

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

**DESEMPENHO E EMISSÕES DE MOTOR
AGRÍCOLA CICLO DIESEL UTILIZANDO
DIFERENTES COMBUSTÍVEIS**

TESE DE DOUTORADO

Gismael Francisco Perin

Santa Maria, RS, Brasil

2014

DESEMPENHO E EMISSÕES DE MOTOR AGRÍCOLA CICLO DIESEL UTILIZANDO DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

Gismael Francisco Perin

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da
Universidade Federal de Santa Maria como requisito parcial para obtenção do
grau de

Doutor em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Schlosser

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Perin, Gismael Francisco

Desempenho e emissões de motor agrícola ciclo Diesel utilizando diferentes combustíveis / por Gismael Francisco Perin. – 2014.

124 f.: il.; 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, 2014.

1. Biodiesel. 2. Trator. 3. Dinamômetro. I. Schlosser, José Fernando. II. Título.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Gismael Francisco Perin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: gismaelperin@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**DESEMPENHO E EMISSÕES DE MOTOR AGRÍCOLA CICLO DIESEL
UTILIZANDO DIFERENTES COMBUSTÍVEIS**

elaborada por
Gismael Francisco Perin

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Fernando Schlosser, Dr.
(Presidente/Orientador)

Emilio Gil, Dr. (Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha)

Ulisses Giacomini Frantz, Dr. (UNIPAMPA)

Paulo Romeu Moreira Machado, Dr. (UFSM)

Miguel Neves Camargo, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 25 de Julho de 2014.

Dedico este trabalho à minha amada esposa Rosi...

...para meus pais Gelsi e Helena, ofereço.

AGRADECIMENTOS

A **minha família** por estar sempre presente em todos os momentos e ser a âncora da minha vida e o balizador da minha conduta, em especial aos meus pais e minha esposa.

A **Universidade Federal de Santa Maria** na qual tive toda minha formação universitária - Graduação, Mestrado e Doutorado - e me iniciou na minha profissão docente.

Ao professor Dr. **José Fernando Schlosser** por me orientar e formar minha vida profissional, pela sua competência e compreensão, por ser meu amigo e padrinho, enfim por ser modelo de pessoa e profissional.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola** - PPGEA/UFSM, e sua atual secretária Luciana pela competência e agilidade.

Ao **Núcleo de Ensaios de Máquinas Agrícolas** por me adotar desde julho de 2003 até agora, a todos seus professores, técnicos e bolsistas que passaram no NEMA neste período e que de algum modo me auxiliaram na minha formação.

Aos colegas do Laboratório de Agrotecnologia do NEMA, **Ulisses Giacomini Frantz, Marcelo Farias, Fabricio Azevedo Rodrigues, Javier Solis Estrada**, que auxiliaram em diversos momentos na elaboração desta tese, com os equipamentos, com o planejamento e com os experimentos.

Aos professores **Emílio Gil, Ulisses Giacomini Frantz, Miguel Neves Camargo e Paulo Romeu Moreira Machado**, por participarem da minha banca de defesa de doutorado e colaborarem com sugestões a este trabalho.

Aos colegas professores da sala 1 da Universidade Federal da Fronteira Sul *Campus Erechim*, **Anderson, Gean Delise, Lauri, Paulo, Fábio, Leandro e André** pelo auxílio em vários momentos na elaboração deste trabalho.

À minha amiga e comadre **Bruna Mendonça Alves** por servir de suporte logístico em Santa Maria durante a realização deste trabalho.

Aos três softwares livres que possibilitaram a realização deste trabalho - Linux (sistema operacional), \LaTeX (processador de texto) e R (estatística) e ao professor Dr. **Fábio Mariano Bayer** pela amizade, por me apresentar estes softwares e estar sempre disposto a me auxiliar.

A empresa **OLFAR - Alimento e Energia SA** - pela cedência do biodiesel utilizado nos experimentos.

“Há mais coisas entre o céu e a Terra do que supõe nossa vã filosofia”
— WILLIAM SHAKESPEARE

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

DESEMPENHO E EMISSÕES DE MOTOR AGRÍCOLA CICLO DIESEL UTILIZANDO DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

AUTOR: GISMAEL FRANCISCO PERIN

ORIENTADOR: JOSÉ FERNANDO SCHLOSSER

Local da Defesa e Data: Santa Maria, 25 de Julho de 2014.

O comportamento dos motores agrícolas ciclo Diesel quando altera-se o tipo de combustível e o modo de operação, deve ser conhecido para que se possa identificar qual o melhor combustível que resulte em melhor desempenho e menor emissão de poluentes. Entretanto, quando se utiliza determinado tipo de combustível, com ou sem misturas, os parâmetros do motor como torque, potência e consumo, e as emissões de gases se alteram de maneira diferenciada. Portanto, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência dos tipos de combustíveis nos parâmetros de desempenho dos motores agrícolas ciclo Diesel e nas emissões de gases gerados pela queima destes combustíveis. Para isto, primeiramente foi realizado um experimento para determinar o número de repetições ideal e o tempo de aquecimento do motor para realizar os experimentos propostos pelos objetivos. Foram realizados 18 repetições separadas em 3 grupos, correspondentes aos tempos de aquecimento de 20, 60 e 100 minutos. Para identificar se houve diferença significativa entre os tempos de aquecimento foi realizado a análise da variância e o número de repetições mínimo necessário foi identificado pelo menor índice de coeficiente de variação. O experimento de desempenho do motor com diferentes combustíveis foi realizado utilizando 11 combustíveis, (Diesel S10, diesel S500, biodiesel e suas misturas [5%, 10%, 15%, 20%, 50% e 100% de concentração de biodiesel no diesel]). As variáveis respostas avaliadas foram torque, potência, consumo horário e consumo específico. Foi realizado a análise da variância e, caso apresentasse diferença, os dados foram submetidos ao teste de comparação de médias (Tukey $p \geq 0,05$) e análise de regressão linear. Ainda foram analisadas as emissões de O_2 , CO_2 , opacidade, NO_2 , NO , CO e HC . Os combustíveis utilizados foram os mesmos do experimento de desempenho, com as mesmas misturas. O ensaio de emissões seguiu a metodologia prevista na Norma NBR ISO 8174-4:2012, que indica 8 modos de operação do motor em três rotações. Foi realizado a análise da variância e, caso apresentasse diferença, os dados foram submetidos ao teste de comparação de médias (Tukey $p \geq 0,05$) e análise de regressão linear. Os resultados informam que quatro foram o número de repetições para o ensaio de desempenho do motor e que 20 minutos foi o tempo de aquecimento do motor. Tanto o tipo de combustível quanto o modo de operação alteraram significativamente o desempenho e as emissões. Houve redução do torque máximo e da potência máxima e aumento do consumo horário e específico mínimo com incremento de biodiesel na mistura. As emissões de NO_2 e O_2 aumentaram com a maior concentração de biodiesel na mistura. Já as emissões de CO_2 , opacidade, NO , CO e HC reduziram conforme foi aumentado o teor de biodiesel na mistura com diesel mineral. Em todas as variáveis analisadas, com exceção do O_2 , ocorreu redução das emissões quando se diminuiu a carga aplicada no motor. O combustível que reduziu as emissões e manteve o desempenho, comparativamente com o diesel comercial, foi o Diesel S10 com 20% de biodiesel.

Palavras-chave: Biodiesel. Trator. Dinamômetro.

ABSTRACT

PhD's Dissertation
Post-Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria

PERFORMANCE AND EMISSIONS FOR AGRICULTURAL CYCLE DIESEL ENGINE USING DIFFERENT FUEL'S

AUTHOR: GISMAEL FRANCISCO PERIN

ADVISOR: JOSÉ FERNANDO SCHLOSSER

Defense Place and Date: Santa Maria, July 25st, 2014.

The behavior of the agricultural cycle diesel engine when changes the fuel type and operating mode, must be known so that we can identify the best fuel resulting in better performance at lower emissions. However, when using particular type of fuel, with or without blends, the motor parameters such as torque, power and consumption, and emissions of gases changes. Therefore, the aim of this work was to verify the influence of the types of fuels for performance parameters of the agricultural cycle diesel engines and the emissions generated by burning fossil fuels. For this first experiment was conducted to determine the ideal number of repetitions and the warming's time the engine to perform the experiments proposed by objectives. Eighteen repetitions were conducted in 3 groups corresponding to warm times of 20, 60 and 100 minutes. To identify whether there was a significant difference between the warming's time was conducted the analysis of variance and the minimum number of repetitions required was identified by a lower rate of coefficient of variation. The experimental performance of the engine with different fuels was performed using 11 fuel (Diesel S10, S500 diesel, biodiesel and its blends [5%, 10%, 15%, 20%, 50% and 100% concentration of biodiesel in diesel]). Outcome variables were assessed torque, power consumption and time specific consumption. Analysis of variance was performed and, if present difference, the data were subjected to the mean comparison test (Tukey $p \geq 0.05$) and linear regression analysis. Emissions of O₂, CO₂, NO₂, NO, CO and HC were analyzed. The fuels used were the same performance experiment with the same blends. The emissions test followed the methodology laid down in the NBR ISO 8174-4:2012, which indicates 8 modes of operation of the engine in three rotations. Analysis of variance was performed and, if present difference, the data were subjected to the mean comparison test (Tukey $p \geq 0.05$) and linear regression analysis. The results report that four were the number of repetitions for the test performance and that 20 minutes was the time of warming the engine. Both the type of fuel and the operating mode significantly alter the performance and emissions. There was a reduction of the maximum torque and maximum power and increased consumption and minimum specific consumption with increase of biodiesel in the blend. Emissions of NO₂ and O₂ increased with higher concentration of biodiesel in the blend. Emissions of CO₂, opacity, NO, CO and HC were decreased as increasing the amount of biodiesel in the blend with mineral diesel. In all variables, except O₂, there was a reduction in emissions decreased when the load applied in engine. The fuel reduced emissions and maintained performance, compared with commercial diesel fuel was Diesel S10 with 20% biodiesel.

Keywords: Biodiesel; Tractor; Dynamometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fontes de energia utilizadas pela agropecuária no Brasil.	24
Figura 2.2 – Variação das emissões pelas misturas de diesel e biodiesel.	32
Figura 3.1 – Trator utilizado no ensaio do tempo de aquecimento e do número de repetições.	35
Figura 3.2 – Dinamômetro de freio magnético.	36
Figura 3.3 – Combustível (direita), fluxômetro (abaixo) e <i>datallogger</i> (acima).	36
Figura 3.4 – Software de aquisição de dados do dinamômetro.	37
Figura 3.5 – Fluxômetro Eggers FM3 (à frente) instalado no trator.	42
Figura 3.6 – Esquema de funcionamento do Fluxômetro Eggers FM3	43
Figura 3.7 – Software para controle e aquisição dos dados do <i>Opacilyt</i> e <i>Infralyt</i>	44
Figura 3.8 – <i>Opacilyt</i> (à frente), <i>Infralyt</i> ELD (segundo plano).	45
Figura 3.9 – Determinação da densidade dos combustíveis.	46
Figura 3.10 – Percentagens de torque em relação ao torque máximo em determinada rotação para o ensaio de emissões.	47
Figura 4.1 – Variação dos parâmetros atmosféricos durante o experimento de repetições e tempo de aquecimento.	49
Figura 4.2 – Variação dos parâmetros do motor considerando o tempo de aquecimento. ..	51
Figura 4.3 – Variação dos parâmetros do motor considerando as 18 repetições.	53
Figura 4.4 – Comportamento do coeficiente de variação pelo número de repetições.	54
Figura 4.5 – Condições atmosféricas durante o ensaio de desempenho.	56
Figura 4.6 – Resíduos dos parâmetros de desempenho em todas as rotações.	57
Figura 4.7 – Comportamento das curvas de desempenho e consumo por regressão linear. .	58
Figura 4.8 – Torque do motor utilizando diferentes combustíveis.	59
Figura 4.9 – Comportamento do torque máximo em função da concentração de biodiesel. .	61
Figura 4.10 – Potência do motor utilizando diferentes combustíveis.	62
Figura 4.11 – Comportamento da potência máxima em função da concentração de biodiesel. .	64
Figura 4.12 – Consumo horário do motor utilizando diferentes combustíveis.	65
Figura 4.13 – Consumo específico do motor utilizando diferentes combustíveis.	66
Figura 4.14 – Comportamento do consumo específico mínimo em função da concentração de biodiesel.	68
Figura 4.15 – Monitor do controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro. .	69
Figura 4.16 – Variação dos parâmetros atmosféricos durante o experimento de emissões. ..	71
Figura 4.17 – Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de O ₂ em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).	72
Figura 4.18 – Variação do teor (%) de oxigênio nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.	73
Figura 4.19 – Comportamento das emissões de oxigênio em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.	74
Figura 4.20 – Comportamento das emissões de oxigênio em função do modo de operação. .	74
Figura 4.21 – Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de CO ₂ em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).	76
Figura 4.22 – Variação do teor (%) de dióxido de carbono nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.	77
Figura 4.23 – Comportamento das emissões de dióxido de carbono em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.	78

Figura 4.24 – Comportamento das emissões de dióxido de carbono em função do modo de operação.	78
Figura 4.25 – Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de opacidade em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).	80
Figura 4.26 – Variação da opacidade (%) dos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.	81
Figura 4.27 – Comportamento da opacidade dos gases de escape em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.	82
Figura 4.28 – Comportamento da opacidade dos gases de escape em função do modo de operação.	83
Figura 4.29 – Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de NO em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).	84
Figura 4.30 – Variação do teor (ppm) de monóxido de nitrogênio nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.	85
Figura 4.31 – Comportamento das emissões de monóxido de nitrogênio em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.	87
Figura 4.32 – Comportamento da emissão de monóxido de nitrogênio nos gases de escape em função do modo de operação.	88
Figura 4.33 – Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de NO ₂ em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).	89
Figura 4.34 – Variação do teor (ppm) de dióxido de nitrogênio nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.	90
Figura 4.35 – Comportamento das emissões de dióxido de nitrogênio em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.	91
Figura 4.36 – Comportamento da emissão de dióxido de nitrogênio nos gases de escape em função do modo de operação.	91
Figura 4.37 – Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de CO em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).	92
Figura 4.38 – Variação do teor (ppm) de monóxido de carbono nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.	93
Figura 4.39 – Comportamento das emissões de monóxido de carbono em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.	94
Figura 4.40 – Comportamento da emissão de monóxido de carbono nos gases de escape em função do modo de operação.	95
Figura 4.41 – Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de HC em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).	96
Figura 4.42 – Variação do teor (ppm) de hidrocarbonetos nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.	97
Figura 4.43 – Comportamento das emissões de hidrocarbonetos em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.	98
Figura 4.44 – Comportamento da emissão de hidrocarbonetos nos gases de escape em função do modo de operação.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Participação relativa das fontes de energia no mundo e no Brasil.	23
Tabela 2.2 – Série histórica das fontes de biodiesel no Brasil, em 10^3 m^3	30
Tabela 3.1 – Combustíveis utilizados nos ensaios de desempenho e emissões.	40
Tabela 3.2 – Modos de teste e fatores de ponderação para emissões de motor diesel agrícola.	48
Tabela 4.1 – Correlação linear entre os parâmetros analisados.	50
Tabela 4.2 – Resultado do teste f da ANOVA dos tempos de aquecimento.	52
Tabela 4.3 – Densidade dos combustíveis utilizados nos experimentos de desempenho e emissões.	55
Tabela 4.4 – Diferença das médias entre os combustíveis para as variáveis de desempenho do motor.	60
Tabela 4.5 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o combustível C1.	70
Tabela 4.6 – Síntese das emissões dos gases de escape com o uso de diferentes combustíveis e modos de operação.	99
Tabela B.1 – Equações das curvas de torque obtidas com diferentes combustíveis.	111
Tabela B.2 – Equações das curvas de potência obtidas com diferentes combustíveis.	111
Tabela B.3 – Equações das curvas de consumo horário obtidas com diferentes combustíveis.	112
Tabela B.4 – Equações das curvas de consumo específico obtidas com diferentes combustíveis.	112
Tabela C.1 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C1.	113
Tabela C.2 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C2.	113
Tabela C.3 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C3.	114
Tabela C.4 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C4.	114
Tabela C.5 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C5.	114
Tabela C.6 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C6.	115
Tabela C.7 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C7.	115
Tabela C.8 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C8.	115
Tabela C.9 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C9.	116
Tabela C.10 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C10.	116
Tabela C.11 – Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C11.	116

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – Resultado padrão de um ensaio dinanométrico.	110
APÊNDICE B – Equações de regressão para as variáveis de desempenho do motor. .	111
APÊNDICE C – Tabelas para controle manual do dinamômetro para o experi- mento de emissões.	113
APÊNDICE D – Resultados da Análise da Variância para o experimento das emissões.	117

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Certificado de qualidade do biodiesel utilizado no ensaio de repetição ..	122
ANEXO B – Certificado de qualidade do biodiesel utilizado nos ensaios de desempenho e emissões	123
ANEXO C – Especificações técnicas do motor utilizado no experimento	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Anfavea	Associação Nacional de Veículos Automotores
ANOVA	Análise da variância
BEN	Balanco Energético Nacional
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
DBA	Delineamento Blocos ao Acaso
DER	Departamento de Engenharia Rural
DMS	Diferença Mínima Significativa
DP	Desvio padrão
EPA	Environmental Protection Agency
g kWh ⁻¹	gramas por quilowatt-hora
HC	Hidrocarbonetos
IC	Ignição por compressão
MP	Material particulado
NEMA	Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas
nMm	Rotação de torque máximo
NO _x	Óxidos de nitrogênio (NO + NO ₂)
NO	Monóxido de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
nPm	Rotação de potência máxima
O ₂	Gás oxigênio
<i>P</i>	Potência
ppm	Parte por milhão
S	Enxofre
Taq	Tempo de aquecimento
TDA	Tração dianteira auxiliar
TDP	Tomada de potência
UFES	Universidade Federal de Santa Maria

LISTA DE SÍMBOLOS

\nearrow	Aumento
\sim	Aproximadamente
Ce	Consumo específico de combustível
Ch	Consumo horário de combustível
\rightsquigarrow	Emite
\Leftrightarrow	Equivale
kPa	Kilopascal
kW	Kilowatt
$>$	Maior
μ	Média
\doteq	Não diferiram estatisticamente entre si
%	Percentual
\searrow	Redução
ΔM	Reserva de torque
n	Rotação
M	Torque

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Hipóteses	20
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Como o mundo e o Brasil usa a energia	22
2.1.1 Como a agricultura brasileira utiliza a energia	24
2.2 Os motores ciclo Diesel	25
2.3 Os biocombustíveis	26
2.3.1 As fontes de biodiesel	28
2.4 Emissões de gases de escape de motores ciclo Diesel	31
2.5 Considerações sobre o planejamento experimental	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Local dos experimentos	34
3.2 Experimentos realizados	34
3.3 Determinação do tempo de aquecimento e do número de repetições	35
3.3.1 Material utilizado	35
3.3.2 Metodologia utilizada.....	37
3.3.2.1 Análise estatística	38
3.4 Parâmetros de desempenho e determinação das emissões	39
3.4.1 Delineamento experimental	39
3.4.2 Equipamentos utilizados	40
3.4.2.1 Medição do consumo de combustível.....	41
3.4.2.2 Medição da opacidade dos gases	42
3.4.2.3 Medição dos gases de escape	44
3.4.3 Metodologia utilizada.....	45
3.4.3.1 Parâmetros de desempenho	45
3.4.3.2 Análise de emissões	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Determinação do tempo de aquecimento e do número de repetições	49
4.1.1 Tempo de aquecimento do motor	50
4.1.2 Número de repetições.....	52
4.1.3 Resultados adicionais deste experimento.....	54
4.2 Desempenho do motor com diferentes combustíveis	55
4.2.1 Análise das curvas de desempenho	56
4.2.1.1 Torque.....	59
4.2.1.2 Potência	62
4.2.1.3 Consumo horário.....	64
4.2.1.4 Consumo específico	65
4.3 Emissões do motor com diferentes combustíveis	68
4.3.1 Oxigênio (O ₂)	70
4.3.1.1 Emissão de O ₂ considerando a potência gerada	74
4.3.2 Dióxido de carbono (CO ₂)	75
4.3.3 Opacidade (K).....	79

4.3.4 Monóxido de nitrogênio (NO)	83
4.3.5 Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	88
4.3.6 Monóxido de carbono (CO)	91
4.3.7 Hidrocarbonetos (HC)	95
4.3.8 Síntese das emissões do motor	98
5 CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS	102
APÊNDICES	109
ANEXOS	121

1 INTRODUÇÃO

Devido ao grande desenvolvimento industrial, econômico e agrícola ocorrido no mundo após a segunda guerra mundial e o estabelecimento de padrões de consumo cada vez mais intensos, aliado ao grande crescimento populacional deste período, a demanda energética elevou-se a tal ponto que coloca em risco o modelo de desenvolvimento atual. Quando se fala em desenvolvimento de uma sociedade, se fala em utilização de energia, pois ambos possuem alta correlação. Considera-se que quanto maior o grau de desenvolvimento de uma sociedade, maior será a utilização de energia.

Desta forma, se a sociedade deseja continuar seu desenvolvimento, nas mesmas taxas atuais, deve buscar a diversificação das fontes de energia e o aumento da eficácia de sua utilização. Aliado a isto, o uso de energias limpas, de fonte renovável, que auxiliam na conservação do ambiente deve ser preconizado nas fontes de energias e, mais restritamente, nos combustíveis utilizados atualmente e no futuro.

Entretanto, para a utilização de combustíveis renováveis, deve ser considerado que há uma competição com a produção de alimentos. Estes alimentos provém basicamente do meio agrícola, e são necessários para alimentar uma população de mais de sete bilhões de pessoas no mundo, cada vez mais urbanizada. Para isto, a mecanização agrícola é fundamental para que esta produção de alimentos gere excedentes das necessidades do produtor rural. Com estes excedentes, o produtor pode comercializar para a população urbana e gerar renda para a sua atividade.

Contudo, a mecanização agrícola utiliza, basicamente, motores de combustão interna ciclo Diesel. Estes motores necessitam de energia armazenada na forma líquida, pois a maioria das operações agrícolas são realizadas em movimento, por tratores, colhedoras, pulverizadores autopropelidos, entre outros. Atualmente, grande parte deste combustível é de origem mineral, que provém de fonte finita e não renovável. No Brasil, 86% de toda a energia líquida utilizada na agricultura é proveniente do Diesel mineral (IBGE, 2006).

Estes motores agrícolas ciclo Diesel, que são utilizados por tratores e colhedoras no Brasil, totalizam mais de um milhão de unidades (IBGE, 2006) e a grande maioria destes não possuem nenhum tipo de mecanismo de redução de emissão de poluentes pelos gases de escape. Estas tecnologias de redução, que são adotadas pelas regiões mais desenvolvidas, como a Europa, é um caminho a ser seguido pelo Brasil.

Há em andamento um incentivo mundial para a substituição parcial do combustível Diesel de origem mineral por outros de origem vegetal e animal, comumente chamados de biodiesel. No Brasil, atualmente, 5% de biodiesel é misturado ao Diesel mineral e as políticas governamentais apontam para um percentual maior no futuro. Um dos principais apelos para o uso de biodiesel é a não necessidade de realizar modificações no motor ciclo Diesel para sua utilização. Mesmo assim, sabe-se que, em determinadas proporções destes dois combustíveis (Diesel mineral e biodiesel), há alteração significativa de torque do motor e nos níveis de emissão.

Para Machado (2008) as atuais especificações para o biodiesel brasileiro encerram, em si, diferenças importantes em relação ao diesel convencional. Elas são fundamentais para o processo de formação da mistura combustível, para a combustão, o controle de emissões residuais e a eficiência dos motores diesel.

Alguns trabalhos mostram que o uso de biodiesel puro nos motores veiculares ciclo Diesel diminui o torque e conseqüentemente a potência gerada (BUYUKKAYA, 2010; FIORESE et al., 2011; OZSEZEN et al., 2009; MAZIERO et al., 2006; NIETIEDT et al., 2011b), aumenta o consumo horário e específico mínimo (GODESA; JEJ; POJE, 2010; NIETIEDT et al., 2011b; OZENER et al., 2012; REIS et al., 2013; SORANSO et al., 2008), diminui a geração de alguns gases que podem ser poluentes ao ambiente (GOKALP; BUYUKKAYA; SOYHAN, 2011; MOSER et al., 2009; ZHU et al., 2011) e aumento de outros (MCCARTHY; RASUL; MOAZZEM, 2011; MAZIERO et al., 2006; OZSEZEN et al., 2009; PRABHAKAR; ANNAMALAI, 2011). Todavia, esta informação não está apresentada, de maneira clara, para motores agrícolas ciclo Diesel, e, baseado nesta lacuna, é que são apresentadas algumas hipóteses para serem confirmadas ou não neste trabalho.

