissions from a heavy-duty diesel engine. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, n. 2, p. 177–182, Feb. 2008.
- [153] SURAWSKI, N. C. et al. Gaseous and particle emissions from an ethanol fumigated compression ignition engine. **Energy Conversion and Management**, v. 54, n. 1, p. 145–151, Feb. 2012.
- [154] ARAPATSAKOS, C. Application of diesel–ethanol mixtures in tractor engine. **International Journal of Energy and Environment**, v. 3, n. 2, p. 77–84, 2009.
- [155] JOEL T. WALKER. Diesel Tractor Engine Performance as Affected by Ethanol Fumigation. **Transactions of the ASAE**, v. 27, n. 1, p. 049–053, 1984.

- [156] SUTAR, P. S. et al. **Development of Diesel-Ethanol Engine for HCV**. SAE Technical Paper Series. *Anais...*9 Jan. 2019Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2019-26-0089/>>
- [157] SONG, C.-L. et al. Influence of ethanol–diesel blended fuels on diesel exhaust emissions and mutagenic and genotoxic activities of particulate extracts. **Journal of Hazardous Materials**, v. 149, n. 2, p. 355–363, Oct. 2007.
- [158] SHADIDI, B. et al. Experimental investigation of the tractor engine performance using diesohol fuel. **Applied Energy**, v. 114, p. 874–879, Feb. 2014.
- [159] KASS, M. D. et al. **Emissions From a 5.9 Liter Diesel Engine Fueled With Ethanol Diesel Blends**. SAE Technical Papers. *Anais...*7 May 2001Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2001-01-2018/>>
- [160] MORETTI, R. R. R. **Mistura Diesel, biodiesel e etanol anidro: uma possibilidade para reduzir o custo da cadeia de produção da cana-de-açúcar**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. 2013.
- [161] RAKOPOULOS, D. C. et al. Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine. **Fuel**, v. 90, n. 5, p. 1855–1867, May 2011.
- [162] RAKOPOULOS, D. C. C. et al. Effects of ethanol-diesel fuel blends on the performance and exhaust emissions of heavy duty DI diesel engine. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 11, p. 3155–3162, 2008.
- [163] RAKOPOULOS, C. D. et al. Multi-zone modeling of combustion and emissions formation in DI diesel engine operating on ethanol–diesel fuel blends. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 4, p. 625–643, Apr. 2008.
- [164] RAKOPOULOS, C. D. et al. Experimental comparative assessment of butanol or ethanol diesel-fuel extenders impact on combustion features, cyclic irregularity, and regulated emissions balance in heavy-duty diesel engine. **Energy**, v. 174, p. 1145–1157, May 2019.
- [165] BIZZO, W.; MORETTI, R. R. The effects of blending diesel, ethanol, and biodiesel. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 38, n. 14, p. 2111–2118, 17 Jul. 2016.
- [166] ALPTEKIN, E. et al. Using waste animal fat based biodiesels–bioethanol–diesel fuel blends in a DI diesel engine. **Fuel**, v. 157, p. 245–254, Oct. 2015.
- [167] CHEN, Z. Q. et al. Physical-chemical properties of ethanol-diesel blend fuel and its effect on the performance and emissions of a turbocharged diesel engine. **International Journal of Automotive Technology**, v. 10, n. 3, p. 297–303, 2 Jun. 2009.
- [168] FRANK, B. P. et al. **A Study of the Effects of Fuel Type and Emission Control Systems on Regulated Gaseous Emissions from Heavy-Duty Diesel Engines**. SAE Technical Papers. *Anais...*8 Mar. 2004Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2004-01-1085/>>
- [169] QI, D. H. et al. Experimental investigation of a turbocharged CRDI diesel engine fueled with Tung oil-diesel-ethanol microemulsion fuel. **Renewable Energy**, v. 113, p. 1201–1207, Dec. 2017.
- [170] QI, D. H. et al. Combustion and emission characteristics of diesel-tung oil-ethanol blended fuels used in a CRDI diesel engine with different injection strategies. **Applied Thermal Engineering**, v. 111, p. 927–935, Jan. 2017.
- [171] MERRITT, P. M. et al. **Regulated and Unregulated Exhaust Emissions Comparison**

**for Three Tier II Non-Road Diesel Engines Operating on Ethanol-Diesel Blends.** SAE Technical Paper Series. **Anais...**11 May 2005Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2005-01-2193/>>

[172] LÖFVENBERG, U. Short report from emission test using low blend of ethanol derivative in diesel fuel. **Region, Bio Fuel**, n. March, 2009.

[173] MCCORMICK, R. L.; ROSS, J. D.; GRABOSKI, M. S. Effect of Several Oxygenates on Regulated Emissions from Heavy-Duty Diesel Engines. **Environmental Science & Technology**, v. 31, n. 4, p. 1144–1150, Apr. 1997.

[174] FANICK, E. R. **Fuel and Fuel Additive Registration Testing of Ethanol-Diesel Blend for O2Diesel, Inc.** Golden, CO, United States: National Renewable Energy Laboratory, 1 Feb. 2004. Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/15006750/>>.

[175] SPREEN, K. **Evaluation of oxygenated diesel fuels.Final report for Pure Energy Corporation.** San Antonio, TX, United States: Southwest Research Institute., 1999.

[176] ALI, Y.; HANNA, M. A.; BORG, J. E. Optimization of diesel, methyl tallowate and ethanol blend for reducing emissions from diesel engine. **Bioresource Technology**, v. 52, n. 3, p. 237–243, Jan. 1995.

[177] LIKOS, B.; CALLAHAN, T. J.; MOSES, C. A. **Performance and emissions of ethanol and ethanol-diesel blends in direct-injected and pre-chamber diesel engines.** SAE Technical Papers. **Anais...**1 Feb. 1982Disponível em: <<https://www.sae.org/content/821039/>>

[178] SONG, C. et al. Carbonyl compound emissions from a heavy-duty diesel engine fueled with diesel fuel and ethanol–diesel blend. **Chemosphere**, v. 79, n. 11, p. 1033–1039, May 2010.

## APÊNDICE B – REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 1 – LOCAL, NÚMERO DE PUBLICAÇÕES, E FATOR DE IMPACTO

Tabela 41 - Journals and other places of publication of bibliometric research, the respective number of publications and the impact factor according to the Journal Citation Reports (JCR<sup>®</sup>) of 2019

Journal name or place of publication	Number of publications	Impact factor JCR <sup>®</sup> Category (2019)
<i>Fuel</i>	32	5.578
<i>Energy</i>	13	6.082
<i>SAE International</i>	12	NR <sup>1</sup>
<i>Renewable Energy</i>	11	6.274
<i>Applied Energy</i>	10	8.848
<i>Energy &amp; Fuels</i>	10	3.421
<i>Energy Conversion and Management</i>	9	8.208
<i>Applied Thermal Engineering</i>	6	4.725
<i>Atmospheric Environment</i>	6	4.039
Dissertação de mestrado	4	NR
<i>Energy Procedia</i>	3	NR
<i>Relatório técnico - Report</i>	3	NR
<i>Transactions of the ASAE</i>	3	0.664
<i>Biofuels</i>	2	1.496
<i>Bioresource Technology</i>	2	7.539
<i>Ciência Rural</i>	2	0.556
<i>Energy Sources</i>	2	0.543
<i>Fuel Processing Technology</i>	2	4.982
<i>IEEE - Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering</i>	2	NR
<i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering</i>	2	1.384
Tese de doutorado	2	NR
<i>Aerosol Science and Technology</i>	1	2.340
<i>Alexandria Engineering Journal</i>	1	2.460
<i>Applied Engineering in Agriculture</i>	1	0.973
<i>Applied Mechanics and Materials</i>	1	NR
<i>BioEthanol for Sustainable Transport</i>	1	2.709
<i>Biomass and Bioenergy</i>	1	3.551
<i>Chemosphere</i>	1	5.778

		(conclusão)
<i>Combustion Science and Technology</i>	1	1.730
<i>Energy for Sustainable Development</i>	1	3.610
<i>Environmental Science &amp; Technology</i>	1	7.864
<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	1	3.056
<i>Environmental Technology</i>	1	2.213
<i>InTech</i>	1	0.031
<i>International Journal of Automotive Engineering and Technologies</i>	1	NR
<i>International Journal of Automotive Technology</i>	1	1.245
<i>International Journal of Current Engineering and Technology</i>	1	NR
<i>International Journal of Energy and Environment</i>	1	NR
<i>International Journal of Engineering, Science and Technology</i>	1	NR
<i>International Journal of Green Energy</i>	1	1.388
<i>International Journal of Oil, Gas and Coal Technology</i>	1	0.752
<i>International Journal of Recent Research and Applied Studies</i>	1	NR
<i>Iranica Journal of Energy &amp; Environment</i>	1	1.017
<i>Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering</i>	1	NR
<i>Journal of Biomedicine and Biotechnology</i>	1	3.169
<i>Journal of Engineering Sciences</i>	1	NR
<i>Journal of Environmental Sciences</i>	1	4.302
<i>Journal of Hazardous Materials</i>	1	9.038
<i>Journal of Mechanical Science and Technology</i>	1	1.345
<i>Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering</i>	1	1.755
<i>Journal of the Energy Institute</i>	1	4.748
<i>Oil and Gas Science and Technology</i>	1	1.395
<i>Proceedings of the Combustion Institute</i>	1	5.627
<i>Revista Agrarian</i>	1	NR
<i>Scientia cum Industria</i>	1	NR
<i>Semina: Ciências Agrárias</i>	1	0.412
<i>Technical University of Liberec</i>	1	NR
<i>Thermal Science</i>	1	1.574
<i>Transactions of the ASABE</i>	1	1.156
<i>Transport</i>	1	1.053
<i>World Congress on Engineering</i>	1	NR
Total de publicações	178	