1.1 Hipóteses

Com o uso de biodiesel, ocorre uma diminuição do torque e conseqüentemente, da potência dos motores, para um mesmo consumo horário de combustível, aumentando, com isto, o consumo específico.

Além disto, aumentando a proporção de biodiesel na mistura com Diesel mineral, ocorre diminuição da emissão de material particulado, de hidrocarbonetos e de monóxido de carbono,

mas aumenta a emissão de óxidos de nitrogênio.

O número de repetições necessário para diminuir o erro experimental vai depender da variabilidade dos dados de cada variável resposta. Para os parâmetros de desempenho o número deve ficar próximo de 3 repetições.

Para que estas hipóteses sejam testadas, os objetivos devem ser traçados. Estes objetivos estão apresentados a seguir.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de motor agrícola ciclo Diesel e a emissão dos principais gases de escape com o uso de diferentes combustíveis.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar qual é o número de repetições ideal para a verificação dos parâmetros de ensaio de motores Diesel agrícola.
- Quantificar o tempo de aquecimento necessário para que os parâmetros de desempenho do motor se estabilizem.
- Quantificar a alteração do torque, da potência e do consumo de combustível de motor agrícola ciclo Diesel variando o tipo de combustível.
- Quantificar as emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarbonetos, e óxidos de nitrogênio, entre outros, variando o tipo de combustível e o modo de operação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia é um requerimento básico para o desenvolvimento econômico (DWIVEDI; JAIN; SHARMA, 2011) e para o desenvolvimento social, bem-estar humano e melhorar a qualidade de vida (SAHOO et al., 2009). Com tendência cada vez maior de modernização e industrialização, a demanda mundial de energia também cresce a um ritmo mais rápido. Atualmente os problemas relativos ao desenvolvimento econômico mundial estão relacionados com a capacidade energética de cada país (SALLA et al., 2010). Com intuito de atender à crescente demanda de energia global, muitos estudos são realizados para desenvolver e utilizar uma variedade de combustíveis renováveis (CHAUHAN et al., 2013). Para Leite e Leal (2007) a busca por soluções alternativas para o consumo do petróleo, desde a década de 1970 até hoje, e a preocupação com a poluição ambiental e a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera reforçam cada vez mais a importância da produção comercial dos biocombustíveis.

A problemática dos biocombustíveis ocupa o centro das atenções nacionais e internacionais em razão do aumento excessivo do preço do petróleo e da discussão mundial sobre a diminuição das emissões de CO₂ e consequente diminuição do efeito estufa pelo uso de energias renováveis (KOHLHEPP, 2010). Ao longo dos últimos vinte anos, tem havido um aumento substancial em pesquisa e desenvolvimento na área de biocombustíveis. Muitos pesquisadores de todo o mundo têm lidado com os aspectos ambientais, econômicos, políticos e técnicos relativos aos biocombustíveis (BERNARDES, 2011).

As emissões provenientes da combustão dos motores provocam um impacto considerável no ambiente e na saúde humana (LINDGREN et al., 2011). Para Teixeira *et al* 2008, nas áreas metropolitanas o problema da poluição do ar tem-se constituído numa das mais graves ameaças à qualidade de vida de seus habitantes. Estes autores salientam que quantidade de poluentes emitidos pelos motores depende de vários fatores, tais como o tipo de motor, sua regulação e manutenção.

2.1 Como o mundo e o Brasil usa a energia

A distribuição das fontes de energia no mundo e no Brasil está apresentado na Tabela 2.1. Os dados foram retirados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2012), no ano de 2012.

Vale salientar que o petróleo, o gás natural e seus derivados respondem por 55% do consumo global de energia (DIAS, 2011).

Tabela 2.1: Participação relativa das fontes de energia no mundo e no Brasil.

Fonte	Mundo	Brasil
Petróleo	34%	37%
Gás natural	20%	9%
Carvão	26%	6%
Urânio	7%	1%
Biomassa	11%	15%
Renováveis	2%	31%

Fonte: (BEN, 2012).

Observando a Tabela 2.1, o petróleo contribui com mais de um terço de toda a energia consumida no mundo, enquanto que as fontes renováveis de energia correspondem a apenas 2%. Todavia, estudos recentes indicam que as fontes de energia renováveis crescem a uma taxa média de 1,7% ao ano, desde 1990 (ARMAN; YUKSEL, 2013).

Todas as regiões europeias têm requisitos obrigatórios para aumentar a produção ou o consumo de biocombustíveis nos próximos 5 a 7 anos, bem como outras políticas para promover a produção (BECKMAN; KEENEY; TYNER, 2011), visando principalmente a busca por alternativas ao diesel de petróleo.

Percebe-se, comparando os dados da Tabela 2.1, que no Brasil a utilização de energias renováveis é muito maior (31%) que no resto do mundo (2%), principalmente devido a energia proveniente de hidroelétricas. O petróleo é a maior fonte de energia tanto no mundo (34%) quanto no Brasil (37%). O que vale destacar é uma participação significativa da biomassa nas fontes de energia brasileira (15%), principalmente devido a cana-de-açúcar para a produção de etanol.

O petróleo acaba tendo uma importância significativa nas fontes de energia, pois é uma das poucas fontes que podem ser utilizadas em motores móveis (transporte, agricultura, ...). Isto deve ser levado em consideração, pois é necessário que os combustíveis que venham a substituir os derivados de petróleo, sejam, necessariamente semelhantes, para que os motores que utilizem estes combustíveis não sofram muitas modificações.

Além disto, a rede de distribuição de combustíveis derivados de petróleo já está bem consolidada, e opera de maneira eficaz, e por isto mesmo, a utilização de combustíveis que utilizem esta mesma rede de distribuição (como é o caso do etanol e, mais recentemente do

biodiesel) deve ser almejada.

2.1.1 Como a agricultura brasileira utiliza a energia

A utilização de energia pela agropecuária no Brasil está apresentado na Figura 2.1. A agropecuária passou, ao longo dos anos, da utilização predominante de lenha para o petróleo. Esta migração está altamente correlacionada com o início da mecanização no Brasil.

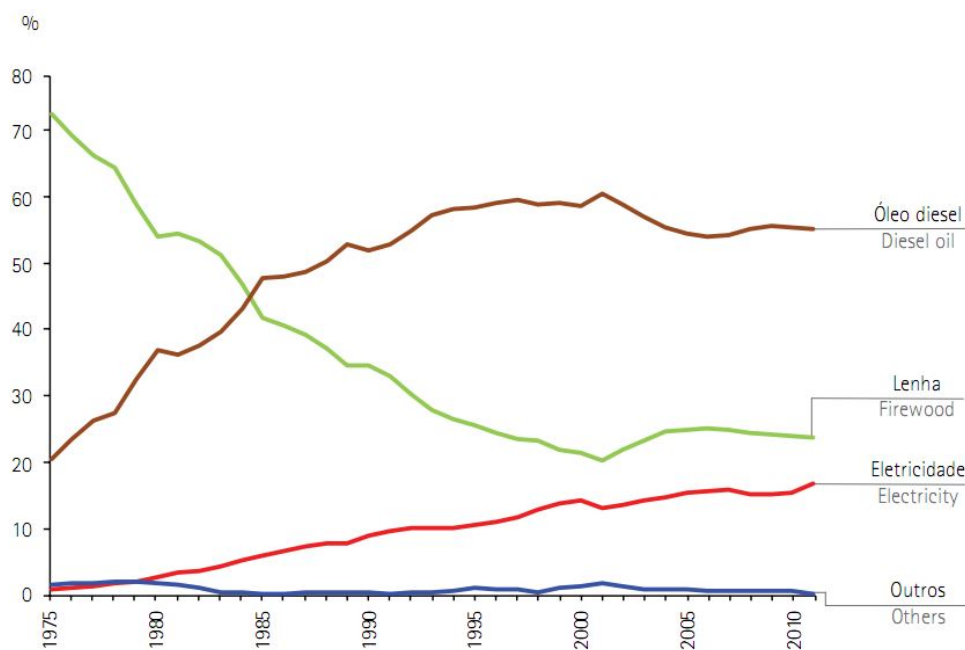


Figura 2.1: Fontes de energia utilizadas pela agropecuária no Brasil.

Fonte: (BEN, 2012).

Como podemos observar na Figura 2.1, o óleo diesel é a principal fonte de energia que o meio rural brasileiro utiliza. Participa com aproximadamente 60% do total. Na segunda colocação a lenha, com pouco mais de 20%. É válido observar que nos meados dos anos 80 houve uma inversão da principal fonte, onde o diesel assumiu a primeira colocação. Pode-se inferir que isto ocorre devido a adoção da mecanização agrícola como forma de potência na agricultura.

No Brasil existem pouco mais de 5,2 milhões de estabelecimentos agrícolas, dos quais 10,2% possuem trator (530 mil estabelecimentos) (IBGE, 2006). Nestes estabelecimentos existem 820 mil tratores. Vale destacar que a maioria dos tratores em uso no Brasil (70% do total) tem menos de 100 cv de potência e estão distribuídos em 82% dos estabelecimentos. Podemos

dizer que apenas um em cada três tratores em uso no Brasil tem mais de 100 cv (~ 74 kW) de potência e estão presentes em apenas um a cada cinco estabelecimentos agrícolas (IBGE, 2006). Devido a isto, os motores de ignição por compressão ciclo Diesel desempenham um papel importante na agricultura, pois é o componente que constitui a base para a decisão da compra do trator, principalmente pela análise do fator potência (MÁRQUEZ, 2012).

2.2 Os motores ciclo Diesel

O motor ciclo Diesel ou motor de ignição por compressão (IC) é um motor de combustão interna, endotérmico, inventado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel, em que a combustão do combustível se faz pelo aumento da temperatura provocado pela compressão do ar admitido na câmara de combustão. A ignição ocorre pela injeção do combustível na câmara de combustão, ocorrendo a combustão da mistura. Estes motores são, basicamente, transformadores da energia presente no combustível para energia mecânica. Os motores a diesel são amplamente utilizados por causa de sua boa eficiência e confiabilidade (YAO et al., 2008).

Nos motores que operam pelo ciclo diesel o início da combustão se dá por auto-ignição do combustível. O ar admitido para o interior do cilindro é comprimido pelo pistão, de forma a elevar a temperatura. Em seguida, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão, imediatamente antes do instante em que o processo de combustão inicie. O tempo decorrido entre o início da injeção e o início da combustão é chamado de atraso de ignição. Este atraso é consequência do tempo requerido para que ocorra a desintegração do jato, o aquecimento e a vaporização do combustível; a sua mistura com o ar seguidos das reações químicas precursoras da combustão; e finalmente da auto-ignição da mistura.

Para Machado (2008) algumas características que um combustível diesel apresenta e que pode alterar a forma como ocorre a eficiência desta transformação de energia são: número de cetano, viscosidade, ponto de fulgor, ponto de névoa, calor de combustão, faixa de destilação, densidade, entre outros.

Todos estes fatores contribuem para modificar a potência, o torque, as emissões e o consumo de motores semelhantes, pela alteração do tipo de combustível, devido as suas características acima descritas. Estes parâmetros tem sua importância para diferentes fins: a potência é utilizada como referência de comparação entre os tratores e o consumo específico serve para

determinar a eficiência da transformação do combustível em energia mecânica (MÁRQUEZ, 2012). Desde o início da exploração de petróleo, os combustíveis fósseis constituem-se na principal fonte de energia para os motores diesel. Entretanto, Rudolf Diesel utilizou óleo vegetal em motores de ignição por compressão em suas demonstrações (POHIT; MISRA, 2013).

Portanto, a utilização de diferentes tipos de combustível alteram as características de desempenho do motor, fato este que deve ser considerado quando da determinação destes parâmetros. Em trabalho de Ozsezen *et al* 2008 comparando biodiesel com o diesel mineral, os torques e potências produzidos pelas misturas diminuíram com o aumento da quantidade de biodiesel na mistura do combustível. A principal razão para o torque e potência diminuírem com uma quantidade crescente de biodiesel na mistura de combustível é o conteúdo energético inferior do biodiesel.

Exemplo disto é que a potência de catálogo dos tratores agrícolas são determinadas com a utilização de um determinado tipo de combustível, geralmente o diesel mineral. Quando se utiliza misturas com biodiesel ou biodiesel puro (B100), a tendência é que esta potência seja menor. Em trabalho realizado por Fiorese *et al* (2012) com motor agrícola, foi encontrado redução de 2% na potência máxima, 4,3% no torque e mais de 9% de aumento no consumo específico de combustível quando foi utilizado B100 em relação ao B5.

Existe atualmente no Brasil dois tipos diferentes de diesel mineral vendidos no varejo, um com baixo e outro com alto teor de enxofre (S), ambos aditivados com 5% de biodiesel. O diesel combustível com baixo teor de enxofre é denominado de diesel S10 (com 10 ppm de S) ou diesel metropolitano e o diesel S500 (com 500 ppm de S) ou diesel interior.

2.3 Os biocombustíveis

Para Sanjid *et al* (2014), o crescente aumento do consumo de energia, a distribuição geográfica desigual das riquezas naturais e a busca de combustível de baixo carbono para um ambiente mais limpo estão entre os motivos para deflagrar a produção e utilização de biodiesel em muitos países ao redor do mundo. As razões para o aumento no uso dos biocombustíveis são muitas e variam de um país para outro e também ao longo do tempo, sendo as principais as seguintes: diminuir a dependência externa de petróleo; minimizar os efeitos das emissões veiculares na poluição local, principalmente nas grandes cidades, e; controlar a concentração

de gases de efeito estufa na atmosfera (LEITE; LEAL, 2007). A oferta de diesel mineral, com seus altos custos de refino e sua possibilidade de esgotamento, fazem com que a busca por combustíveis renováveis torna-se importante, tanto por fatores comerciais como ambientais (GOLIMOWSKI; PASYNIUK; BERGER, 2013). Entretanto, mais importante que o esgotamento das reservas mundiais de petróleo é o reconhecimento do potencial dos biocombustíveis como elementos menos agressivos ao ambiente do que os derivados de petróleo (MACHADO, 2008).

Os biocombustíveis oferecem o potencial para o aumento da renda agrícola e auxilia no desenvolvimento econômico, porque cria demanda adicional dos produtos colhidos que podem servir de fonte de combustível e, porque, os países em desenvolvimento podem ter uma vantagem comparativa na produção de culturas energéticas (HOCHMAN; RAJAGOPAL; ZILBERMAN, 2011).

A aplicação de óleos vegetais *in natura* nos motores, pode ser utilizada, mas é limitada por algumas de suas propriedades físicas e químicas, como alta viscosidade, baixa volatilidade e o número de cetano reduzido, que causam problemas funcionais e dificultam a combustão, além de produzir depósitos indesejáveis no motor (MACHADO, 2008). Para diminuir estes problemas e utilizar os óleos como combustível, se utiliza a reação de transesterificação, ou seja, uma reação relativamente simples e que permite a obtenção de ésteres combustíveis com propriedades semelhantes às do diesel de petróleo. Na transesterificação, os óleos vegetais e gorduras animais reagem com um álcool de cadeia curta (geralmente metanol ou etanol) na presença de um catalisador, produzindo assim, ésteres alquílicos e separando a glicerina. Os ésteres combustíveis resultantes da transesterificação são reconhecidos mundialmente pela designação de biodiesel (MACHADO, 2008). Para Lapuerta *et al* (2008b), o tipo de álcool usado no processo de produção de biodiesel pode gerar um efeito significativo sobre a totalidade das emissões de hidrocarbonetos e na composição de partículas emitidas pelo motor.

Basicamente, há dois tipos de combustíveis renováveis líquidos que podem substituir a gasolina e o óleo diesel que são o bioetanol e o biodiesel. O bioetanol é um bom combustível alternativo e é produzido quase inteiramente a partir de culturas alimentares e preferencialmente são utilizados em motores ciclo Otto ¹. Já o biodiesel tornou-se mais atraente recentemente por causa de seus benefícios ambientais (BERNARDES, 2011), e são utilizados basicamente nos motores ciclo Diesel.

A produção mundial de biocombustíveis representa, atualmente, cerca de 3% do total de

¹ Motores que realizam a ignição por faísca elétrica, popularmente conhecidos como motores a gasolina.

combustíveis utilizado para transporte, com a maior parte da produção concentrada nos Estados Unidos, Brasil e União Europeia. As fontes primárias são o etanol de milho como matéria-prima nos Estados Unidos, o etanol de cana-de-açúcar como matéria-prima no Brasil e biodiesel de matéria-prima oleaginosa na União Europeia (BECKMAN; KEENEY; TYNER, 2011).

Já a produção de biomassa é uma das poucas fontes de energia renováveis que podem ser utilizados como tecnologias basal para produção de energia, e que contribui também para a redução da dependência externa de energia e redução da emissão de gases de efeito estufa (CARNEIRO; FERREIRA, 2012). No entanto, a disponibilidade, a heterogeneidade e custo do recurso são barreiras importantes para o desenvolvimento eficaz e disseminação dessas tecnologias (CARNEIRO; FERREIRA, 2012).

O biodiesel já recebeu e continua recebendo uma atenção considerável devido ao seu uso potencial como combustível para substituir, em parte, o diesel mineral (SUN; CATON; JACOBS, 2010). Para Gokalp *et al* (2011), interessante é que o biodiesel é um combustível alternativo mais limpo que o diesel de petróleo e pode ser utilizado diretamente como combustível para um motor diesel sem ter de modificar o sistema do motor.

2.3.1 As fontes de biodiesel

O Brasil, por ser um país com grande extensão territorial e devido à sua natureza agrícola, apresenta grande potencial de uso e de recursos naturais que podem ser aplicados para gerar energia e substituir as fontes energéticas convencionais (SORANSO *et al.*, 2008). O uso de matérias-primas tradicionais para a produção de biocombustíveis tem provocado grandes mudanças nos sistemas agrícolas e alimentares (BECKMAN; KEENEY; TYNER, 2011). Atualmente, a possibilidade que mais se utiliza no Brasil, para a produção de biodiesel é a de culturas já estabelecidas comercialmente, como a soja, que apresenta condições edafoclimáticas que possibilitam sua exploração na maioria das regiões do país quando comparada a outras oleaginosas (REIS *et al.*, 2013).

Houve, em certo momento, no Brasil, o incentivo para a produção de biodiesel em plantas de pequeno porte, com intuito de gerar renda para os pequenos agricultores, ou, pelo menos, que estes produzissem seu próprio combustível. Entretanto, a produção de biodiesel em planta de pequeno porte, a partir das matérias-primas estudadas, não indicou economia monetária,

quando comparados com o óleo diesel, revelando valores que inviabilizam a produção em pequena escala (FIORESE et al., 2011). Outro fator é que a viabilidade econômica de pequena escala para a produção de biocombustíveis na exploração agrícola é fortemente dependente do preço do petróleo e do combustível diesel mineral (FORE et al., 2011).

Além disso, grandes áreas de terra seriam necessárias para produzir significativas quantidades de combustível. Por exemplo, para substituir 10% da gasolina e do diesel, é estimada a necessidade de 43% e 38% da atual área cultivada nos Estados Unidos e na Europa, respectivamente, para a produção de biocombustíveis (RIGHELATO; SPRACKLEN, 2007). No caso do Brasil, devido à grande diversidade climática e edáfica, o Brasil apresenta boa capacidade produtiva de diferentes espécies vegetais, o que pode se traduzir em expressivo aumento de produção do biodiesel, pela diversificação das fontes (NIETIEDT et al., 2011a). Entretanto, isto não está ocorrendo (Tabela 2.2), pois, com excessão da soja, as outras culturas agrícolas não tem participação significativa na quantidade de biodiesel produzida.

Uma maneira de reduzir o custo do biodiesel é usar menos matérias-primas caras. Resíduos de óleos e graxas de restaurantes e gorduras animais são possíveis fontes de matérias-primas para o biodiesel de baixo custo (CANAKCI; GERPEN, 2003). Outra forma são as operações de colheita florestal, que muitas vezes produzem grandes quantidades de resíduos de colheita, como folhas, pequenos galhos e árvores e resíduos lenhosos. Se removido no momento da colheita, a biomassa residual tem potencial para ser uma fonte de energia local e para a produção comercializável de matéria-prima para biocombustíveis (RIFFELL et al., 2011).

No Brasil, a produção de biodiesel que começou em 2005 teve diferentes fontes, tanto de origem vegetal como animal, sendo que as principais aparecem descritas na Tabela 2.2.

Observa-se na Tabela 2.2, que a soja e o óleo de palma foram as únicas fontes que não tiveram descontinuidade no fornecimento, ao longo da série. Além do mais, a soja é a principal fonte desde 2006. Casos como o óleo de ricino, que teve um grande incentivo governamental, pois poderia ser um alento para os agricultores da região Nordeste do Brasil, teve uma insignificante participação por apenas um triênio (2007 a 2009), sendo que depois deste período não houve mais produção de biodiesel a partir desta fonte.

Além disto, realizando uma análise mais profunda da Tabela 2.2, nos mostra que, apesar de haver política para a diversificação das fontes de biodiesel, acaba que apenas duas fontes (soja e gordura animal) tem participação significativa. A soja participa com 81,2% do total das fontes, enquanto que a gordura animal vem na segunda colocação com pouco mais de 13%.

Tabela 2.2: Série histórica das fontes de biodiesel no Brasil, em 10³ m³.

Fonte	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Óleo de Soja	0,3	65,7	353	967	1 250	1 980	2 171
Óleo de Palma	0,5	2,4	3,8	2,7	5,2	3,2	1,7
Óleo de Algodão	-	-	1,9	24,1	70,6	57	98,2
Óleo de Amendoim	-	-	-	2,6	2,7	0,4	0,2
Óleo de Nabo Forrageiro	-	-	0,2	-	0,4	1,6	-
Óleo de Girassol	-	-	-	1,1	4,1	0,2	0,4
Óleo de Rícino	-	-	0,3	0,1	0,1	-	-
Óleo de Sésamo	-	-	-	-	-	0,1	-
Sebo bovino	-	0,8	34,4	153	253	297	349
Outros materiais graxos	-	-	12,2	24	22,9	37,2	29,2
Gordura de frango	-	-	-	0,2	0,9	2,4	0,7
Gordura de porco	-	-	-	1,1	1,2	2,8	9,0
Óleo de fritura usado	-	-	0	1,2	2,4	5,1	13,2
Total	0,8	68,9	405,8	1 177	1 657	2 387	2 673

Fonte: (BEN, 2012).

Somadas as duas principais fontes de todo o biodiesel produzido no Brasil totalizam 94,3%. Mas, este cenário já foi previsto por alguns autores, que afirmaram que 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; CAMARGO, 2007), além do que, a produção da matéria prima está consolidada no país.

No Brasil, atualmente, o biodiesel é o 43º produto industrial mais importante do país e pela primeira vez, o biodiesel aparece entre os 50 produtos industriais mais importantes da Pesquisa Industrial Anual do IBGE (BIODIESELBR, 2013). Em virtude disto, é importante estudar o comportamento do desempenho e emissões com este tipo de combustível, em motores agrícolas que basicamente, foram fabricados para ser utilizados com diesel mineral apenas.

Vale lembrar que, no Brasil, a frota de tratores agrícolas, em muitas regiões são antigas e com tecnologia de desenvolvimento de motores anteriores ao surgimento do biodiesel como combustível.

2.4 Emissões de gases de escape de motores ciclo Diesel

Os motores diesel produzem maiores emissões quando comparado com os de ciclo Otto, especialmente de NO_x e material particulado (BRIJESH; SREEDHARA, 2013). Estes afirmam que as tecnologias atuais para redução de NO_x através da recirculação dos gases de escape (EGR) e injeção de ureia (Arla 32), tem sido utilizada em motores modernos. Esta tecnologia ajuda na redução de NO_x , mas aumenta as emissões de particulados e o consumo de combustível.

Resultados encontrados por Shi et al. (2005) indicam que a presença de compostos oxigenados no diesel e suas misturas, influenciam significativamente as emissões do motor pela combustão. Isto é um dos benefícios do uso de biodiesel, que por ter maior teor de oxigênio em sua composição, pode reduzir as emissões de compostos não desejados. Porém, em trabalho desenvolvido por Ballesteros et al. (2014), trabalhando com biodiesel de gordura de frango, em mistura de 50% com diesel de baixo teor de enxofre, encontraram aumento das emissões de carbonila com a fração de biodiesel no combustível.