<sup>1</sup> NR – Not registered.

Fonte: Autor.

**ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO ÓLEO DIESEL DO TIPO B SEGUNDO A  
RESOLUÇÃO ANP Nº 50 DE 23 DE DEZEMBRO DE 2013.**

Características	Unidade	BS10	BS500
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas	
Cor	-	Incolor a amarelado	Vermelho
Cor ASTM, máx.	-	3	3
Teor de biodiesel	% volume	10	10
Enxofre total, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	10	500
Destilação			
10% vol., recuperados, mín.	°C	180	Anotar
50% vol., recuperados		245 a 295	245 a 310
85% vol., recuperados, máx.		-	360
90% vol., recuperados		-	Anotar
95% vol., recuperados, máx		370	-
Massa específica a 20°C	kg.m <sup>-3</sup>	815 a 853	815 a 865
Ponto de fulgor, mín.	°C	38	38
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	2 a 4,5	2 a 5
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	Varia conforme estado da federação e época do ano	
Número de cetano, mín. ou Número de cetano derivado (NCD), mín.	-	48	42
Resíduo de carbono Ramsbot-tom no resíduo dos 10% finais da destilação, máx.	% massa	0,25	0,25
Cinzas, máx.	% massa	0,01	0,01
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx	-	1	1
Teor de Água, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	200	500
Contaminação total, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	24	-
Água e sedimentos, máx.	% volume	-	0,05
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, máx.	% massa	11	-

Fonte: Adaptado de ANP (2013).

**ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DO BIODIESEL SEGUNDO O REGULAMENTO  
TÉCNICO ANP Nº 3/2014**

Características	Unidade	Limite
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas
Massa específica a 20° C	kg.m <sup>-3</sup>	850 a 900
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	3 a 6
Teor de água, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	200
Contaminação Total, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	24
Ponto de fulgor, mín.	°C	100
Teor de éster, mín	% massa	96,5
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,02
Enxofre total, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	10
Sódio + Potássio, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	5
Cálcio + Magnésio, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	5
Fósforo, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	10
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx.	-	1
Número Cetano	-	Anotar
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	Varia conforme estado da federação e época do ano
Índice de acidez, máx.	mgKOH.g <sup>-1</sup>	0,5
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02
Glicerol total, máx.	% massa	0,25
Monoacilglicerol, máx.	% massa	0,7
Diacilglicerol, máx.	% massa	0,2
Triacilglicerol, máx.	% massa	0,2
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,2
Índice de Iodo	g.100 <sup>-1</sup>	Anotar
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.	h	6

Fonte: Adaptado de ANP (2014).

**ANEXO C – ESPECIFICAÇÃO DO ETANOL ANIDRO E HIDRATADO SEGUNDO A  
RESOLUÇÃO ANP Nº19 DE 15 DE ABRIL DE 2015**

Características	Unidade	Etanol Anidro	Etanol Hidratado
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas	Límpido e isento de impurezas
Cor	-	Laranja (após corante)	Sem corantes
Acidez total, máx. (em miligramas de ácido acético)	mg.L <sup>-1</sup>	30	30
Condutividade elétrica, máx.	µS.m <sup>-1</sup>	300	300
Massa específica a 20°C	kg.m <sup>-3</sup>	791,5 máx.	805,2 a 811,2
Teor alcoólico	% massa	99,3 mín.	92,5 a 94,6
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	-	6 a 8
Teor de etanol, mín.	% volume	98	94,5
Teor de água, máx.	% massa	0,7	7,5
Teor de metanol, máx.	% volume	0,5	0,5
Resíduo por evaporação, máx.	mg/100mL	5	5
Teor de hidrocarbonetos, máx.	% volume	3	3
Teor de cloreto, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	1	1
Teor de sulfato, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	4	4
Teor de ferro, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	5	5
Teor de sódio, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	2	2
Teor de cobre, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	0,07	0,07
Teor de enxofre, máx.	mg.kg <sup>-1</sup>	Anotar	Anotar

Fonte: Adaptado de ANP (2015).