Em trabalho desenvolvido por Hoekman e Robbins (2012) fazem uma revisão de 207 trabalhos que foram avaliados as emissões de Óxidos de Nitrogênio (NO_x), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC). O comportamento das emissões em função da concentração de biodiesel na mistura pode ser observado na Figura 2.2. A avaliação foi conduzida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) há quase uma década, e, portanto, incluiu dados de alguns tipos de motores agora considerados obsoletos. Se considerarmos que os tratores agrícolas possuem uma vida útil elevada aqui no Brasil, e neste caso, tecnologias relativamente antigas em seus motores, podemos considerar que estes dados podem ser aplicados para estas máquinas.

Em uma avaliação atualizada, limitada a motores de ano modelo 1987 ou mais novos, mostrou que o biodiesel proporcionou reduções significativas de HC, CO, MP enquanto que as emissões de NO_x aumentaram (HOEKMAN; ROBBINS, 2012). Pela Figura 2.2, nota-se grande diminuição de HC (~ 70% com biodiesel puro) e forte redução de MP e CO (~ 50% com B100). Entretanto, com biodiesel puro, houve incremento de aproximadamente 10% de NO_x . Mesmo assim, Yanowitz e McCormick (2009) concluíram através de um grande número de ciclos de ensaio, que as emissões de NO_x resultantes de misturas B0 e B20 nos motores não são significativamente diferentes.

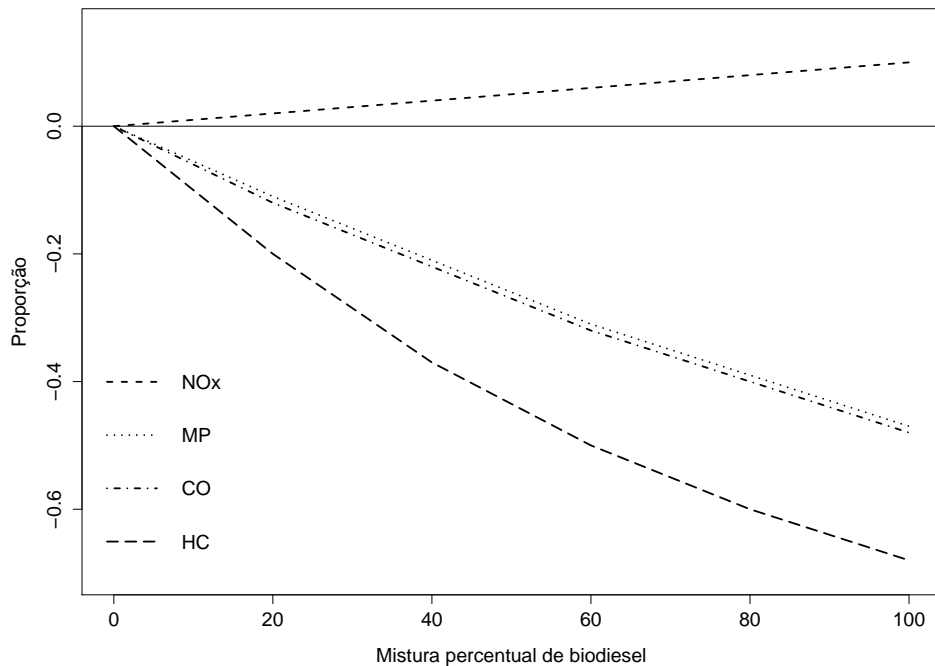


Figura 2.2: Variação das emissões pelas misturas de diesel e biodiesel.

Fonte: (HOEKMAN; ROBBINS, 2012).

Segundo Lapuerta et al. 2008a, a maioria dos trabalhos referentes as emissões de NO_x relatam um aumento destas emissões com o uso de biodiesel. A razão apontada mais frequentemente é que o processo de injeção é um pouco avançado com biodiesel.

Em trabalho realizado com motor ciclo Diesel em bancada dinamométrica, Maziero et al. (2006), usando éster etílico de óleo de girassol encontraram redução significativa dos níveis de emissão dos poluentes, CO, dióxido de carbono (CO_2), HC e MP com aumento não significativo do óxido de nitrogênio e perda significativa do desempenho mecânico do motor.

Segundo Ying et al. (2006) a mistura de biodiesel no diesel altera sua composição e as emissões também são alteradas e dependem das condições de operação.

Entretanto, é perceptível a diminuição de alguns gases de escape quando se adiciona biodiesel ao diesel mineral (Figura 2.2). Este ganho ambiental é um dos principais benefícios da utilização de biodiesel nos motores ciclo Diesel.

Estes resultados vem ao encontro das regulamentações sobre as emissões de poluentes impostas aos motores diesel veiculares, que são cada vez mais rígidas. Estas regulamentações forçaram o uso de tecnologias de pós-tratamento de gases de escape para reduzir os níveis de emissão de poluentes, principalmente de NO_x e MP (Gerald Liu et al., 2010). Desde 1995, a tolerância em termos de emissão de poluentes (CO, HC, MP, NO_x) para veículos pesados tem se tornado cada vez mais restritivas (MIRAVAL et al., 2013).

Para Xue et al. (2011) pode-se concluir que as misturas de biodiesel com pequeno con-

teúdo em volume poderia substituir o diesel, a fim de ajudar no controle de poluição do ar e aliviar a pressão sobre os recursos escassos, em grande medida, sem sacrificar significativamente a potência dos motores e a economia de combustíveis.

2.5 Considerações sobre o planejamento experimental

No planejamento experimental, a utilização do número adequado de repetições é uma técnica importante a ser considerada, e esse número tem sido um questionamento comum entre os pesquisadores (CARGNELUTTI; GUADAGNIN, 2011). A utilização de um número adequado de repetições nos experimentos é de suma importância para reduzir o erro experimental e conseqüentemente aumentar a precisão experimental. Nos experimentos criteriosos e intensivos, deve-se ter o maior número possível de repetições para ter um controle maior do erro experimental, permitindo identificar as diferenças entre os tratamentos (STORCK et al., 2000).

Para estimar a precisão dos experimentos, uma medida comumente utilizada é o coeficiente de variação (CV) que representa o desvio padrão expresso como percentagem da média. Entretanto, no caso de ensaio de motores, um número elevado de repetições acaba por aumentar o tempo e o custo do trabalho, e pode ser que a partir de um determinado número, não há mais variação significativa do CV. Se a variação do CV não ocorre com o incremento de repetições não há necessidade de realizar estas repetições, pois do ponto de vista estatístico, não há prejuízo da qualidade das informações tomadas. Entretanto, para cada fator analisado, há a necessidade de determinar o número de repetições.

De maneira geral, quanto maior for o desvio padrão dos valores observados, maior deve ser o número de repetições. Para variáveis quantitativas, o acréscimo do coeficiente de determinação (R^2) com o aumento do número de repetições não ocorre de forma linear. A partir de um determinado número de repetições, o aumento do R^2 passa a ser negligível, o que reflete em um ganho inexpressivo na predição do valor real (CARGNELUTTI; GUADAGNIN, 2011). Além disto, o dimensionamento do número de repetições é uma técnica de análise que minimiza custos e aproveita os dados experimentais existentes para redefinição ou manutenção de planejamentos experimentais (CARGNELUTTI; GUADAGNIN, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local dos experimentos

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Agrotecnologia (Agrotec), parte integrante do Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas (NEMA) do Departamento de Engenharia Rural (DER) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) no município de Santa Maria do Estado do Rio Grande do Sul. O município está localizado na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas de 29,75° de latitude sul, e 53,70° de longitude a oeste de Greenwich, a uma altitude aproximada de 95m em relação ao nível médio dos mares.

3.2 Experimentos realizados

Este trabalho teve três experimentos realizados em momentos diferentes e cada um destes serviu de base para o próximo experimento. Os experimentos realizados foram os seguintes:

1. Determinação do tempo de aquecimento e do número de repetições: experimento inicial que teve por objetivo determinar o número de repetições necessárias para realizar as avaliações dos parâmetros de desempenho do motor. Além disto, este experimento também teve por objetivo determinar o tempo de aquecimento do motor do trator para que seus parâmetros se estabilizem.
2. Determinação dos parâmetros de desempenho do motor: este teve por objetivo determinar as variáveis respostas referentes ao desempenho do motor, como torque, potência, consumo horário e consumo específico. O número de repetições e o tempo de aquecimento foi definido com base nos resultados do experimento anterior (1).
3. Análise das emissões dos gases de escape: experimento que teve por objetivo determinar alguns dos principais componentes dos gases de escape, como opacidade, CO₂, CO, HC, NO, NO₂ e O₂. As rotações e torques necessários para identificar os modos de operação (segundo a Norma ABNT NBR ISO 8178-4:2012) foram obtidos pelos resultados do

experimento anterior (2).

3.3 Determinação do tempo de aquecimento e do número de repetições

3.3.1 Material utilizado

Utilizou-se um trator agrícola (Figura 3.1) da marca Massey Ferguson, modelo MF 4291, 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e posto de operação do tipo cabinado, fabricado no ano de 2012, com aproximadamente 73 horas de uso, motor 1104A - 44T Perkins de ciclo Diesel de quatro cilindros, com cilindrada total de 4400 cm³, turboalimentado, com 77,20 kW de potência máxima (informação do fabricante) (ver Anexo C) e transmissão do tipo mecânica de 12 velocidade à frente e 4 à ré.



Figura 3.1: Trator utilizado no ensaio do tempo de aquecimento e do número de repetições.

O combustível utilizado pelo trator agrícola foi biodiesel puro (B100) (Figura 3.3 na página 36), obtido pela rota metilica composto de 80% de soja, 15% de gordura bovina e 5% de gordura suína, cedido pela empresa Olfar S/A – Alimento e Energia, com sede no município de Erechim/RS. As características do combustível estão apresentadas no Anexo A e foram obtidas junto ao laboratório da própria empresa.

O dinamômetro utilizado foi um dinamômetro móvel de freio magnético refrigerado a ar (Figura 3.2), marca EGGERSTM modelo PT301 com capacidade de frenagem de até 820

cv^2 (aproximadamente 600 kW), com acoplamento pela tomada de potência (TDP) do trator. Através de um software específico, realiza o controle da frenagem e o registro dos dados de torque e rotação do motor, além de calcular a potência em cada rotação.



Figura 3.2: Dinamômetro de freio magnético.

Neste dinamômetro as informações de rotação e torque são medidas através de sensores e são transferidas via cabo ou *bluetooth* a um computador tipo *notebook* no qual um software de recebimento, tratamento e visualização dos dados (Figura 3.4) realize a interface com o usuário. Além desses resultados, a variável potência é obtida indiretamente, através da Equação (3.1), a partir dos dados coletados pelos sensores.



Figura 3.3: Combustível (direita), fluxômetro (abaixo) e *datalogger* (acima).

A potência do motor (P) foi calculada a partir do torque do motor e da rotação e está

² $1 \text{ cv} = 0,9863 \text{ hp} = 735,5 \text{ W} = 0,736 \text{ kW}$

expressa na equação 3.1.

$$P = 0,000104719 \times M \times n \quad (3.1)$$

Onde P é dada em (kW), M é o torque do motor dado em Newton metro (Nm) e n é a rotação do motor dada em revoluções ou rotações por minuto (rpm).

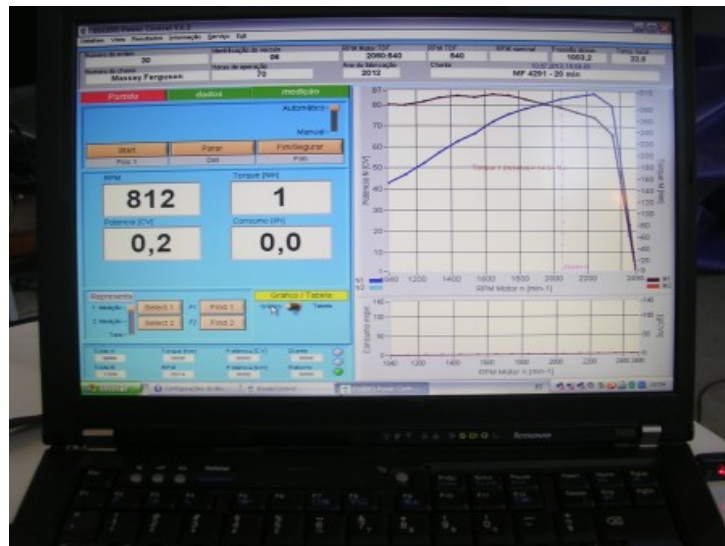


Figura 3.4: Software de aquisição de dados do dinamômetro.

Para a medição do consumo de combustível foi utilizado um fluxômetro (Figura 3.3) marca Flowmate (OVAL M-III), modelo LSF 41L. O sistema utilizado para aquisição desses dados foi um datalogger (Figura 3.3) da marca Campbell Scientific, modelo CR1000, para armazenar os dados do gerador de pulsos (fluxômetro), onde as informações foram registradas continuamente em uma frequência de aquisição de 2 segundos.

3.3.2 Metodologia utilizada

Primeiramente, antes de iniciar o ensaio, o sistema de alimentação de combustível do trator foi drenado e desconectado do tanque (reservatório de combustível do trator), posteriormente foi conectado a um recipiente externo, sendo o biodiesel depositado neste, passando a ser a fonte de alimentação do sistema.

O ensaio foi realizado seguindo a norma (ABNT NBR ISO 1585:1996, 1996), que apresenta correspondência com a norma (ABNT NBR 5484:1985, 1985). Utilizou-se um freio dinamométrico, comumente chamado de dinamômetro de absorção, que tem um ponto de ligação

com o motor a ser ensaiado. Essa ligação foi estabelecida através do dinamômetro acoplado à tomada de potência (TDP) do trator via árvore cardânica. Previamente ao acoplamento foi verificada a relação de transmissão, isto é, rotação do motor para fornecer a rotação padrão de 540 rpm na TDP através de um tacômetro foto/contato digital marca Minipa, modelo MDT-2238A.

Antes de iniciar a coleta dos dados, o trator permaneceu em aquecimento por um período de 20 minutos. Para realizar este aquecimento, o motor do trator foi acelerado em rotação máxima e após isto, o dinamômetro exerceu uma frenagem do motor equivalente a 75% da rotação máxima do motor.

Após este tempo de aquecimento de 20 minutos, o ensaio começou a ser realizado. O dinamômetro foi configurado para realizar uma leitura de dados a cada queda de 100 rpm da rotação do motor, a partir da primeira coleta realizada (2450 rpm). Automaticamente, o dinamômetro libera o freio quando o torque do motor começa a diminuir e o motor tende a apagar. Neste trator e com este combustível a menor rotação do motor ocorreu em 1150 rpm, totalizando 14 pontos de coleta de dados.

Foram coletadas 18 repetições, divididas em 3 grupos de 6 repetições, para verificar qual o tempo de aquecimento do motor em que as leituras dos parâmetros do motor se estabilizem. Com isto, os tempos de aquecimentos destes 3 grupos foram de 20 min, 60 min e 100min.

Para determinar se o tempo de aquecimento do motor influenciava ou não nos parâmetros analisados, as 18 repetições foram divididas em 3 grupos, correspondentes a 3 tempos de aquecimento (Taq). O Taq inicial foi de 20 minutos, onde o trator permaneceu conectado ao dinamômetro com 25% de frenagem de rotação (75% da rotação máxima). Após este período foram coletadas 6 repetições, que corresponderam ao tempo de aquecimento de 20 min. A partir dos 60 min foram coletadas mais 6 repetições (correspondente ao Taq 60 min). No último grupo foram coletadas outras 6 repetições a partir do Taq 100 min.

3.3.2.1 Análise estatística

A análise estatística dos dados coletados neste experimento foram realizadas da seguinte forma. Foram coletados valores das quatro variáveis respostas (torque, potência, consumo horário e consumo específico) em 14 rotações diferentes (2450, 2350, 2250, ..., 1150 rpm) com 18 repetições, totalizando 252 tratamentos.

Os experimentos foram delineados por fatoriais (bifatorial), com os fatores sendo as

rotações e as repetições.

Para o desenvolvimento teórico das técnicas de análise estatísticas de um experimento qualquer, o modelo matemático deve admitir as seguintes pressuposições (BANZATTO, 2006):

1. Os diversos efeitos são aditivos, isto é, tem-se uma soma de efeitos e estes efeitos são independentes;
2. Os erros ou desvios são conjuntamente independentes, isto é, não são correlacionados;
3. Todos os erros possuem distribuição normal, média zero e mesma variância σ^2 .

Por isto, para testar a homogeneidade das variâncias foi utilizado o teste *Bartlett* e, para testar a normalidade dos resíduos foi utilizado o teste *Shapiro Wilk*.

Caso alguns destes pressupostos não sejam satisfeitos, não há possibilidade da realização da análise da variância para identificar diferenças entre os grupos (no caso deste experimento, as repetições). Neste caso, deve-se realizar um teste não paramétrico, como por exemplo, o teste *Kruskal Wallis*.

Todas as análises estatísticas deste trabalho foram realizadas, através de rotina programada ou integrada, pelo software R (R Development Core Team, 2012). Foi utilizado também o pacote *Agricolae* (MENDIBURU, 2012), para realizar a comparação entre os tratamentos, com nível de significância de 5% pelo teste de Tukey.

3.4 Parâmetros de desempenho e determinação das emissões

Este experimento foi realizado num momento posterior a determinação do número de repetições e o tempo de aquecimento. Determinado o número de repetições ideal, passou-se a determinação dos parâmetros de desempenho do motor e, após este, das emissões dos gases de escape.

3.4.1 Delineamento experimental

Para cumprir os objetivos propostos neste trabalho, foram realizados ensaios de desempenho e emissões, com vistas a comparar diferentes combustíveis e diferentes misturas entre

eles, delineados com os seguintes combustíveis, apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Combustíveis utilizados nos ensaios de desempenho e emissões.

Porcentagem de biodiesel	5%	10%	15%	20%	50%	100%
Diesel S10	C1	C2	C3	C4	C5	
Diesel S500	C6	C7	C8	C9	C10	
Sem diesel mineral						C11

Os 11 combustíveis (C1 ao C11) estão assim representados. C1 \Leftrightarrow Diesel S10 com 5% de biodiesel; C2 \Leftrightarrow Diesel S10 com 10% de biodiesel; C3 \Leftrightarrow Diesel S10 com 15% de biodiesel; C4 \Leftrightarrow Diesel S10 com 20% de biodiesel; C5 \Leftrightarrow Diesel S10 com 50% de biodiesel; C6 \Leftrightarrow Diesel S500 com 5% de biodiesel; C7 \Leftrightarrow Diesel S500 com 10% de biodiesel; C8 \Leftrightarrow Diesel S500 com 15% de biodiesel; C9 \Leftrightarrow Diesel S500 com 20% de biodiesel; C10 \Leftrightarrow Diesel S500 com 50% de biodiesel, e; C11 biodiesel puro (B100).

Para o cálculo das concentrações de biodiesel necessário para produzir as misturas dos combustíveis, foi utilizada a equação (3.2), que leva em consideração o volume de combustível. Nesta equação, V_1 é o volume de diesel B5, C_1 é a concentração de diesel B5 (95%), C_2 é a concentração desejada de diesel B5 e V_2 é o volume esperado da mistura. Por diferença se calcula o volume de biodiesel a ser adicionado em cada tratamento.

$$V_1 = \frac{C_2 \times V_2}{C_1} \quad (3.2)$$

Para os ensaios de desempenho, as variáveis respostas foram torque, potência, consumo horário e específico, para cada combustível em todo o regime de trabalho do motor do trator, com intervalo de rotação de 50 rpm. Foram coletadas 24 rotações para cada combustível (2450, 2400, ..., 1300), totalizando 264 tratamentos.

Para os ensaios de emissões, os resultados obtidos foram opacidade CO₂, CO, HC, NO, NO₂ e O₂. O padrão do ensaio foi segundo a Norma ABNT NBR ISO 8178-4:2012.

3.4.2 Equipamentos utilizados

Além do dinamômetro, descrito anteriormente, o laboratório possui um conjunto de medição de combustível e emissões que é composto pelos seguintes instrumentos, que foram

utilizados neste experimento:

- Medidor de consumo de combustível indica o consumo de combustível e a sua temperatura;
- Medidor da opacidade dos gases de escape indica o valor-k, opacidade, fuligem, rotação do motor e temperatura do óleo lubrificante;
- Medidor dos gases de escape analisa os gases CO, HC, NO, NO₂, O₂, CO₂) além da rotação e temperatura do óleo lubrificante do motor.

Com estes instrumentos Fluxômetro EGGERS FM3 (medidor de consumo de combustível) analisador EGGERS Opacilyt ELD (medidor da opacidade dos gases de escape) e analisador EGGERS Infralyt ELD Diesel (medidor dos gases de escape), todos os dados para este trabalho podem ser obtidos. Na sequência serão detalhados estes equipamentos.

3.4.2.1 Medição do consumo de combustível

O fluxômetro Eggers FM3 (Figura 3.5) é um dispositivo de medição, que realiza a medição do consumo instantâneo de combustível. Ele é integrado com o software (Figura 3.4) que controla o dinamômetro (Figura 3.2). Com isto, para cada rotação em que há coleta de torque e rotação, o software coleta também o consumo horário de combustível. Com base na densidade do combustível e na sua temperatura, o software calcula o consumo específico de combustível pela equação (3.3).

O consumo específico de combustível do motor (C_e) foi calculado a partir do consumo horário de combustível, da densidade do combustível e da potência gerada naquele momento, e está apresentada na equação (3.3).

$$C_e = \frac{(Ch \times \rho)}{P} \quad (3.3)$$

Onde C_e é dado em (g kWh⁻¹), Ch é o consumo horário de combustível dado em (L h⁻¹) e ρ é a densidade do combustível em (g L⁻¹) e P é a potência do motor.

Este dispositivo funciona com um princípio simples. Uma vez que as mangueiras de admissão e retorno foram anexados e a linhas de sucção e de fluxo de retorno terem sido inseridas dentro do reservatório, uma circulação de alimentação é criada quando o dispositivo tenha sido



Figura 3.5: Fluxômetro Eggers FM3 (à frente) instalado no trator.

ligado. O fluxômetro só tem a tarefa de garantir pressão de combustível necessária e quantidade de combustível esteja disponíveis para o sistema de alimentação do trator (Figura 3.6).

As linhas tracejadas na Figura 3.6 indicam como o sistema de alimentação de combustível do trator admitiria e retornaria o combustível para o reservatório. Com o fluxômetro, a admissão e o retorno de combustível se dá via o próprio Fluxômetro Eggers FM3. Nele está presente uma válvula, que tem a função de aumentar a pressão do combustível para que sempre haja combustível disponível para o trator quando este necessitar.

Existem duas informações de saída do Fluxômetro: a saída **p** que mede a quantidade de combustível por tempo e a saída **t** que mede a temperatura do combustível (Figura 3.6).

Além disto, no fluxômetro existe um sistema de arrefecimento (*cooler*) para evitar que o combustível no sistema atinja temperaturas muito elevadas.

3.4.2.2 Medição da opacidade dos gases

Para a medição da emissão de partículas com base na opacidade dos gases de escape, são utilizados opacímetros. Existem dois tipos de analisadores de opacidade: *de fluxo parcial* e *de fluxo total*, que se distinguem pelo método de coleta da amostra. O analisador Opacilyt Eggers ELD, utilizado neste trabalho, é de fluxo parcial. A câmera graduada do Opacilyt utilizado tem um comprimento de 430mm, que é o padrão referencial das medições junto com a luz verde dos LED's de 560nm de comprimento de onda.

A medição da opacidade é feita por um feixe de luz que é emitido na direção perpen-

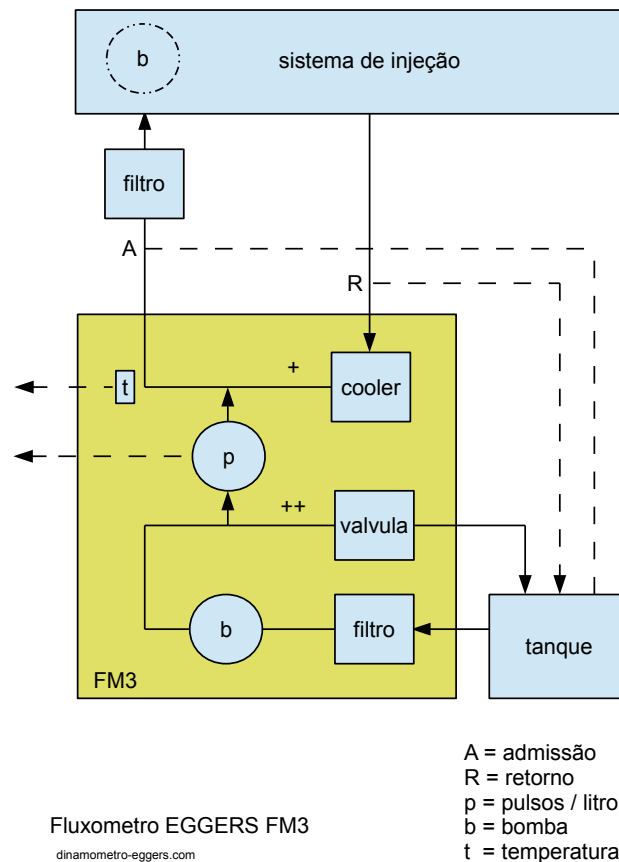


Figura 3.6: Esquema de funcionamento do Fluxômetro Eggers FM3

dicular à direção dos gases de escape. Devido às partículas existentes no gás de escape, a radiação emitida será enfraquecida por dispersão nas partículas e/ou por absorção no interior das mesmas. A diferença de intensidade entre a luz emitida e a luz recebida, após atravessar os gases de escape, determina a quantidade de partículas existentes nos gases de escape, ou seja a opacidade.

A grandeza para a medição da opacidade que é mais utilizada é o **coeficiente de absorção k** , que é expresso em m^{-1} . O valor de k corresponde à variação da intensidade luminosa que é emitida na câmara de medição, e a que alcança o receptor, depois de atravessar a amostra do gás de escape. Além do valor k , o Opacilyt pode apresentar os resultados em escalas lineares de medição de opacidade (N), com valores de 0 – 100, o que corresponde à percentagem (%) de enegrecimento (fuligem) dos gases e, em concentração de massa (concentração de fuligem) (c), apresentada em $mg\ m^{-3}$.

A relação entre o valor k e N pode ser expressa pela Equação 3.4:

$$k = \frac{-1}{L} \times \log_e\left(1 - \frac{N}{100}\right) \quad (3.4)$$

Onde k é dado em (m^{-1}), L é o comprimento efetivo, em metros, do trajeto dos raios luminosos através dos gases de escape e N é o valor da opacidade em percentagem. Neste experimento, optou-se por utilizar o valor da opacidade, expressa em (%).

O *Opacilyt* (Figura 3.8) não possui interface de visualização de dados com o usuário, necessitando com isto, um software para o controle e aquisição dos dados (Figura 3.7). Neste software pode-se controlar a frequência de coleta dos dados, os tipos de sensores envolvidos e o início e término de coleta dos dados. Além disto, o software possui interface de comunicação com o analisador de gases *Infralyt* (Figura 3.8), o que facilita o manuseio e armazenagem dos dados coletados.

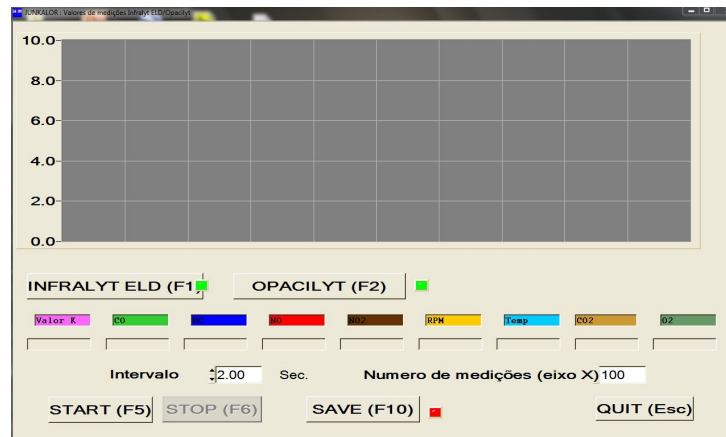


Figura 3.7: Software para controle e aquisição dos dados do *Opacilyt* e *Infralyt*.

A amostragem do material particulado não pode iniciar antes da estabilização do motor tenha sido atingida, e deve ser conduzida preferivelmente ao mesmo tempo que as emissões gasosas são medidas (ABNT NBR ISO 8178-4:2012, 2012). Com a conexão de ambos os equipamentos (*Opacilyt* e *Infralyt*) via software e computador, a coleta do material particulado e das emissões gasosas são realizadas num mesmo momento. Segundo a (ABNT NBR ISO 8178-4:2012, 2012), a conclusão da amostragem de material particulado deve estar dentro de ± 5 s da conclusão da medição de emissão gasosa e, no caso deste experimento foi no mesmo instante.

3.4.2.3 Medição dos gases de escape

O analisador de gases Infraclyt ELD (Figura 3.8) tem a capacidade de medir alguns dos principais gases de escape. Os dados são apresentados num visor do próprio aparelho (Figura 3.8) ou no software de controle e aquisição dos dados (Figura 3.7). O *Infraclyt* coleta O₂ e CO₂ em % vol e NO₂, CO, NO e HC em ppm³.

Além disto, o *Infraclyt* possui, da mesma forma que o *Opacilyt* entrada para sensores da temperatura do óleo do motor e rotação do motor. Quando se utiliza ambos os equipamentos, e se controla estes pelo software citado (Figura 3.7), estas informações de temperatura do óleo e rotação podem ser coletada por apenas um dos equipamentos.



Figura 3.8: Opacilyt (à frente), Infraclyt ELD (segundo plano).

3.4.3 Metodologia utilizada

3.4.3.1 Parâmetros de desempenho

Para o aquecimento do motor do trator, este permaneceu por 20 min com aceleração máxima e com carga. A carga aplicada foi suficiente para reduzir a rotação em 20%. Com o término do aquecimento foi iniciado a coleta dos dados de desempenho, dos 264 tratamentos com 4 repetições cada um.

³ parte por milhão. O valor em ppm é 10.000 vezes menor que a mesma unidade em %.

Os combustíveis foram colocados em um recipiente externo ao trator (não foi utilizado o reservatório de combustível), para que fosse mais fácil a substituição dos diferentes combustíveis. Para a troca do combustível, (de C1 para C2, e assim por diante) o motor permaneceu acelerado e com carga por 5 minutos, para consumir todo o combustível que estava no sistema de alimentação do motor.

As quatro repetições foram realizadas em sequência, sem a desaceleração do trator entre elas. O controle da rotação e coleta dos dados foi realizada automaticamente, via software (Figura 3.4).

Para que o dinamômetro calcule a potência e o consumo específico a partir dos dados de rotação, torque e consumo horário e informe o valor correto pela norma, é necessário informar para o dinamômetro os parâmetros atmosféricos (temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica) e a densidade do combustível (Figura 3.9).

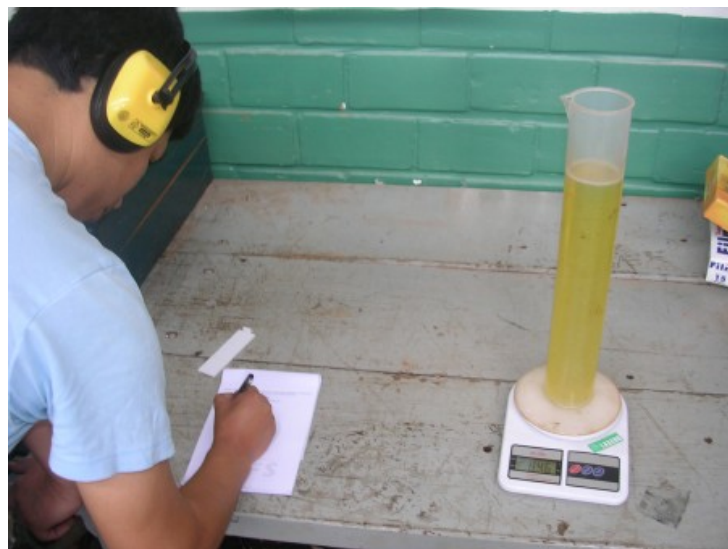


Figura 3.9: Determinação da densidade dos combustíveis.

A densidade dos combustíveis foi determinada com balança de precisão (Figura 3.9), com divisões de 1 g, em temperatura ambiente, antes da utilização para o ensaio dinâmico. A temperatura durante esta medição foi de aproximadamente 22°C.

3.4.3.2 Análise de emissões

A coleta e análise das emissões de poluentes pelo motor do trator utilizado no ensaio seguiu a Norma (ABNT NBR ISO 8178-4:2012, 2012) que trata dos motores alternativos de combustão interna - medição das emissões de gases de exaustão, em sua parte 4: Ciclos de

ensaio em regime constante para diferentes aplicações do motor. Esta normativa entrou em vigor em abril de 2012 e atualmente deve ser utilizada para ensaio de emissões no Brasil. É uma adoção idêntica em conteúdo técnico, estrutura e redação a Norma ISO 8174-4:2007.

O aquecimento do motor foi realizado por um período de tempo de 20 min para estabilizar os parâmetros do motor, sob condição de carga que proporcionou uma redução de 20% da rotação máxima com aceleração total. Este critério é preconizado pela norma e, segundo ela, é denominado de condicionamento do motor (ABNT NBR ISO 8178-4:2012, 2012).

Na Figura 3.10 estão apresentadas as percentagens de torque dadas nos ciclos de ensaio que são valores que representam, para um determinado modo de ensaio a razão do torque requerido pelo torque máximo possível, em ensaio de motor de trator agrícola. Nesta figura 3.10, 1 é a curva de torque com aceleração máxima e variação de carga; 2 é a rotação de marcha lenta; 3 é a rotação intermediária que é a rotação de torque máximo e; 4 é a rotação nominal ou rotação de potência máxima. Nem todos os pontos apresentados na Figura 3.10 são pontos de coleta de emissão para este ensaio de motor agrícola. Este gráfico é genérico e geral para todos os tipos de motores e, portanto, os modos de coleta para o trator está apresentado na Tabela 3.2.

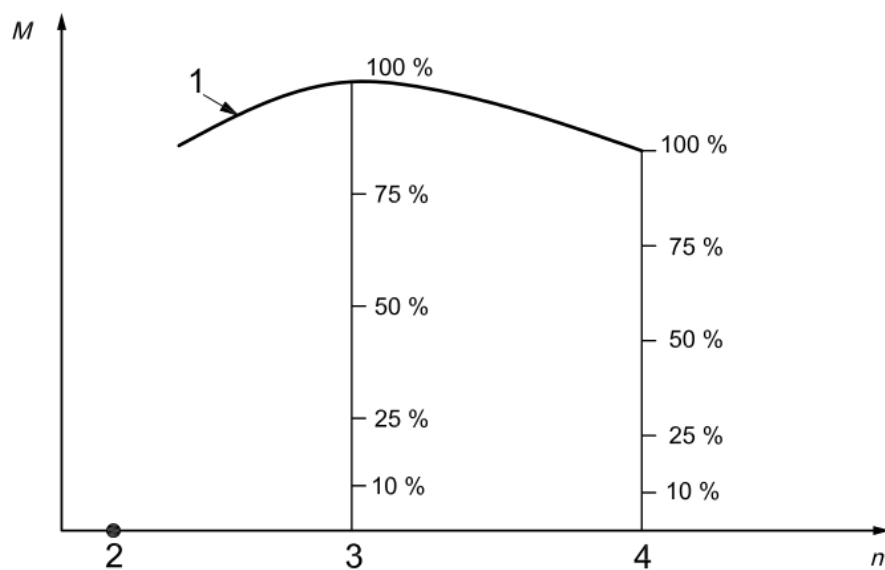


Figura 3.10: Percentagens de torque em relação ao torque máximo em determinada rotação para o ensaio de emissões.

Na Tabela 3.2 estão listados os 8 modos de testes, que nada mais são que 8 pontos de coletas das emissões com diferentes rotações e torques. Estes modos fazem parte dos veículos classificados pela Norma (ABNT NBR ISO 8178-4:2012, 2012) como tipo C1, que são os veículos fora de estrada, *off-road* e equipamentos industriais movidos a diesel, onde o trator se encaixa.

Existem 3 rotações onde devem ser realizadas as coletas: na rotação de potência máxima ou rotação nominal (nPm) [4 pontos de coleta], na rotação de torque máximo (nMm) [3 pontos de coleta] e na rotação de marcha lenta [1 ponto de coleta]. Para cada modo ⁴ de ensaio existe um fator de ponderação (Tabela 3.2) que somente se aplicam se os resultados forem expressos em gramas por quilowatt-hora (g kWh^{-1}) (ABNT NBR ISO 8178-4:2012, 2012).

Tabela 3.2: Modos de teste e fatores de ponderação para emissões de motor diesel agrícola.

Modo	1	2	3	4	5	6	7	8
Rotação	nPm ¹	nPm	nPm	nPm	nMm ²	nMm	nMm	lenta ³
Porcentagem de 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

¹Rotação de potência máxima. ²Rotação de torque máximo. ³Rotação de marcha lenta. Fonte: Adaptado da Norma NBR ISO 8178-4:2012.

Como não existiu a possibilidade da sincronização dos dados entre as emissões e a potência gerada no respectivo modo, os resultados não serão apresentados em $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$, mas em % vol para opacidade, O_2 e CO_2 e em ppm para NO_2 , CO, NO e HC.

Cada ensaio foi realizado na sequência dada dos modos de ensaio para um ciclo de ensaio particular. A duração mínima do modo de ensaio, segundo a norma para atender o exposta na Tabela 3.2 é de 10 minutos. Já neste experimento o tempo de coleta para cada modo foi de 2 minutos, sendo que o primeiro terço dos dados foram descartados, pois neste período é que ocorre a estabilização dos equipamentos de medição. Foram coletados dados a cada 2 segundos, totalizando aproximadamente 40 dados para cada modo e para cada tipo de combustível, totalizando mais de 3500 observações para cada variável resposta.

Para cada tratamento, apresentado na Tabela 3.2, tem-se um resultado de emissões de gases e de opacidade. Os tratamentos foram comparados entre si para ver se há diferença significativa entre eles.

A análise estatística foi feita pela ANOVA e, se o teste *f* apresentou diferença entre os tratamentos, foi realizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro (95% de confiança). Além disto, foi realizada a análise de regressão dos dados para identificar o comportamento das emissões variando o tipo de combustível e o modo de operação.

⁴ ponto de operação do motor caracterizado por uma rotação e um torque.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação do tempo de aquecimento e do número de repetições

Com o objetivo de determinar o tempo de aquecimento e o número de repetições para servir de base para os ensaios de desempenho e emissões propostos neste trabalho, foi realizado um experimento visando a obtenção destes valores. O ensaio foi realizado seguindo a metodologia proposta utilizando um único combustível (B100), conforme certificado de qualidade em anexo (Anexo A).

O experimento foi realizado no dia 17 de julho de 2013, no laboratório de Agrotecnologia e a coleta dos dados ocorreu entre 10:45 às 12:45, segundo as condições atmosféricas apresentados na Figura 4.1. A temperatura do ar variou de 22°C a 27°C, a umidade relativa do ar diminuiu de 65% para 53% e a pressão atmosférica permaneceu praticamente estável, entre 100,3 e 100,2 kPa.

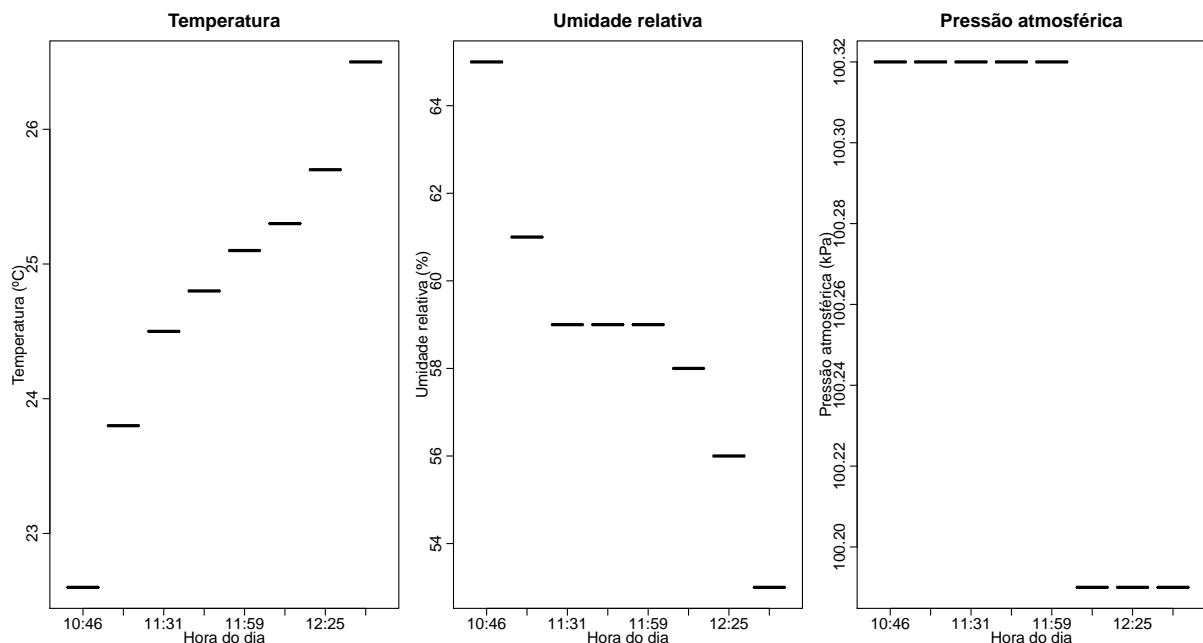


Figura 4.1: Variação dos parâmetros atmosféricos durante o experimento de repetições e tempo de aquecimento.

Esta informação é importante pois, em motores aspirados, a pressão do ar afeta diretamente a potência, pois esta depende da quantidade de oxigênio que pode queimar. Maior temperatura resulta em menor potência pois o ar mais quente expande e contém menos oxigênio por volume. A umidade do ar também afeta o resultado tomando espaço do oxigênio.

Motores turboalimentados reagem de forma completamente diferente a esses fatores, como é o caso do motor utilizado neste experimento. Variações de pressão atmosférica causam pouca ou nenhuma alteração no resultado nestes motores.

Os parâmetros analisados neste ensaio foram o torque do motor, a potência do motor, o consumo horário e o consumo específico de combustível.

Para compreender melhor a interação entre estes fatores foi realizado a análise de correlação linear entre os parâmetros do ensaio do motor estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Correlação linear entre os parâmetros analisados.

	Torque	Potência	Consumo horário	Consumo específico
Torque	1,00	- 0,60	0,19	0,19
Potência	- 0,60	1,00	0,86	0,86
Consumo horário	0,19	0,86	1,00	1,00
Consumo específico	0,19	0,86	1,00	1,00

É importante observar que a correlação entre o consumo horário e o específico é de 100%, visto que a obtenção deste é baseada no consumo horário de combustível. A correlação entre o consumo horário e a potência do motor foi de 86%, o que evidencia que quanto maior for a potência gerada, maior é o consumo de combustível. Já para a correlação linear entre o consumo horário e o torque foi de 19%, o que significa que a correlação é baixa e não há como utilizar o consumo horário de combustível para relacionar com o torque do motor.

A correlação linear entre torque e potência foi de - 60%. A potência é calculada a partir do torque e da rotação (Equação 3.1) e enquanto enquanto a potência tende a aumentar, o torque tende a diminuir dentro da faixa de utilização ⁵, o que explica este valor de correlação linear.

4.1.1 Tempo de aquecimento do motor

A variação do torque, da potência e do consumo de combustível, considerando o tempo de aquecimento, são mostrados na Figura 4.2. O comportamento das curvas características não foi afetado pelo tempo de aquecimento, principalmente quando analisamos as variáveis torque e potência. Percebe-se uma diferença do consumo (tanto horário quanto específico) onde o

⁵ A faixa de utilização é o intervalo de rotação do motor entre o torque máximo e a potência máxima.

consumo de combustível foi menor com o tempo de aquecimento (Taq) de 20 min, maior com o tempo de aquecimento de 60 min e diminuiu com o tempo de aquecimento de 100 min. Entretanto, não houve diferença significativa pelo teste f da análise da variância, apresentado na Tabela 4.2.

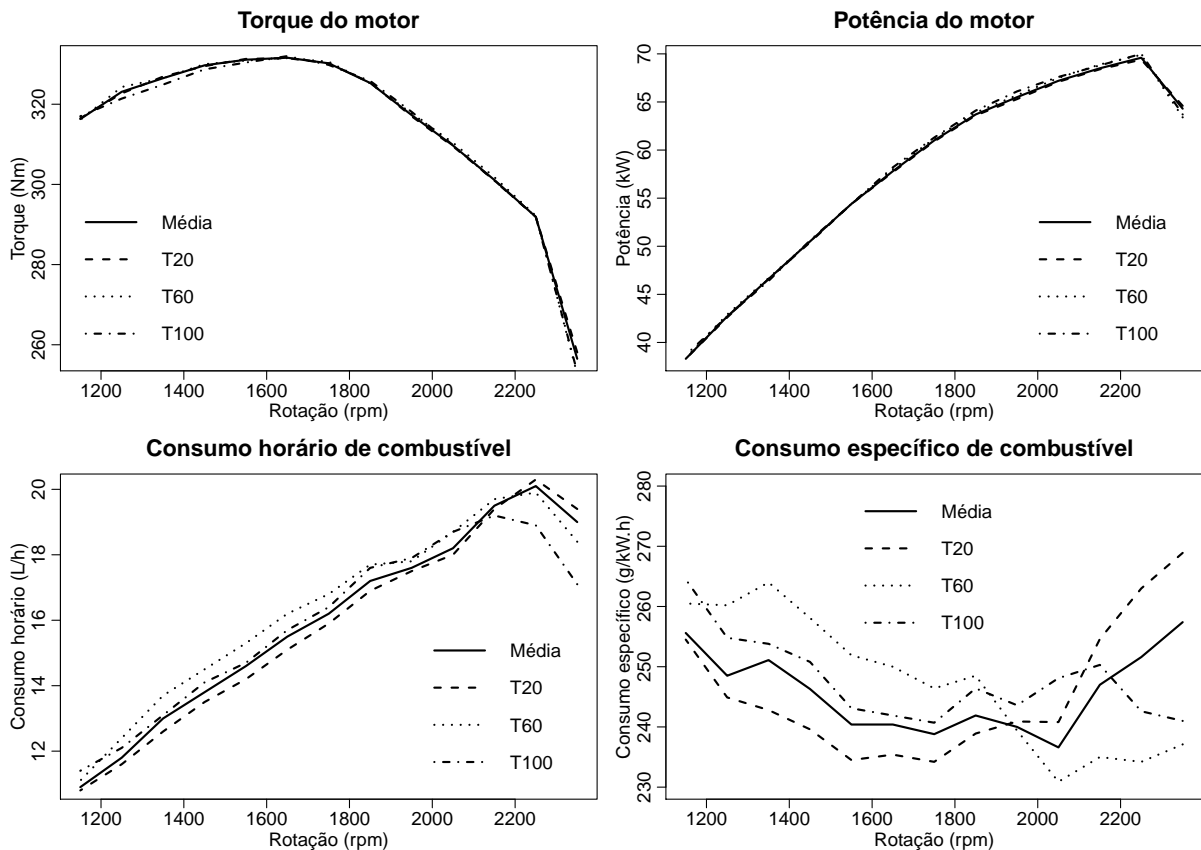


Figura 4.2: Variação dos parâmetros do motor considerando o tempo de aquecimento.

Relacionando o gráfico do consumo horário com a potência (Figura 4.2), percebe-se que possuem a mesma tendência de comportamento, corroborando com o elevado valor de coeficiente de correlação linear (0,86) (Tabela 4.1).

Com vistas a verificar se o tempo de aquecimento apresenta diferença significativa entre eles, foi realizado a análise da variância (ANOVA). Esta análise tem por objetivo identificar se um ou mais tratamentos diferem, a um determinado nível de significância. Neste trabalho, todas estas análises foram testadas com 95% de confiança ($p \geq 0,05$).

Os dados resultantes da ANOVA, apresentados na Tabela 4.2 indicaram que em nenhum dos parâmetros analisados, o tempo de aquecimento teve influência nos resultados, com 95% de significância. Isto significa que não é necessário aquecer o motor do trator por um período superior a 20 min (tempo mínimo considerado no experimento) para que este se estabilize e se

Tabela 4.2: Resultado do teste f da ANOVA dos tempos de aquecimento.