## ANEXO D - BOLETIM DE CONFORMIDADE DOS COMBUSTÍVEIS

 <b>Boletim de Conformidade</b> SANTA MARIA, 10 de Abril de 2018		Nota Fiscal: 000186490		
Prezado Cliente, ITAIMBE COMBUSTIVEIS LTDA		CNPJ : 87.147.419/0001-59		
ROD BR 287 8401 KM 244 - PQ SAN CARLOS SANTA MARIA - RS - 97070150				
A IPIRANGA PRODS.DE PETRÓLEO S/A. em conformidade com Res.ANP N 40 25/10/2013(Gasolina), Res.ANP N 50 23/12/2013(Óleo Diesel Rod.), Res.ANP N 1 9 15/04/2015(Etanol Hidratado) e Res.ANP N 52 29/12/2010(Óleo Diesel Marítimo) informa abaixo características analisadas nos Boletins de Conformidade emitidos por laboratório contratado arquivados na Base Distribuição bem como características também analisadas pela Distribuidora				
Produto: 500B - DIESEL S 500B Responsável Técnico: JOSELAINE LEITZKE		Boletim No. : 45727		Batelada de : 07/12/2017 CRQ: 05404276
Característica	Método	Unidade	Especificação	Resultado
Aspecto	ABNT 14954	-	LII	LII
Cor Visual	Visual	-	Vermelho	Vermelho
Ponto de Fulgor	ASTM D56 D93	°C	Acima de 38	43
Massa Específica	ASTM D1298 D4052	Kg/m3	De 815 Até 865	843.8
Condutividade Elétrica	ASTM D2624 D4308	pS/m	Acima de 25	295
Teor de Água	ASTM D6304	mg/kg	Até 500	118.0
<hr/>				
Produto: S10B - DIESEL S 10B Responsável Técnico: KATIUSSIA L. DOS ANJOS		Boletim No. : 904/18		Batelada de : 04/04/2018 CRQ: 05408373
Característica	Método	Unidade	Especificação	Resultado
Aspecto	ABNT 14954	-	LII	LII
Ponto de Fulgor	ASTM D56 D93	°C	Acima de 38	70
Condutividade Elétrica	ASTM D2624 D4308	pS/m	Acima de 25	71
Teor de Água	ASTM D6304	mg/kg	Até 200	152.5
Cor Visual	Visual	-	Incolor / Amarelado Alaranjado	Amarelado
Massa Específica	ASTM D1298 D4052	Kg/m3	De 815 Até 853	846.3
<hr/>				
<b>DIESEL ORIGINAL ADITIVADO . Registro ANP n° 387/2003.</b> Limpeza dos bicos injetores e demais partes do sistema de injeção. Reduz custos de manutenção com regulagem dos bicos injetores. Redução de depósitos com consequente melhora na combustão e na emissão de poluentes. Confere proteção anticorrosiva e reduz a formação de espuma no tanque de combustível.		<b>DIESEL ORIGINAL ADITIVADO . Registro ANP n° 387/2003.</b> Limpeza dos bicos injetores e demais partes do sistema de injeção. Reduz custos de manutenção com regulagem dos bicos injetores. Redução de depósitos com consequente melhora na combustão e na emissão de poluentes. Confere proteção anticorrosiva e reduz a formação de espuma no tanque de combustível.		
<b>Os benefícios serão melhor percebidos com a continuidade do uso desses combustíveis</b>				
Atenciosamente, IPIRANGA PRODUTOS PETROLEO SA		Página: 1 / 1		