Fator	p valor	Significância ¹
Torque	0,3657	Não
Potência	0,5358	Não
Consumo horário	0,1357	Não
Consumo específico	0,9438	Não

¹É significativo se o p valor for menor que 0,05.

possa iniciar a coleta dos dados.

4.1.2 Número de repetições

Considerando que o tempo de aquecimento não teve influência nos parâmetros avaliados, a determinação do número de repetições levou em consideração todas as 18 repetições num grupo apenas. A variação de cada parâmetro analisado, em cada rotação (18 pontos por rotação) está apresentado na Figura 4.3. Para cada faixa de rotação, os gráficos apresentam o *Boxplot* ou diagrama de caixa ⁶, que permite localizar e analisar a variação de cada variável dentre diferentes rotações de trabalho.

Nota-se, observando a Figura 4.3, que a leitura do torque e o cálculo da potência possui menos variação nas observações do que nas leituras de consumo horário. Isto se deve ao fato que os métodos e os instrumentos de coleta de dados de consumo horário são menos precisos do que a coleta de dados pelo dinamômetro.

Outro ponto a destacar sobre a coleta de dados do dinamômetro: a primeira coleta de dados (rotação 2450) é a que possui maior dispersão dos dados (Figura 4.3), pois o dinamômetro necessita estabilizar-se para iniciar suas leituras. As informações de torque nesta rotação não tem muita aplicação na prática devido ao fato de que, não havendo frenagem no dinamômetro, não há torque gerado e conseqüentemente a potência nesta faixa de rotação é zero.

Entretanto, na faixa de rotação que é compreendida entre a potência máxima (2250 rpm) e o torque máximo (1550 rpm), a dispersão das 18 repetições é muito pequena. Isto é importante que ocorra, pois é nesta faixa ⁷ que geralmente o trator irá trabalhar durante as

⁶ O diagrama de caixa possui as seguintes informações: a mediana dos dados, representado pelo segmento de reta interno da caixa; os quartis 1 e 3, representados pelos limites verticais da caixa; os decis 1 e 9 ou o desvio padrão 1,5, representados pelos bigodes e os *outliers* que são valores fora deste intervalo maior (pontos extremos).

⁷ Esta faixa compreendida entre a potência máxima e o torque máximo é comumente chamada de faixa de utili-

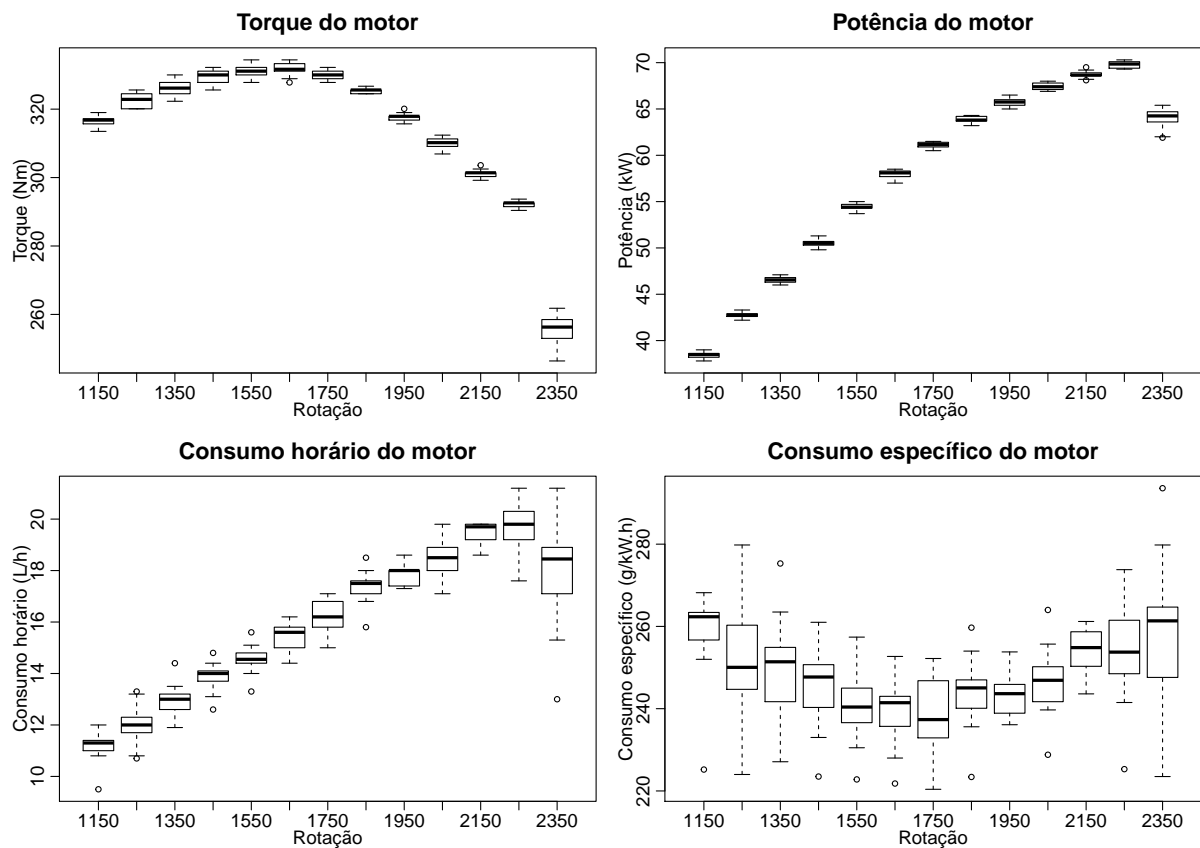


Figura 4.3: Variação dos parâmetros do motor considerando as 18 repetições.

operações agrícolas.

Realizada esta análise de dispersão dos valores observados em cada faixa de rotação, cabe realizar uma análise para determinar qual é o número de repetições ideal, considerando o menor coeficiente de variação (cv) entre as repetições. A análise gráfica está apresentada na Figura 4.4.

Percebe-se, observando a Figura 4.4, que o menor cv ocorreu em 4 repetições, tanto para a variável torque, quanto para a variável potência. Para o consumo horário e específico, o menor cv ocorreu com 17 repetições. Entretanto, o ganho com a diminuição do cv de 4,5% para 4,0% não justifica a realização de 17 repetições.

Portanto, para as variáveis analisadas, o número de repetições necessários para os experimentos propostos neste trabalho é quatro.

zação.

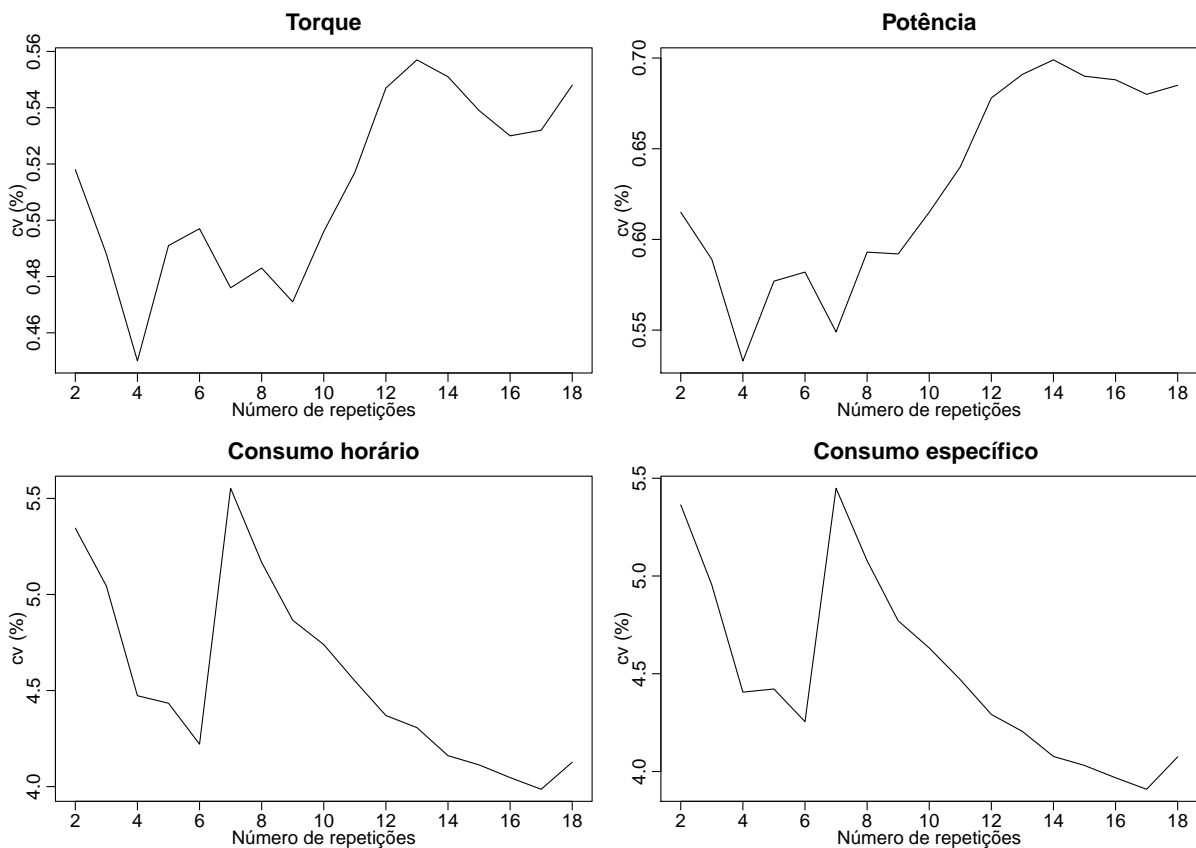


Figura 4.4: Comportamento do coeficiente de variação pelo número de repetições.

4.1.3 Resultados adicionais deste experimento

Como complemento deste experimento, pode-se relatar alguns resultados adicionais, que não faziam parte do escopo, mas que são importantes para identificar as características do motor.

A potência máxima do motor, considerando as condições atmosféricas (Figura 4.1) e o combustível (Anexo A), foi de 70,3 kW a 2250 rpm e o torque máximo foi de 334 Nm a 1550 rpm. A reserva de torque deste motor, calculada pela Equação 4.1, foi de 12%.

Para calcular a reserva de torque do motor foi utilizada a equação 4.1:

$$\Delta M(\%) = \frac{(M_m - M_n)}{M_m} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde ΔM é a reserva de torque em percentagem, M_m é o torque máximo e o M_n é o torque nominal ⁸.

O consumo horário máximo foi de 17,8 L h⁻¹ na mesma rotação da potência máxima

⁸ Torque nominal é o torque na rotação de potência máxima.

(2250 rpm) e o consumo específico mínimo, calculada pela Equação 3.3, foi de $239,3 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ na rotação de 1750 rpm.

4.2 Desempenho do motor com diferentes combustíveis

Com os dados do ensaio para determinar o tempo de aquecimento e o número de repetições analisados, passou-se a determinação dos parâmetros de desempenho do motor e, na sequência, a análise das emissões.

Para o correto cálculo da potência e do consumo de combustível (tanto horário quanto específico) pelo dinamômetro, foi necessário informar ao software que gerencia o dinamômetro, os parâmetros atmosféricos, mostrados na Figura 4.5 e a densidade do combustível, expresso em g kg^{-1} , descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Densidade dos combustíveis utilizados nos experimentos de desempenho e emissões.

Combustível	C1 ¹	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Densidade (g kg^{-1})	836	846	850	856	860	832	844	845	847	858	881

¹O combustível C1 equivale ao diesel S10 com 5% de biodiesel; o C2 ao S10B10, ..., o C10 ao S500B50 e o C11 ao B100.

As densidades dos 11 combustíveis, apresentados na Tabela 4.3, variaram de 832 g kg^{-1} no combustível C6 (S500 - B5) a 881 g kg^{-1} no combustível C11 (B100). Isto é perfeitamente normal, já que a densidade do biodiesel é maior que a do diesel, para uma mesma temperatura.

As densidades dos combustíveis variaram conforme a proporção de diesel/biodiesel em suas misturas, sendo que quanto maior esta proporção, menor a densidade (Tabela 4.3).

As condições atmosféricas, durante o experimento de desempenho, estão apresentadas na Figura 4.5.

De posse das informações de temperatura atmosférica, pressão atmosférica (Figura 4.5) é possível calcular o fator de correção da potência, necessário para o cálculo correto da potência, independente das condições atmosféricas, já que a potência desenvolvida por um motor varia de acordo com estas condições.

A temperatura durante o período de ensaio de desempenho aumentou de $27,5^\circ\text{C}$ para $33,5^\circ\text{C}$. Na proporção inversa a umidade relativa do ar diminuiu de 66% para 44%, o que sig-

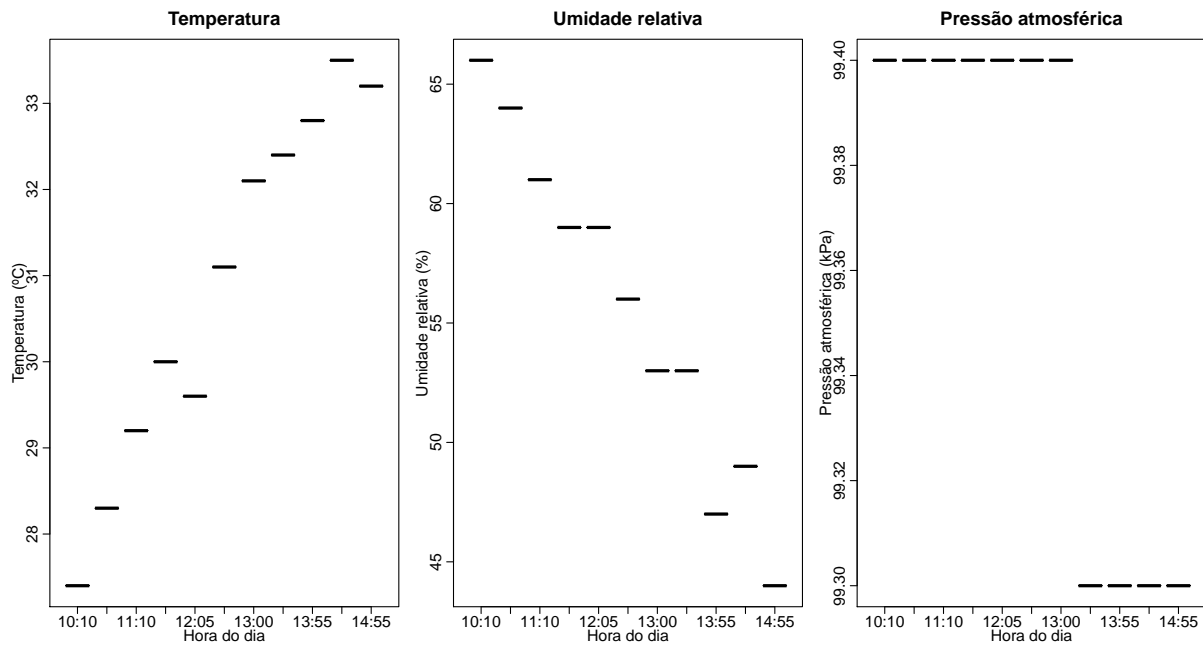


Figura 4.5: Condições atmosféricas durante o ensaio de desempenho.

nifica que a quantidade de água na atmosfera permaneceu sem muita variação. Já a pressão atmosférica quase não teve alteração (Figura 4.5).

4.2.1 Análise das curvas de desempenho

As curvas de desempenho do motor foram geradas a partir de duas origens: a primeira e característica, foi gerada pelos valores obtidos pelo dinamômetro e fluxômetro. A segunda forma foi através das equações de regressão (ambas serão apresentadas e discutidas).

Primeiramente, antes da geração das curvas, foi realizado uma análise da distribuição dos pontos em cada rotação através dos resíduos (Figura 4.6). Os resíduos são as diferenças entre os valores observados e a média aritmética destes pontos numa mesma rotação. Quanto maior for o resíduo, menor é a precisão daquelas observações e pior será sua inferência.

Como podemos observar na Figura 4.6, os resíduos foram maiores nas rotações de 2450, 2400 e 2350. Isto pode ser explicado pelo fato de que o dinamômetro precisa de um certo tempo para estabilizar (em torno de 1 a 2 min) para começar a realizar as leituras. Nesta estabilização, a probabilidade do dinamômetro coletar valores de rotação e torque muito diferentes entre si é alta, devido ao baixo torque e pela dificuldade do dinamômetro exercer a pouca frenagem nestas rotações.

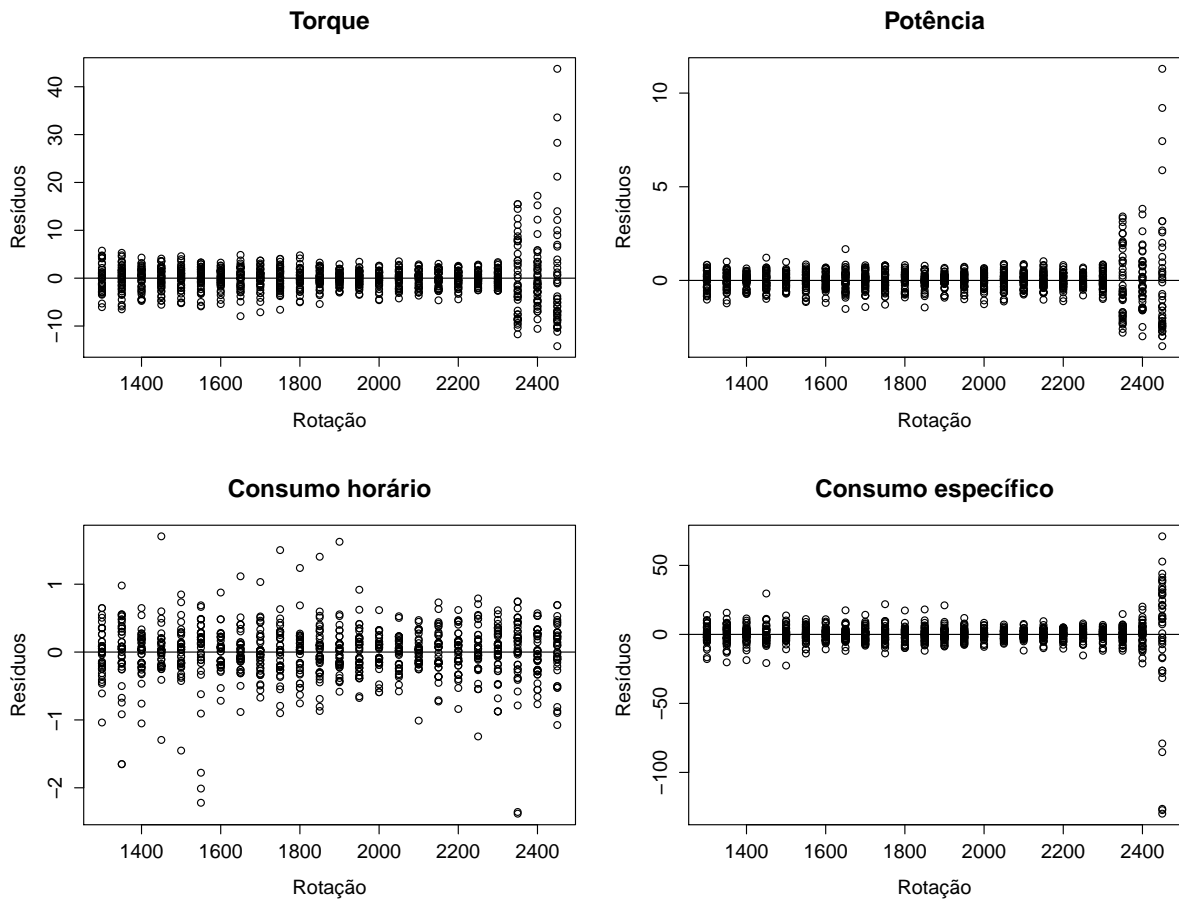


Figura 4.6: Resíduos dos parâmetros de desempenho em todas as rotações.

O mesmo ocorre com o fluxômetro e seu registro do consumo horário num ponto de rotação em que o dinamômetro demora para realizar a coleta dos dados. Com isto, é possível observar que nestas rotações fica difícil inferir qualquer comportamento, baseado no conjunto destas observações.

Comparativamente, o fluxômetro apresenta uma dispersão maior nos dados (Figura 4.6, Consumo horário) do que o dinamômetro (Figura 4.6, Torque). Isto ocorre, pois a sensibilidade (maior) e o tipo dos dados coletados (pequena quantidade de combustível) do fluxômetro em relação ao dinamômetro faz com que esta variabilidade seja maior.

Além disto, para realizar as análises estatísticas, como a ANOVA, estes pontos nestas 3 rotações (2450, 2400 e 2350) fazem com que a homogeneidade de variâncias (um dos pressupostos para realizar a ANOVA e o teste de comparação de médias) não ocorra, impossibilitando de realizar estas análises estatísticas.

A partir destes pressupostos, foram retiradas as informações destas três rotações citadas, para realizar as análises estatísticas e a confecção dos gráficos. Como estas rotações estão

acima da rotação de potência máxima, não influenciam nos resultados dos parâmetros (potência máxima, torque máximo, reserva de torque) por ficarem fora da faixa de utilização.

Além destas figuras, uma análise inicial pode ser realizada observando a Figura 4.7. Ela apresenta as curvas de desempenho confeccionadas pelas equações de regressão. Elas servem para identificar se é possível utilizar o teste de comparação de médias, já que nos mostram se as curvas se transpassam ou não. Caso haja transpasse de curvas, na maioria dos casos, a média não seria um bom indicador, já que haveria valores maiores em determinadas rotações e menores em outras, comparativamente.

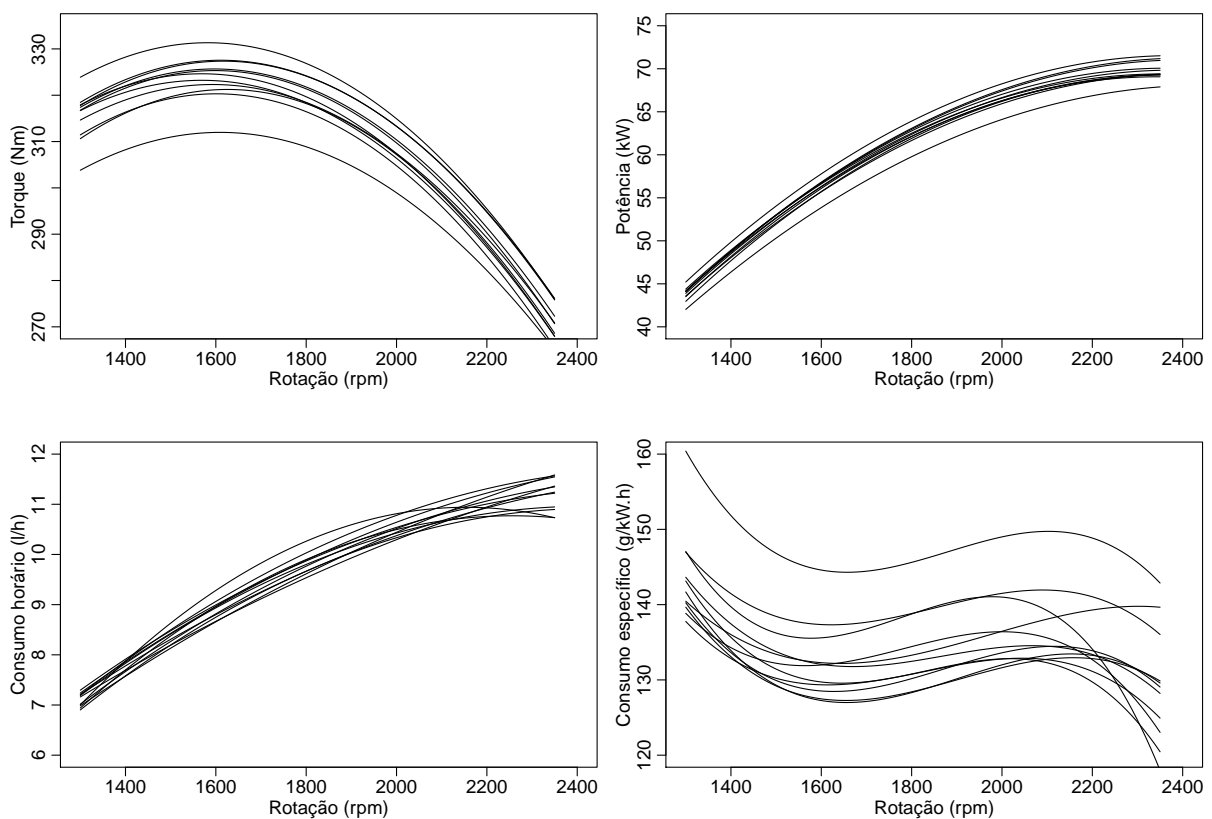


Figura 4.7: Comportamento das curvas de desempenho e consumo por regressão linear.

Pela proximidade das curvas da Figura 4.7, não foi possível diferenciá-las via legenda, nem foi possível apresentar as variações dos dados em cada rotação para cada curva. Reforçando, o intuito delas é mostrar o comportamento das curvas por regressão linear.

Analisando a Figura 4.7, percebe-se que para as variáveis torque e potência, as curvas geradas pelas equações de regressão (apresentadas nas tabelas B.1 e B.2 presentes na página 111) apresentam um comportamento característicos destas variáveis. Além disto, não há nenhuma curva que inicia num ponto mais baixo e termina num ponto mais alto, portanto não se cruzam, resultando com isto uma melhor inferência sobre as diferenças entre os combustíveis,

pela média aritmética (Tabela 4.4).

As equações de regressão, que geraram as curvas da Figura 4.7, estão apresentadas nas Tabelas B.1 (pág 111), B.2 (pág. 111), B.3 (pág. 112) e B.4 (pág. 112). Para o torque, as equações de regressão linear estão apresentadas na Tabela B.1. Nota-se um alto coeficiente de determinação (99%, com exceção do C11 (98%)), o que demonstra um comportamento muito bem modelado, com segurança nas inferências.

É possível perceber também (Figura 4.7) que o consumo horário apresenta um comportamento semelhante com a potência e o torque, entre os diferentes combustíveis. Já o consumo específico apresenta um comportamento mais errático entre os diferentes combustíveis. Isto se deve a maior quantidade de variáveis que são necessárias para sua determinação, como potência, consumo horário e densidade do combustível.

4.2.1.1 Torque

O torque do motor, apresentada na Figura 4.8, apresentou diferença entre os combustíveis utilizados. É possível observar claramente que a utilização de biodiesel puro (C11) apresentou o menor torque do motor, em todas as rotações dentro da faixa de utilização, comparado com os outros combustíveis.

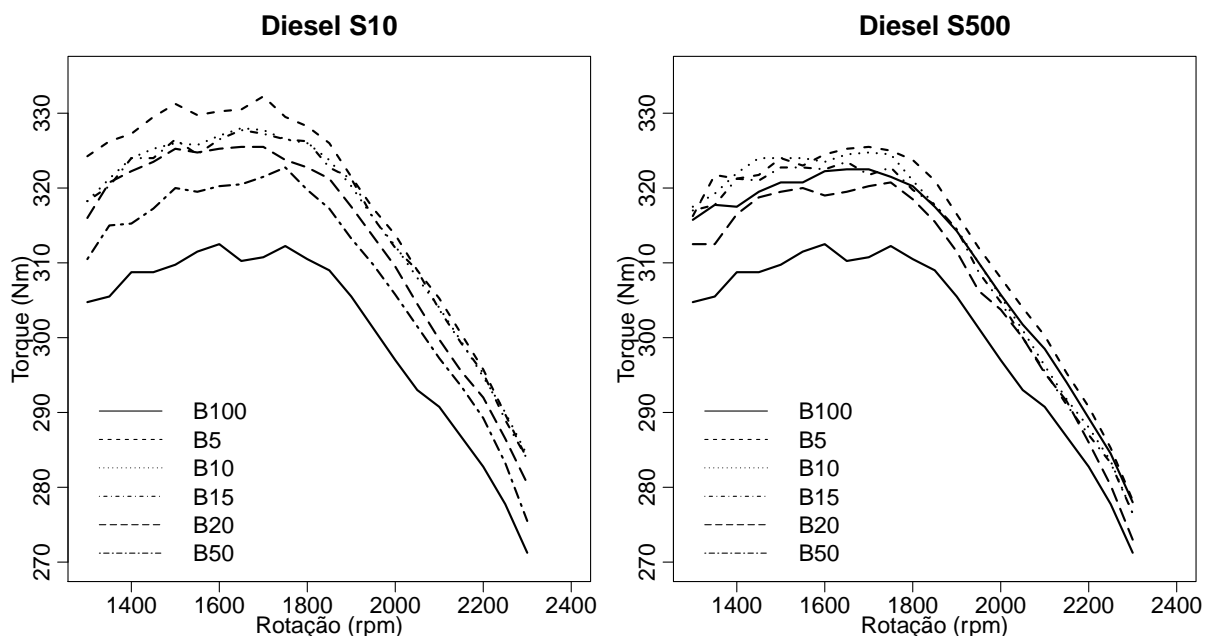


Figura 4.8: Torque do motor utilizando diferentes combustíveis.

O maior torque do motor foi atingido com o combustível C1 (S10-B5), alcançando 332

Nm na rotação de 1700 rpm. O menor torque máximo ocorreu com o uso do combustível C11 (B100), com 312 Nm a 1600 rpm (Figura 4.8). Isto representa uma diferença de 6% para menos utilizando o B100.

A reserva de torque (ΔM) foi maior para o combustível C1 (14,5%) e menor para o combustível C5 (12,0%). Isto representa uma amplitude de 2,39% ou uma diferença de $\sim 17\%$.

Outro resultado interessante sobre a variável torque foi quando se compara apenas os combustíveis diesel mineral ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ S10 [C1 a C5] e S500 [C6 a C10]). O torque máximo, na média das 5 misturas de biodiesel, com o diesel S10 foi de 327,2 Nm, enquanto que com o diesel S500 foi de 324,4 Nm. Isto pode ser observado pelos picos nas curvas da Figura 4.8. Além disto, com o diesel S500 as curvas permaneceram mais próximas, enquanto que com o diesel S10 ficaram mais afastadas. Esta maior alteração no Diesel S10 pode ser devido ao fato que este combustível é mais limpo que o Diesel S500 e portanto, sofre com mais intensidade com a adição do biodiesel.

Para analisar se houve diferença significativa entre os combustíveis, foi realizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, após os pressupostos da ANOVA serem aceitos. Estes resultados estão expressos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Diferença das médias entre os combustíveis para as variáveis de desempenho do motor.

Torque	Potência	Consumo horário	Consumo específico
C1 a ¹	C1 a	C4 a	C11 a
C2 b	C2 b	C5 a	C5 b
C3 b	C3 b	C11 ab	C4 c
C4 c	C7 c	C6 ab	C10 cd
C7 c	C4 d	C9 ab	C6 de
C8 d	C8 de	C10 ab	C9 def
C6 de	C9 e	C2 b	C8 efg
C9 e	C10 f	C7 b	C2 efg
C5 f	C5 f	C8 b	C7 fg
C10 g	C6 f	C3 b	C1 g
C11 h	C11 g	C1 b	C3 g

¹Combustíveis seguidos pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Os combustíveis diferiram entre si em 8 grupos distintos (letras de “a” a “h”), para a variável torque (Tabela 4.4). O combustível com melhor desempenho foi o C1, seguido de C2 e C3 (que não diferiram entre si). Já o pior combustível foi o C11. Os três combustíveis que geraram menos torque foram o biodiesel puro e as misturas de 50%. Os melhores desempenhos

foram alcançados com o diesel S10, o que é promissor, já que provavelmente substituirá o diesel S500 na agricultura em breve.

Como o diesel S10 é hoje aproximadamente 12% mais caro que o diesel S500, este ganho de torque é muito importante para justificar sua utilização em detrimento no diesel com maior teor de enxofre.

Para complementar os resultados obtidos para a variável torque com este ensaio de desempenho, foram geradas as equações de regressão linear (Figura 4.9), com os valores de torque máximo e sua variação com o incremento de biodiesel na mistura do combustível, separando os combustíveis diesel mineral (S10 e S500). O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,94 para o diesel S10 e de 0,98 para o diesel S500⁹. No resultado apresentado na Figura 4.9, para o diesel S500, 98% do comportamento do torque máximo é explicado pelo modelo ($y = 327,28 - 0,15x$) e os outros 2% este modelo não consegue explicar.

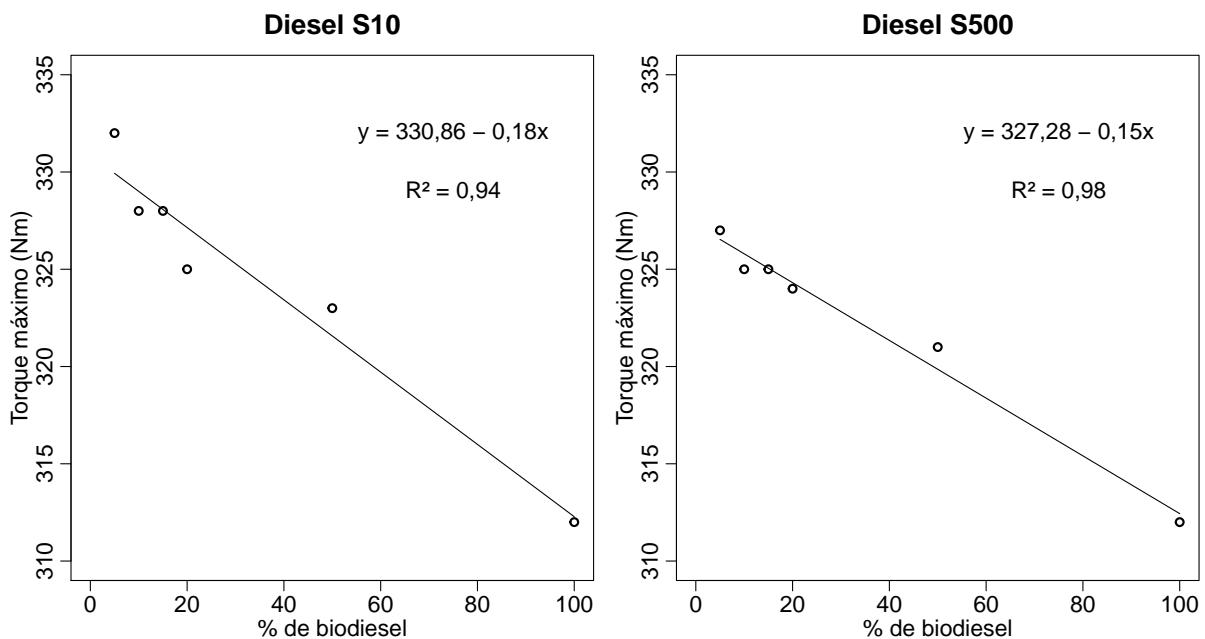


Figura 4.9: Comportamento do torque máximo em função da concentração de biodiesel.

Percebe-se, analisando a Figura 4.9, que conforme aumenta a concentração de biodiesel na mistura o torque máximo do motor diminui, tanto para o diesel S10, quanto para o diesel S500. Entretanto, para o diesel S10, o incremento de 10% de biodiesel na mistura reduz o torque máximo do motor em 1,8 Nm. Já para o diesel S500 esta redução é na ordem de 1,5 Nm. Uma possível explicação para que o torque máximo sofra menos redução no diesel S500 é que

⁹ O coeficiente de determinação indica quanto o modelo de regressão linear explica o comportamento dos dados observados. O valor máximo do R^2 é 1,00.

o enxofre, presente em maior quantidade neste combustível, é combustível.

Outro resultado importante é a redução de 6,2% do torque máximo quando se utiliza o B100 em relação ao B5. Fiorese et al. (2011) encontraram redução de 4,3% nestas mesmas misturas. Segundo os autores, isto se deve ao fato do menor poder calorífico do biodiesel. Em trabalho de Ozsezen et al. (2009) perceberam redução de 4,5% no torque máximo quando foi aumentada a concentração de biodiesel na mistura. Buyukkaya et al. (2010) trabalhando com óleo de canola puro (B100) comparando com diesel comercial B5 observaram um incremento no torque máximo de 8% com B5 em relação ao biodiesel puro.

Özener et al. (2012) relataram uma redução de até 4% no torque máximo com na mistura B50 (biodiesel de soja) em relação ao diesel mineral puro.

4.2.1.2 Potência

Já para a variável potência (Figura 4.10), o comportamento foi semelhante ao que ocorreu com o torque (Figura 4.8), porém com o comportamento inverso das curvas (Figura 4.7). As equações de regressão linear para a variável potência estão apresentadas na Tabela B.2, presente na página 111. Nota-se, como ocorre com a variável torque, um alto ajuste (R^2) das equações em todos os combustíveis (todos com $R^2 = 99\%$), o que garante segurança nas inferências.

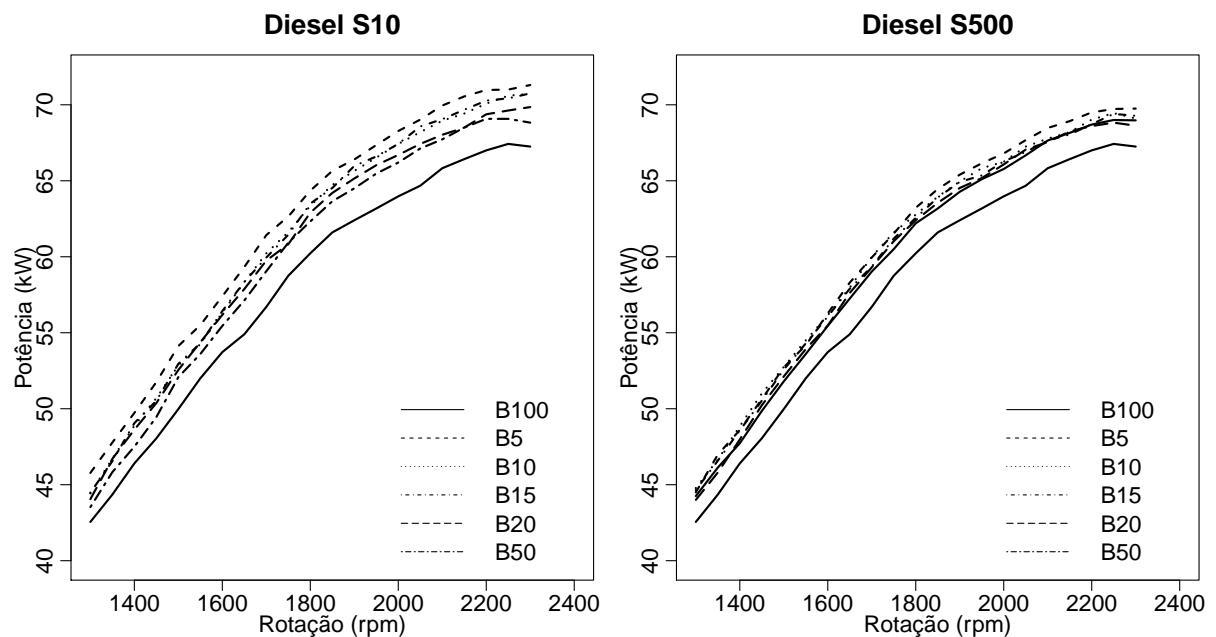


Figura 4.10: Potência do motor utilizando diferentes combustíveis.

A potência máxima foi alcançada, independente do combustível, nas rotações de 2250

ou 2300 rpm. O maior valor de potência máxima foi alcançado com o combustível C1 (S10 - B5), registrando 71,3 kW a 2300 rpm. O pior desempenho de potência foi alcançado com o C11 (B100) com 67,4 kW. A diferença absoluta da potência máxima com estes dois combustíveis foi de 3,9 kW ou 5,5%.

Da mesma forma que o torque, percebe-se uma menor diferença do comportamento da potência quando se aumenta a concentração de biodiesel no diesel S500. Também é possível observar um aumento da potência quando se utiliza o diesel S10 em comparação com o S500, nas concentrações de biodiesel B5 a B20 (Figura 4.10).

Entretanto, dos 11 combustíveis analisados, houve diferença significativa em 7 deles (Tabela 4.4). O combustível que gerou maior potência foi o combustível C1, seguidos do mesmo diesel mineral nas concentrações de biodiesel 10% e 15% (sem diferença estatística entre eles). Já os combustíveis que geraram menos potência foram o C11 (B100) isolado, acompanhados dos combustíveis com 50% de biodiesel.

McCarthy et al. (2011), trabalhando com dois tipos de biodiesel, tipo A - 80% de sebo (bovinos, suínos e ovinos) e 20% de éster metílico de óleo de canola e tipo B - 70% de sebo de frango e do éster metílico de 30% de resíduos de óleo de cozinha foram utilizados para a experimentação. Neste estudo concluiu-se que o desempenho de ambos os combustíveis de biodiesel reduz com o aumento da proporção de mistura, com uma diminuição do torque de 5%. Os autores atribuem esta redução ao menor conteúdo energético do biodiesel comparado ao diesel mineral.

Já o comportamento da potência máxima com adição de biodiesel na mistura de diesel pode ser visualizado na Figura 4.11. A adição de biodiesel no diesel S10 reduz mais a potência máxima quando comparado com o diesel S500 (Figura 4.11, observando o coeficiente angular menor no diesel S500).

Pela análise da Figura 4.11, para cada adição de 10% de biodiesel no combustível com 10 ppm de enxofre reduz a potência máxima em 0,4 kW. Já, com esta mesma adição, a potência máxima reduz no diesel S500 em 0,25 kW. Isto significa que o diesel com menor teor de enxofre sofre uma interferência maior quando se adiciona biodiesel nos parâmetros potência (Figura 4.11) e torque (Figura 4.9).

Outra análise permite concluir que a potência máxima com o B100 é de 5,5% menor que a potência máxima com B5. Maziero et al. (2006) encontraram redução de 10% na potência máxima quando trabalharam com biodiesel de girassol. Já Nietiedt et al. (2011b) relataram uma

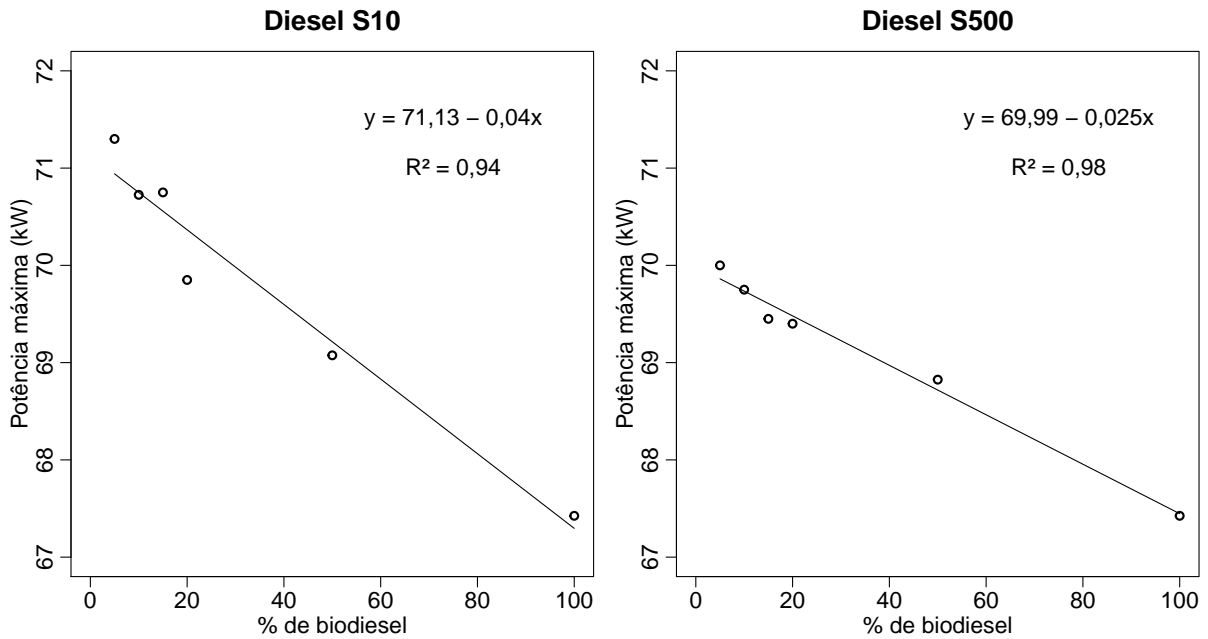


Figura 4.11: Comportamento da potência máxima em função da concentração de biodiesel.

redução de 2,9% com B100 em relação ao B5.

Buyukkaya (2010) trabalhando com óleo de canola puro (B100) comparando com diesel comercial B5 observaram um incremento na potência de 8,5% com B5. Fiorese et al. (2011) encontraram redução de 2,0% nestas mesmas misturas. Segundo os autores, isto se deve ao fato do menor poder calorífico do biodiesel.

4.2.1.3 Consumo horário

O consumo horário de combustível apresentou um comportamento normal (conforme o esperado) com maior consumo próximo da potência máxima (Figura 4.7). O ajuste das curvas de regressão linear apresentados na Figura 4.7 e suas equações, expostas na Tabela B.3 na página 112, apresentaram um elevado coeficiente de determinação (R^2), todos acima de 92%, porém abaixo dos R^2 do torque e potência.

O consumo horário variou, dentro da faixa de utilização de 23 L h^{-1} a 2250 rpm até $\sim 15 \text{ L h}^{-1}$ a 1350 rpm (Figura 4.12). As curvas de consumo horário, que são provenientes do fluxômetro, apresentam uma variabilidade, em cada ponto coletado (1300, 1350, ..., 2350) maior que as variáveis respostas torque e potência. Isto justifica em parte o menor ajuste das curvas de consumo horário (R^2 menor da Tabela B.3 comparado com os R^2 das Tabelas B.1 e B.2).

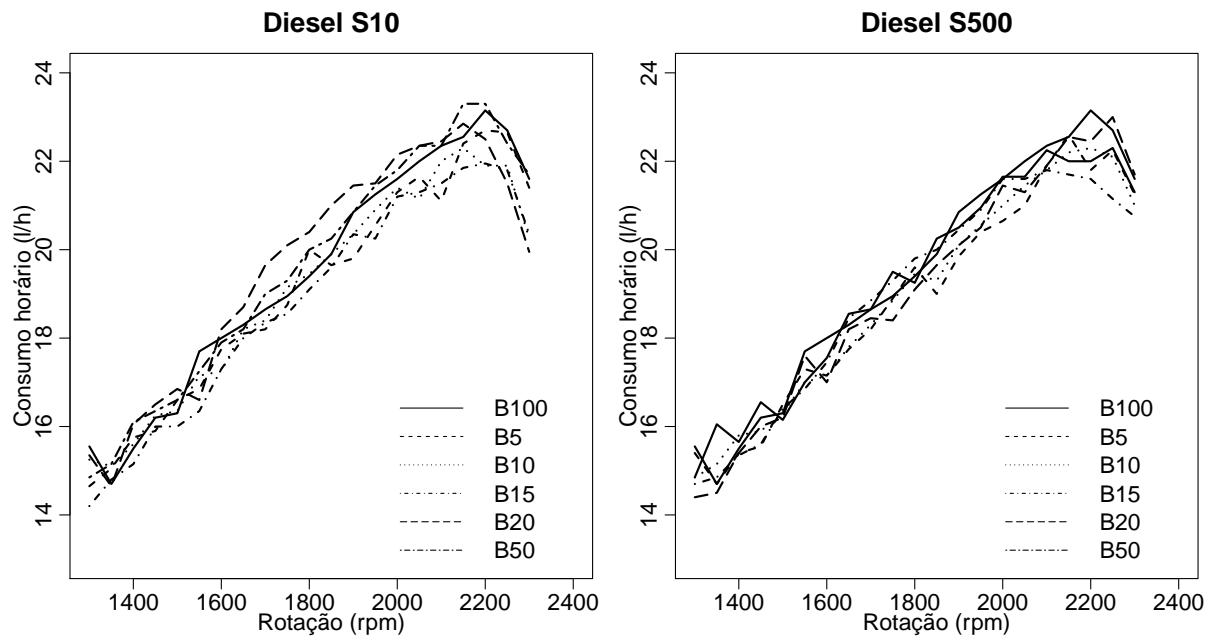


Figura 4.12: Consumo horário do motor utilizando diferentes combustíveis.

Entretanto, o consumo horário de combustível diferiu estatisticamente em apenas 2 grupos (Tabela 4.4), comparado com os 7 grupos da potência e 8 grupos do torque (Tabela 4.4, presente na página 60). Este maior agrupamento entre os combustíveis ou menor variação estatística é devido a maior variabilidade dos dados de origem e, é claro, pelo consumo horário semelhante independente do combustível.