## ANEXO E - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TRATOR MF 6713R Dyna-4

MF 6713 R DYNA-4	
<b>PERFORMANCE</b>	SAE J1995
Potência do motor - cv (kW) @ 2000	135 (100)
Potência máxima na TDP - cv (kW)	114 (84)
Torque máximo no motor @ 1500 rpm - Nm (mkgf)	540
<b>MOTOR</b>	
Marca	AGCO POWER
Número de cilindros	4
Cilindrada - cm <sup>3</sup>	4400
Aspiração	Turbo Intercooler
<b>SISTEMA ELÉTRICO</b>	
Alternador - A	120
Tensão - V	12
Bateria - Ah	70 ou 95
<b>EMBREAGEM</b>	
Tipo	Multi disco úmida
Acionamento	Eletro-hidráulica
<b>TRANSMISSÃO</b>	
Tipo	Dyna-4 16x16
<b>RODADO</b>	
Traseiro	Dianteiro
18.4-34R1	14.9-24R1
18.4-38R1	14.9-28 R1
18.4-38R1 Duplo	14.9-28 R1
23.1-30R1	14.9-26R1
23.1-30R2	14.9-28R2
24.5-32R1	14.9-28R1
13.6X38R1	13.6X24R1
13.6X38R1 Duplo	13.6X24R1
380/85R38R1	320/85R28R1
600/65R38R1	480/65R28R1
<b>TOMADA DE POTÊNCIA</b>	
Tipo	Eletro-hidráulica
Rotação nominal da TDP - rpm	540/540E 540 / 540E/1000
Rotação do motor à rotação nominal da TDP - rpm	1560 (540E) 1920 (540) 1964 (1000)
<b>SISTEMA DE DIREÇÃO</b>	
Tipo	Hidrostática
<b>SISTEMA HIDRÁULICO</b>	
Vazão máxima - l/min	98 / 105
Pressão máxima - bar (kgf/cm <sup>2</sup> )	200 (204)
<b>LEVANTE DE TRÊS PONTOS</b>	
Controle	Eletrônico
Capacidade de levante - kgf	4950
Capacidade de levante na rótula a 610mm do engate - kgf	4260
Ao acoplar implementos pesados nos 3P, observar limite de carga dos pneus	
Funções de controle eletrônico	Posição, profundidade, reação, controle de transporte e Intermix
<b>SISTEMA HIDRÁULICO</b>	
Controle remoto	
Tipo	Independente
Bomba	Engrenagem / Pistão
Número de válvulas	2 / 3

MF 6713 R DYNA-4		
<b>TABELA DE VELOCIDADES</b>		
Rotação do motor - rpm	2000	
Pneu	23.1-30 R1 / 14.9-28 R1	
Frente / Ré		
Marchas	Velocidade	Redutor de Velocidade
1ª A	1,90	0,15
1ª B	2,34	0,19
1ª C	2,85	0,23
1ª D	3,50	0,28
2ª A	4,51	0,36
2ª B	5,54	0,45
2ª C	6,76	0,54
2ª D	8,31	0,67
3ª A	9,16	0,74
3ª B	11,26	0,90
3ª C	13,73	1,10
3ª D	16,89	1,36
4ª A	21,12	1,70
4ª B	25,97	2,08
4ª C	31,68	2,54
4ª D	38,95	3,13
<b>EIXO DIANTEIRO</b>		
Tipo	4x4	
Acionamento	Eletro-hidráulico	
Bloqueio do diferencial	Eletro-hidráulico	
<b>EIXO TRASEIRO</b>		
Tipo	Flange	
Redução final	Epicíclica	
Bloqueio do diferencial	Eletro-hidráulica	
<b>FREIOS</b>		
Serviço		
Nº de discos	18 discos (10 orgânicos e 8 de metal)	
Tipo	Multidisco úmido	
Acionamento	Hidráulico	
Estacionamento		
Tipo	Freio de mão mecânico	
<b>CAPACIDADES</b>		
Tanque de combustível - l	210	
Transmissão / hidráulico - l	75	
<b>PESOS E DIMENSÕES</b>		
Peso máximo com lastro - kg	7150	
Comprimento total - mm	4822	
Altura máxima - mm	2885	
Distância entre eixos - mm	2622	
Vão livre - mm	433	
<b>BITOLA</b>		
Dianteira - mm	2000	
Traseira - mm	2110	
Largura externa traseira - mm	2415	
Pneus utilizados para as medidas - 18.4-38R1 14.9-28 R1		
<b>TECNOLOGIA EMBARCADA</b>		
Piloto Automático	Preparação para Auto-Guide™ 3000 (opc.) Auto-Guide™ 3000 decimétrico (opc.)* Auto-Guide™ 3000 centimétrico - RTK (opc.)	
Telemetria	AgCommand® (opc.)	
*Preparado para sinal decimétrico com opção de sinal centimétrico (RTK). Quando não habilitado sinal de correção Omnistar, o sistema trabalha como submétrico através do algoritmo interno TRUPASS.		
<b>OPCIONAIS</b>		
Banco com suspensão pneumática	540/540E/1000	
Supercreeper		
AgCommand®		
Piloto automático Auto-Guide™ 3000 + vazão de 105 l/min no controle remoto		

Fonte: Catálogo Massey Ferguson MF 6713R Dyna-4 (2016).