Observando a Tabela 4.4, percebe-se que os combustíveis C4 (S10 - B20) e C5 (S10 - B50) foram o que apresentaram na média maior consumo horário, enquanto os demais combustíveis não apresentaram diferença significativa entre eles (letra “b”). O interessante deste comportamento é que não há alteração significativa no consumo de combustível independente do combustível mineral utilizado ou das porções de biodiesel nas suas misturas.

McCarthy *et al* (2011), trabalhando com dois tipos de biodiesel constataram um aumento de 7-10% do consumo de combustível. Soranso *et al* (2008) verificaram um aumento de 15,5% com B100 em relação ao B0. Já Reis *et al* (2013) houve aumento no consumo de combustível quando foi aumentada a concentração de biodiesel na mistura.

4.2.1.4 Consumo específico

Já para o consumo específico de combustível (C_e) o comportamento das linhas por pontos calculados, apresentados na Figura 4.13, teve uma maior variação entre os combustíveis do

que o consumo horário (Figura 4.12).

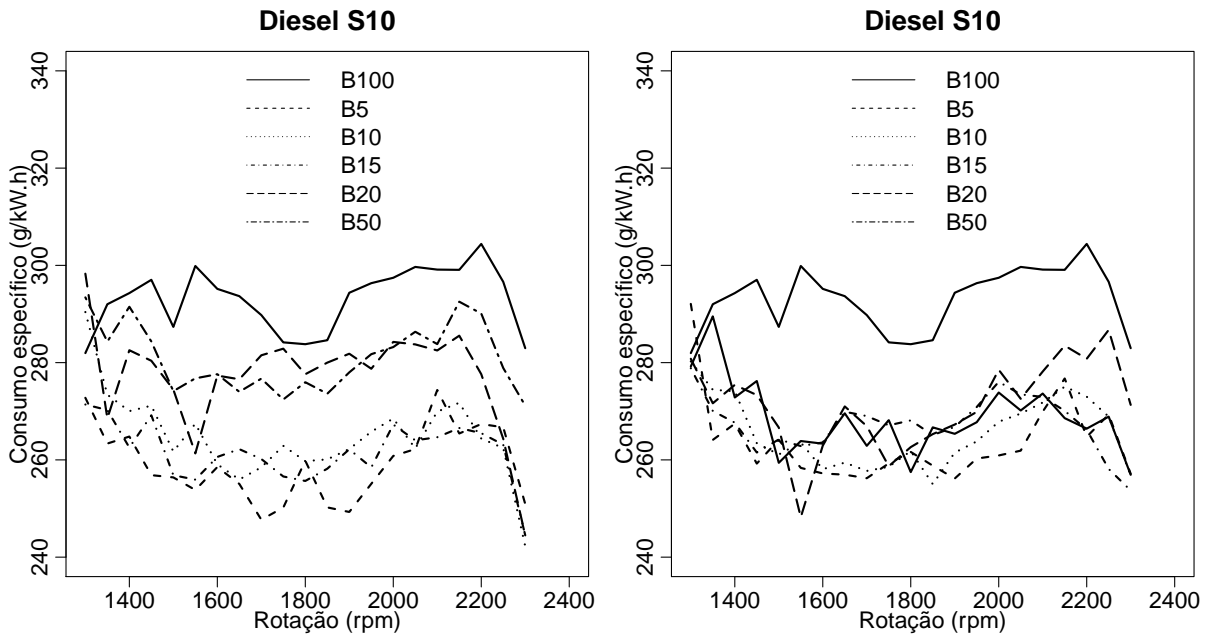


Figura 4.13: Consumo específico do motor utilizando diferentes combustíveis.

Da mesma forma, este comportamento pode ser observado pelas curvas de regressão linear, expostas na Figura 4.7. Observa-se que há transpasse das curvas, o que evidencia um comportamento mais difícil de ser explicado apenas por esta variável. Além disto, para o consumo específico, as curvas de regressão linear com polinômio de segunda ordem (dados não apresentados) explicam o comportamento dos dados, na média dos 11 combustíveis, em apenas 22%. Para realizar este cálculo foi utilizada a Equação (4.2). Devido a isto, foi realizado, para esta variável, modelos de regressão linear de terceira ordem¹⁰ (Tabela B.4), o qual explicou um comportamento dos dados, na média dos 11 combustíveis, em 60%. Mesmo assim, o ajuste das curvas de regressão para o C_e foi o pior das 4 variáveis respostas estudadas.

$$R^2_{\bar{x}} = \frac{\sum R^2}{11} \quad (4.2)$$

Contudo, o combustível C11 (B100) foi o que apresentou o maior consumo específico em todas as rotações (Figura 4.13 e Tabela 4.4). Baseado nisto, a conclusão que se pode tirar é a seguinte: como o consumo horário ficou praticamente estável, pois as misturas foram realizadas por volume e não por peso, ocorreu que o biodiesel puro gerou menos torque e menos potência para o mesmo consumo horário. Isto gera um gasto maior de combustível por unidade de

¹⁰ Com duas inflexões na curva, o que **não** é característico para o consumo específico, entretanto explicou melhor o comportamento destes dados, neste experimento.

potência gerada, portanto, um maior consumo específico.

Além disto, os combustíveis que tinham em suas misturas percentagens de 20%, 50% e 100% foram os que apresentaram maior consumo específico (Tabela 4.4), além do combustível S500 - B5. Os demais combustíveis não diferiram estatisticamente entre si (letra “g”, na Tabela 4.4) e tiveram o menor consumo específico. De maneira geral, quanto maior for a proporção de mistura de biodiesel no diesel mineral, maior é o consumo específico (Figura 4.14). Ocorreu um aumento de 17% no consumo específico mínimo quando se utilizou biodiesel puro em relação ao B5.

Maziero et al. (2006) encontraram um aumento de, em média, 22% no consumo específico quando trabalharam com biodiesel de girassol. Já, Godesa et al. (2010) encontraram aumento no consumo específico mínimo de 6,5% com o incremento de 50% de biodiesel. Nietiedt et al. (2011b) relataram aumento de 10,9% com B100 em relação ao B5. Özener et al. (2012) encontraram um aumento de até 9% no consumo específico mínimo com na mistura B50 em relação ao diesel mineral puro.

Buyukkaya et al. (2010) trabalhando com óleo de canola puro (B100) comparando com diesel comercial B5 observaram um aumento próximo a 11% no consumo específico mínimo quando utilizaram B100. Fiorese et al. (2011) aumento de 9,6% quando utilizaram B100 em relação ao B5. Segundo os autores, isto se deve ao fato do menor poder calorífico do biodiesel. Em trabalho de Gokalp et al. (2011), relataram aumento do consumo específico mínimo de 12% devido a utilização de biodiesel. Soranso et al. (2008) verificaram um aumento de 18% com B100 em relação ao B0. Em trabalho de Ozsezen et al. (2009) perceberam aumento de 9,5% quando foi aumentada a concentração de biodiesel na mistura. Todos estes trabalhos apontam para um aumento do consumo específico quando se aumenta a concentração de biodiesel na mistura.

A Figura 4.14 apresenta a equação de regressão linear para o consumo específico mínimo do motor utilizando diferentes proporções de biodiesel nos dois diferentes diesel mineral (S10 e S500). O consumo específico mínimo variou de 240 a 280 g kWh⁻¹, sendo que os menores valores de consumo específico ocorreram com concentrações baixas de biodiesel nas misturas (Figura 4.14).

Quando se utiliza o diesel com 10 ppm de enxofre (S10) com concentração de biodiesel na mistura menor que 20%, ocorre o menor consumo específico de todos os combustíveis e misturas analisados (de 242 a 247 g kWh⁻¹). Observando o coeficiente angular da Figura 4.14,

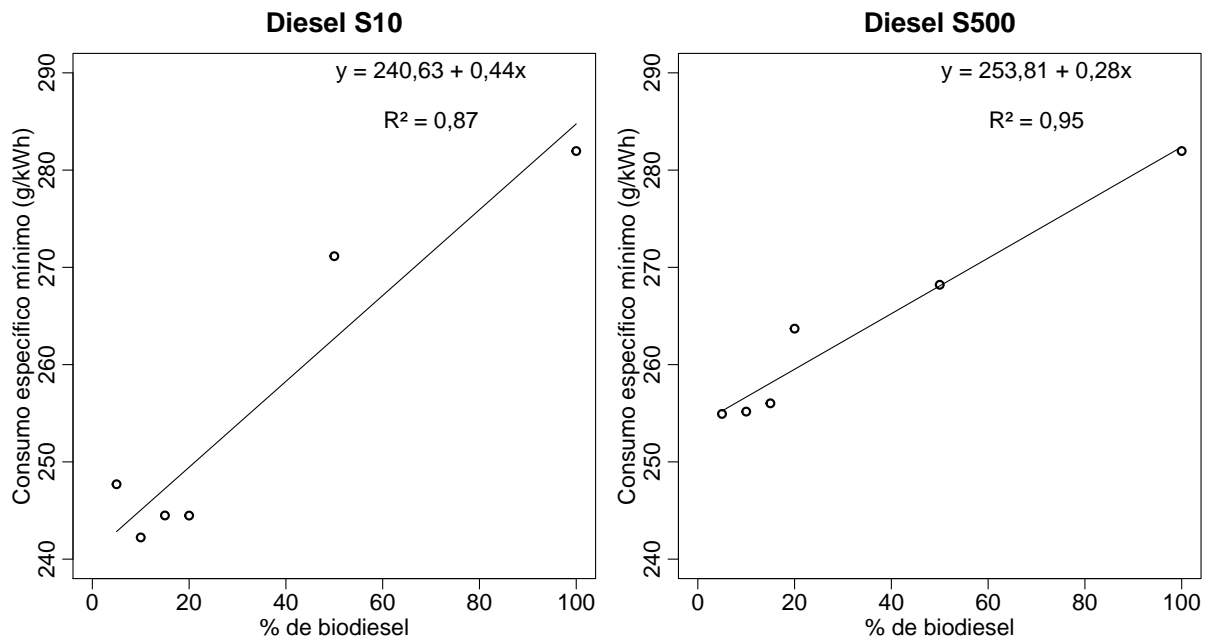


Figura 4.14: Comportamento do consumo específico mínimo em função da concentração de biodiesel.

permite concluir que a adição de 10% de biodiesel na mistura do diesel S10 resulta num aumento do consumo específico de $4,4 \text{ g kWh}^{-1}$ ($R^2 = 0,87$).

Para o diesel S500, o aumento de 10% de biodiesel na mistura com o diesel resulta num aumento menor do consumo específico, quando comparado com o diesel S10, de $2,8 \text{ g kWh}^{-1}$ ($R^2 = 0,95$) (observando o coeficiente angular da Figura 4.14).

Nas variáveis torque, potência e consumo específico, variáveis estas que foram realizadas as equações de regressão para suas medidas de desempenho, o diesel S500 sempre sofreu menos influência quando aumentou a concentração de biodiesel do que o diesel S10.

Isto pode ser explicado pelo fato do diesel S500, por possuir maior quantidade de enxofre e por ter menor grau de pureza do que o diesel S10, (portanto é um diesel mais bruto), sofre menos interferência de outros componentes (no caso o biodiesel).

No apêndice B, estão apresentadas as tabelas (Tabela B.1 na página 111, Tabela B.2 na página 111, Tabela B.3 na página 112 e Tabela B.4 na página 112) com as equações de regressão que geraram as curvas presentes na Figura 4.7 na página 58, juntamente com o coeficiente de determinação (R^2) ajustado.

4.3 Emissões do motor com diferentes combustíveis

A partir dos dados de desempenho do motor, passou-se a determinação das emissões e opacidade dos gases do motor. Os parâmetros de desempenho, torque máximo, rotação de torque máximo, torque nominal, rotação nominal e marcha lenta são imprescindíveis para se realizar o experimento de emissões, pois são nestes pontos em que os 8 modos de coleta das emissões ocorrem.

Para cada combustível foi calculada qual a rotação e o torque que o dinamômetro deveria ter para realizar cada um dos oito modos. A Figura 4.15 mostra o visor do dinamômetro que foi utilizado pelo operador deste equipamento para atingir os valores de rotação e torque de cada modo (Tabela 4.5), através do controle manual do dinamômetro.



Figura 4.15: Monitor do controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro.

Para exemplificar como foi realizado este controle no dinamômetro, foram confeccionadas tabelas (11 no total) como a Tabela 4.5. Esta Tabela 4.5 referente ao combustível C1 (S10B5), utilizou os seguintes valores, provenientes do ensaio de desempenho: Torque máximo = 332 Nm; rotação de torque máximo = 1700 rpm; torque nominal = 284 Nm e; rotação de torque nominal = 2300 rpm. A relação de transmissão entre o motor e a TDP é de 3,796.

No modo 1, o operador do dinamômetro verificava a rotação de 606 rpm e iniciava manualmente a frenagem do motor pelo dinamômetro até atingir 1078 Nm. Neste momento começava a coleta dos valores de emissão, durante o período de 120 segundos. Após a coleta destes dados, o operador do dinamômetro diminuía a carga para 809 Nm, que corresponde ao modo 2, sendo que se iniciava outro ciclo de coleta de 120 segundos, e assim sucessivamente até os oito modos de operação serem finalizados. As outras tabelas que foram utilizadas para o controle do dinamômetro estão apresentadas no Apêndice C.

Tabela 4.5: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o combustível C1.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação (rpm) ⁶	Torque (Nm) ⁷
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
M1	100	2300 ¹	284 ³	606	1078
M2	75	2300	213 ⁴	606	809
M3	50	2300	142	606	539
M4	10	2300	28	606	108
M5	100	1700 ²	332 ⁵	448	1260
M6	75	1700	249	448	945
M7	50	1700	166	448	630
M8	-	900	-	237	-

¹Rotação de potência máxima. ²Rotação de torque máximo. ³Torque máximo do motor, obtido no ponto máximo da curva de torque, no ensaio de desempenho. ⁴75% do torque máximo do motor. ⁵Torque nominal do motor, obtido no ponto de potência máxima da curva de torque, no ensaio de desempenho. ⁶Rotação da TDP = rotação do motor dividido pela relação de transmissão entre o motor e a TDP = 3,796. ⁷Torque da TDP = torque do motor multiplicado pela relação de transmissão entre o motor e a TDP = 3,796.

Neste experimento foram coletadas as condições de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica e estão apresentadas na Figura 4.16.

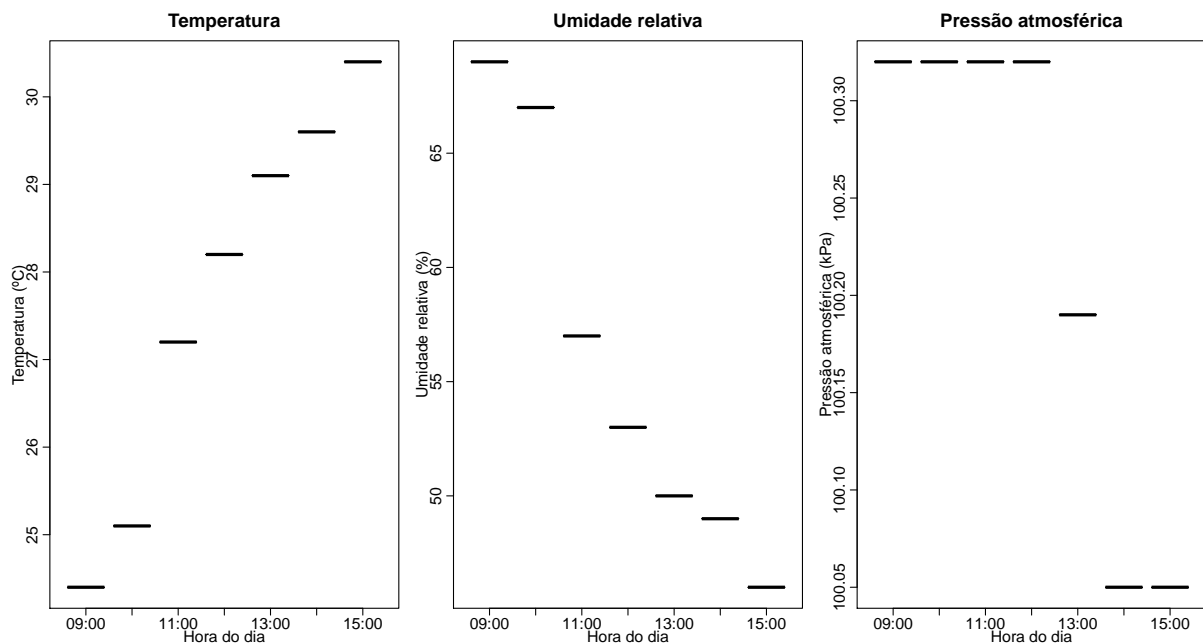


Figura 4.16: Variação dos parâmetros atmosféricos durante o experimento de emissões.

A temperatura durante o ensaio de desempenho aumentou de 24,5°C para 30,5°C. Na proporção inversa (correlação negativa de 99% com a temperatura) a umidade relativa do ar diminuiu de 69% para 46%, o que significa que a quantidade de água na atmosfera permaneceu quase constante. Já a pressão atmosférica permaneceu praticamente inalterada (variou de 100,33

para 100,05 kPa) e apresentou uma correlação negativa de 81% com a temperatura (Figura 4.16).

Para apresentar os resultados de emissões, a sequência será os níveis de oxigênio, dióxido de carbono e opacidade, expressas em percentual, e monóxido e dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e hidrocarbonetos, em ppm. Serão utilizados quatro gráficos para cada variável resposta analisada. O primeiro é relativo a distribuição estatística dos dados coletados; o segundo apresenta as emissões em função dos combustíveis e dos modos de operação; o terceiro apresenta a regressão linear do comportamento das emissões em função do tipo de diesel mineral e do incremento de biodiesel na sua mistura e; o quarto a regressão linear do comportamento das emissões em função do modo de operação.

4.3.1 Oxigênio (O₂)

Os teores de oxigênio nos gases de escape, em função do tipo de combustível e de modo de operação estão apresentados na Figura 4.17 e na Figura 4.18. A Figura 4.17 mostra os resíduos padronizados dos ~ 3500 valores observados (Figura 4.17a), um histograma representando a frequência de cada valor observado de emissão de O₂ (Figura 4.17b), os níveis de emissão de O₂ em função dos tipos de combustíveis (Figura 4.17c) e, os níveis de emissão de O₂ em função dos modos de operação (Figura 4.17d), enquanto que a Figura 4.18 nos mostra o comportamento dos teores de oxigênio em função do tipo de combustível e do modo de operação.

A distribuição estatística das emissões de O₂ apresentadas na Figura 4.17 mostra que os resíduos de todas as observações permaneceram entre ± 3 desvios padrão (DP) da média (considerando a média zero). Já a frequência maior foi de 600 observações entre 10 e 11% de O₂ emitido. Entretanto, as emissões variaram de 8,0% (provavelmente no modo de operação 5) a 20% (em marcha lenta) ¹¹.

Pode-se observar, pela dispersão dos dados pelos *boxplot*, que a influência na alteração dos teores de O₂ é maior pelo modo de operação (Figura 4.17d) do que em relação aos combustíveis avaliados (Figura 4.17c). Comportamento semelhante ocorre para todas as outras seis variáveis respostas de emissões analisadas.

¹¹ A concentração de O₂ atmosférico é de ~ 21%, o que é o limite superior inatingível do motor em funcionamento. Além disso, o ar seco contém, em volume, cerca de 78,09% de nitrogênio, 0,93% de argônio, 0,039% de dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases.

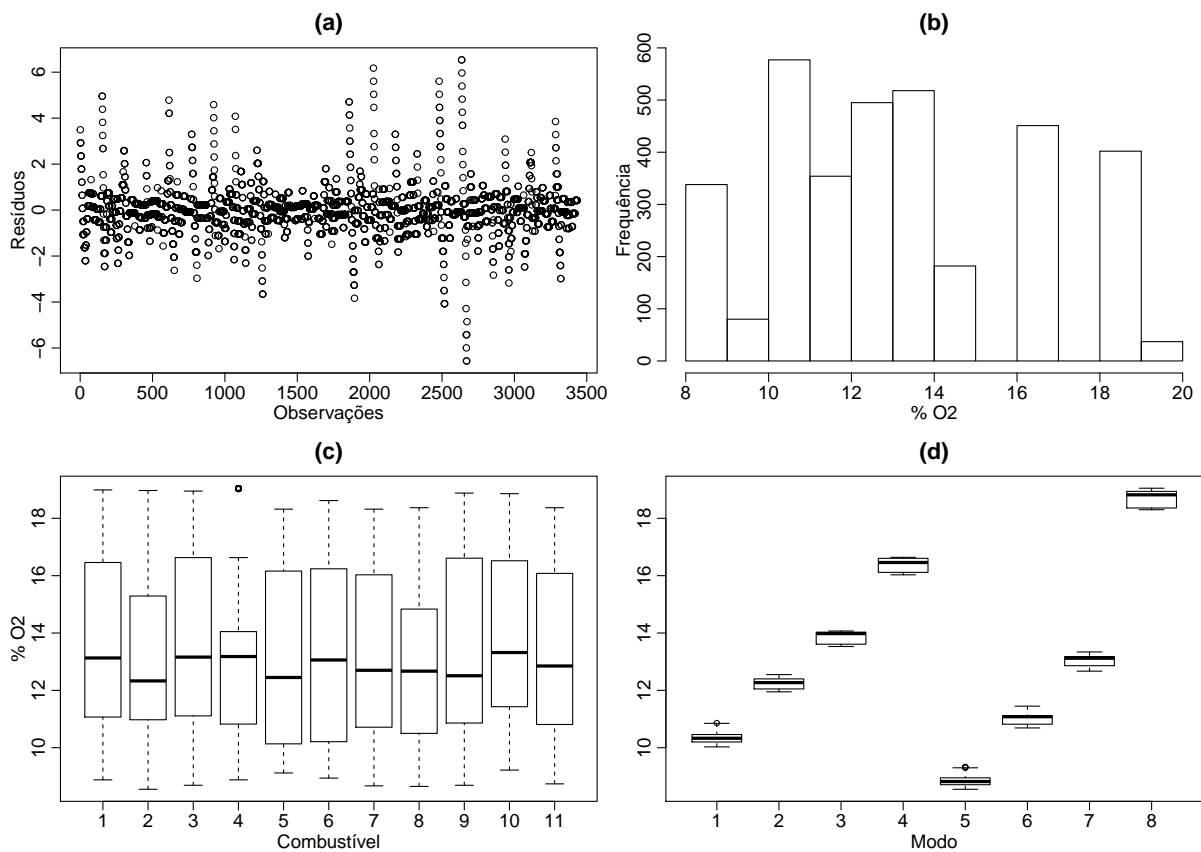


Figura 4.17: Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de O₂ em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).

Este fato pode ser melhor observado na Figura 4.18, onde a diferença entre um modo de operação e outro é maior do que o mesmo modo com diferentes combustíveis. A Figura 4.18 também mostra a média de cada combustível pela linha tracejada e serve para identificar quais combustíveis geraram valores maiores ou menores que a média destes combustíveis. Os modos de operação estão representados pelos diferentes pictogramas enquanto que os combustíveis são as diferentes colunas do mesmo pictograma.

Pela análise da variância, tanto os combustíveis como os modos de operação apresentaram diferença significativa. Estes resultados e de todas as variáveis respostas estão apresentadas no apêndice D. Para a variável O₂ todos os modos diferiram significativamente entre si, sendo que o modo 5 foi o que apresentou menor nível de emissão de O₂ (8%) enquanto que o modo 8 foi o que apresentou maior nível (18%) (Figuras 4.17, 4.18 e 4.20), independente do tipo de combustível. Já os todos os combustíveis diferiram entre si sendo que o C10 foi o que apresentou maior nível e o C8 o menor nível de emissão (média de todas as observações) e independente do modo de operação.

Para compreender melhor o comportamento das emissões em função do tipo de diesel

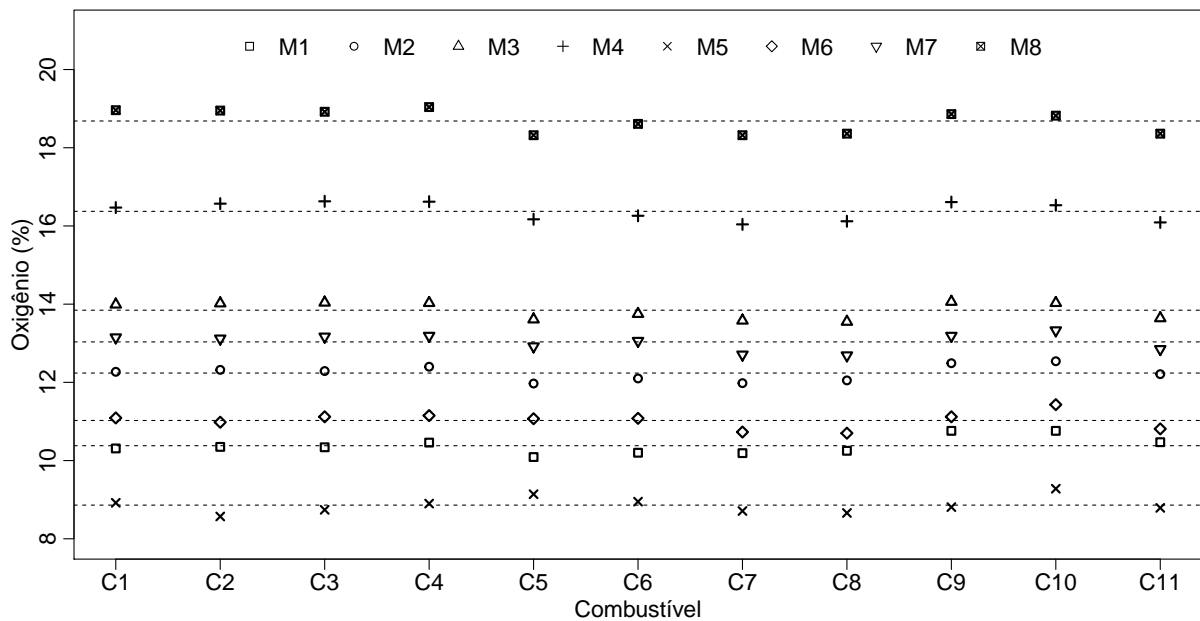


Figura 4.18: Variação do teor (%) de oxigênio nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.

mineral e da adição de biodiesel na mistura, foi realizado a análise de regressão linear relacionando o nível de emissão de O_2 em função do combustível, independente do modo de operação, e este comportamento está apresentado na Figura 4.19.

Os níveis de O_2 emitido permaneceram quase que constantes, sendo que a variação foi de 0,01% para o diesel S10 e 0,03% para o diesel S500 com a adição de 10% de biodiesel na mistura. Mesmo assim, o diesel S500 apresentou maior emissão de O_2 com o incremento de biodiesel (Figura 4.19). Isto pode ser ao fato que o diesel S10 possui menos impurezas que o diesel S500, e como o biodiesel é uma substância mais pura, altera com maior intensidade o diesel S500. Pode-se incluir ainda o fato que a quantidade de oxigênio no biodiesel é de cerca de 10-12% (dependendo do tipo de óleo vegetal extraído), e no combustível diesel de origem mineral a concentração de O_2 é nula (BOLDAJI et al., 2011).

Outra análise que pode ser feita, observando a Figura 4.19 é que houve um incremento de 2,4% na emissão de O_2 com B100 em relação ao B5.

Já o comportamento da emissão de O_2 em função do modo de operação está apresentado na Figura 4.20. Neste caso, o tipo de combustível foi desconsiderado, já que foi realizada uma média das emissões em cada modo de operação.

O ordenamento dos modos de operação foi o seguinte: 5, 1, 6, 2, 7, 3, 4 e 8. O critério para este ordenamento foi a intensidade da carga aplicada (100%, 75%, 50%, 10% e sem carga) e a quantidade de ar admitido (menor para maior). Este ordenamento dos modos de operação

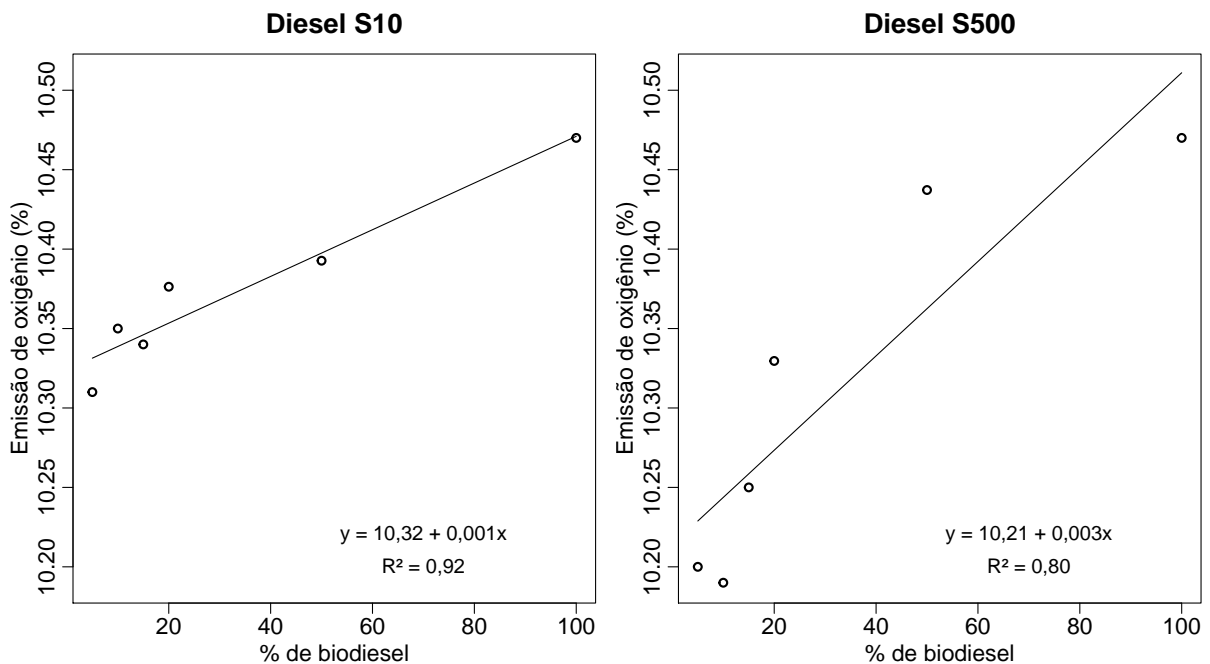


Figura 4.19: Comportamento das emissões de oxigênio em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.

satisfez o incremento ou redução dos níveis de emissão das sete variáveis respostas analisadas. No caso das emissões de O_2 , o coeficiente de determinação R^2 foi de 95%, seguindo esta sequência de modos de operação.

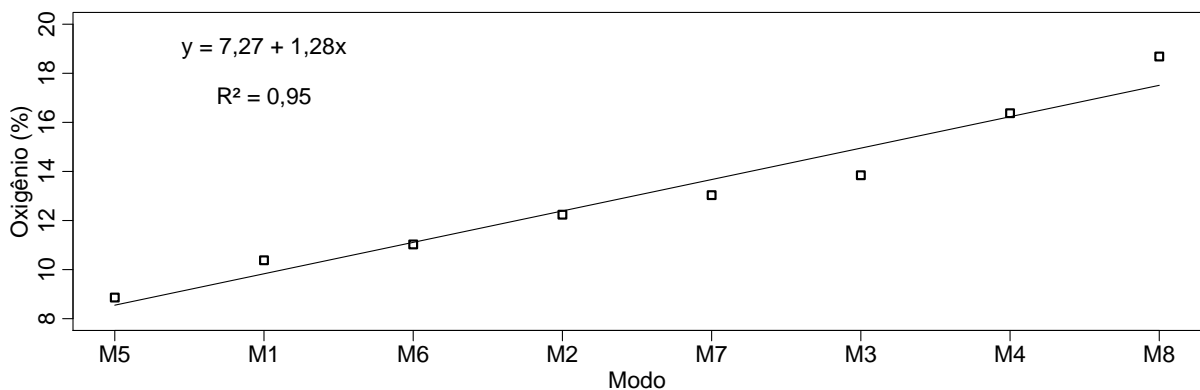


Figura 4.20: Comportamento das emissões de oxigênio em função do modo de operação.

Pela Figura 4.20, conclui-se que quanto maior a carga aplicada no motor e menor a admissão de ar pela menor rotação, menor a emissão de O_2 , devido ao fato de que a maior parte do O_2 admitido ($\sim 21\%$ do ar) é utilizado para a queima do combustível. No modo de operação 5, $\sim 40\%$ do O_2 sobra do processo de combustão, enquanto que no modo 8, apenas 15% do O_2 é utilizado neste processo.

Conclui com isto, que o modo de operação é responsável pela variação de 45% das emissões de O_2 (Figura 4.20), enquanto que o tipo de combustível é responsável por 2% (Figura

4.19) da variação apenas.

4.3.1.1 Emissão de O₂ considerando a potência gerada

Uma análise complementar pode ser realizada considerando o consumo de O₂ e a potência gerada. Na média (μ) de todos os combustíveis utilizados, a potência máxima foi de 69,5 kW na rotação de 2250 rpm e na rotação de torque máximo ($\mu = 1675$ rpm) a potência gerada foi de 59,0 kW. Estes dados foram utilizados para os modos de operação para os ensaios de emissões. Para exemplificar, faremos uma análise dos modos de operação 1 (na rotação de potência máxima (nPm)) e 5 (na rotação do torque máximo (nMm)). Podemos calcular a quantidade máxima de ar admitido pelo motor em cada uma destas rotações, através da Equação (4.3).

$$V_{aa} = Ct \times \frac{n}{2} \quad (4.3)$$

Onde, V_{aa} é o volume de ar admitido, Ct é a cilindrada total do motor (neste caso 4400 cm³) e n é a rotação do motor. A rotação é dividida por 2 devido ao fato que são necessárias duas voltas do virabrequim para uma admissão de ar pelo motor.

Pela Equação (4.3), o máximo de ar admitido na nPm foi de 4,95 m³min⁻¹, enquanto que na nMm foi de 3,68 m³min⁻¹. Considerando que a concentração de O₂ neste ar é de 21%, há na nPm 1,04 m³min⁻¹ de O₂ e na nMm 0,77 m³min⁻¹ de O₂.

O modo de operação 1 emite 10,3% de O₂, o que corresponde a 49% de todo o O₂ presente no ar admitido. Logo, o M1 consome 51% de O₂ que totaliza 0,53 m³min⁻¹ de O₂ (1,04 m³min⁻¹ de O₂ × 0,51).

Já, o modo de operação 5 emite 8,8% de O₂, o que corresponde a 42% de todo o O₂ presente no ar admitido. Logo, o M5 consome 58% de O₂ que totaliza 0,45 m³min⁻¹ de O₂ (0,77 m³min⁻¹ de O₂ × 0,58). Isto significa que o modo 5 consome menor quantidade (0,45 m³min⁻¹) de O₂ que o modo 1 (0,53 m³min⁻¹).

Todavia, se considerarmos a potência gerada em cada um dos modos (69,5 kW no M1 e 59,0 kW no M5), ambos consomem exatamente a mesma quantidade de O₂ por potência gerada = 7,6 Lmin⁻¹kW⁻¹. Isto pode demonstrar a eficiência do processo de combustão nesta diferentes rotações, o que é desejável.

4.3.2 Dióxido de carbono (CO₂)

Para as emissões de CO₂, o comportamento foi praticamente o oposto dos níveis de O₂, com correlação linear de - 97%. O CO₂ emitido pela combustão é a união do O₂ atmosférico e do carbono presente no combustível, além de um percentual pequeno de CO₂ atmosférico ($\sim 0,04\%$). Portanto, os níveis de CO₂ não poderão ser maiores que 21% (limite este que corresponde ao percentual de O₂ atmosférico). Além da ligação com o carbono formando CO₂, o O₂ liga-se com o nitrogênio formando NO_x e com o próprio carbono formando CO, porém em menores quantidades (ppm).

Devido a isto, a quantidade de CO₂ emitida por todos os combustíveis e modos de operação variaram de $\sim 1\%$ a $\sim 9\%$ (Figura 4.21b). A distribuição dos dados se manteve próxima da média (Figura 4.21a) e com maior frequência ao redor de ± 2 desvios padrão.

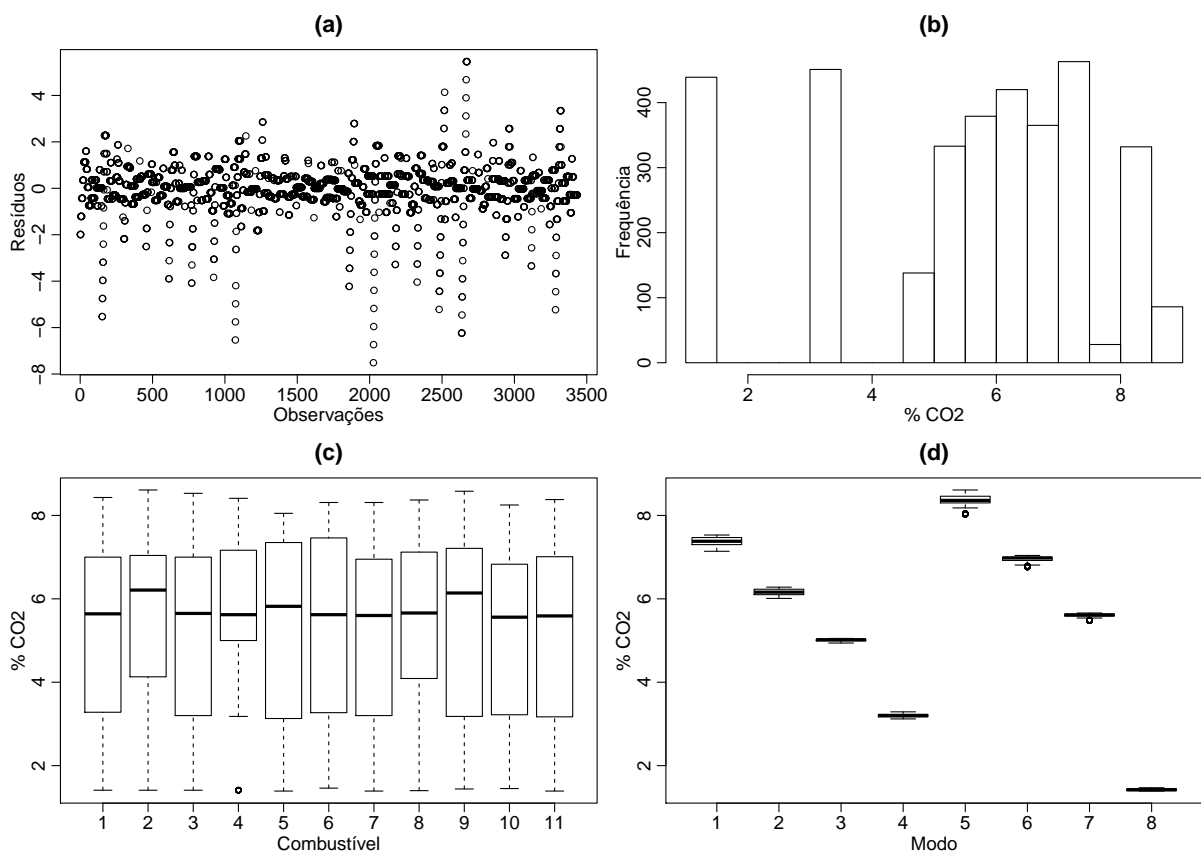


Figura 4.21: Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de CO₂ em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).

De forma antagônica ao O₂, o modo que mais liberou CO₂ (Figura 4.21d) foi o M5 e o que liberou menos foi o M8. O comportamento da emissão de CO₂ em função do modo de

operação e do tipo de combustível está apresentado na Figura 4.22.

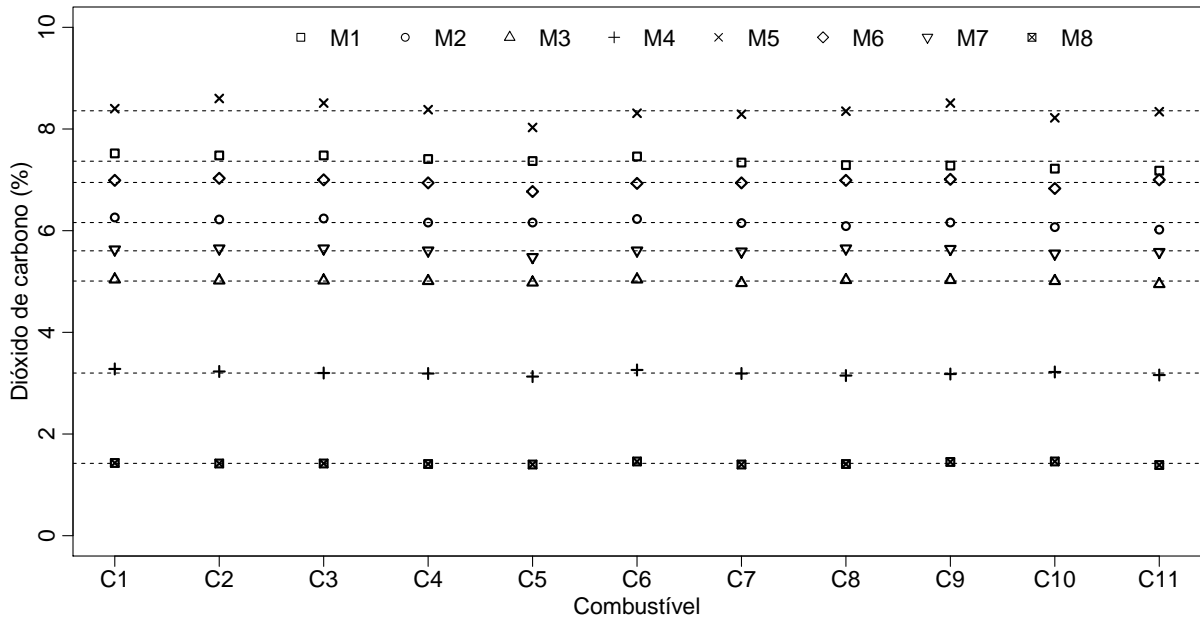


Figura 4.22: Variação do teor (%) de dióxido de carbono nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.

De igual forma, o modo de operação teve maior influência do que os tipos de combustíveis (Figura 4.22). Entretanto, o combustível que mais emitiu CO_2 foi o C2 (S10B10), seguido do C1 (S10B5) e C3 (S10b15) que não diferiram estatisticamente entre si (\doteq). Os que menos emitiram foram o C10 (S500B50), o C11 (B100) e o C5 (S10B50). Quase todos os combustíveis diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Já o modo de operação que mais liberou CO_2 foi o M5, seguidos dos modos 1, 6, 2, 7, 3, 4 e 8. Todos estes modos diferiram entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. De forma análoga ao O_2 , quanto maior a carga aplicada e menor a admissão de ar, maior é a emissão de CO_2 .

A variação do teor de CO_2 emitido em função do aumento da concentração de biodiesel na mistura está presente na Figura 4.23.

É possível observar na Figura 4.23 que conforme aumenta o teor de biodiesel na mistura, diminui a emissão de CO_2 . Isto ocorre de maneira semelhante com os dois tipos de diesel mineral. Entretanto, no diesel S10 há uma maior redução (0,03% para o incremento de 10% de biodiesel com R^2 de 97%). Pode-se observar também que o modelo utilizado explica melhor o comportamento dos dados no diesel S10 do que no S500 (Figura 4.23), da mesma forma que aconteceu com o O_2 (Figura 4.19). Comparando apenas biodiesel puro com o diesel mineral B5, houve uma redução na ordem de 4,5%, resultado este que vem de encontro ao relatado por

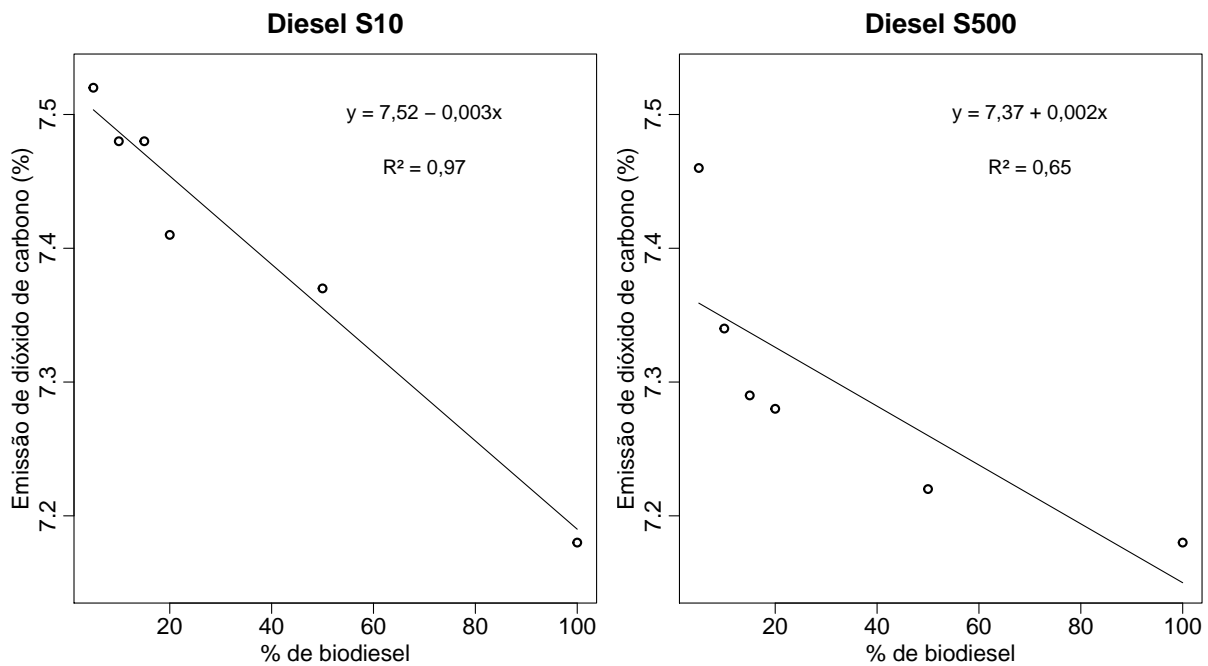


Figura 4.23: Comportamento das emissões de dióxido de carbono em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.

Maziero et al. (2006), onde houve uma redução de 4,8% nos níveis de emissão de CO₂ quando trabalharam com biodiesel de girassol. Em trabalho de Ozsezen et al. (2009) perceberam redução de 7% nas emissões de CO₂ quando foi aumentada a concentração de biodiesel na mistura.

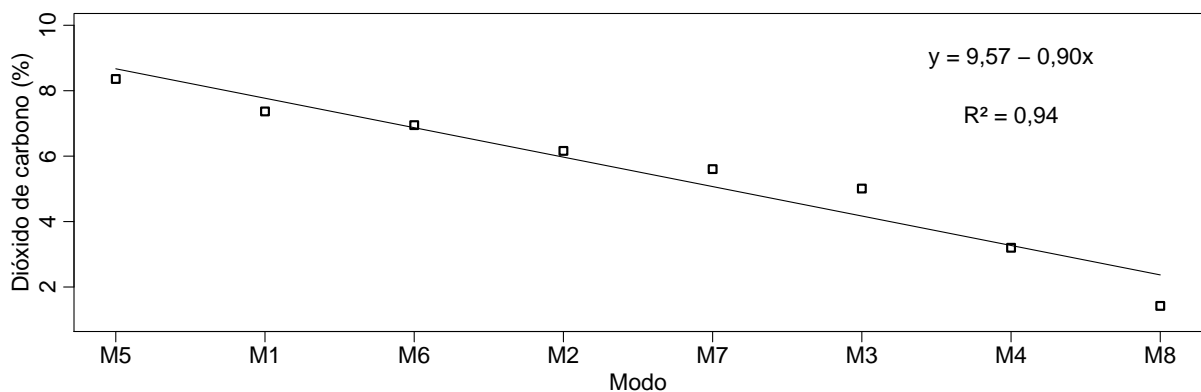


Figura 4.24: Comportamento das emissões de dióxido de carbono em função do modo de operação.

Já McCarthy et al. (2011), trabalhando com dois tipos de biodiesel em comparação com o diesel mineral constataram um aumento de 6% com o biodiesel A e um aumento de 18% com o biodiesel B. Segundo os autores, este aumento de CO₂ é esperado, já que o decréscimo das emissões de monóxido de carbono geralmente coincide com um aumento das emissões de CO₂. Resultado semelhante encontraram Özener et al. (2012), sendo um aumento de 17%

nas emissões de CO₂ na mistura B50 em relação ao diesel mineral puro. Em contrapartida, o trabalho de Valente et al. (2012) encontram aumento de 8,5% de CO₂ quando trabalharam com 50% de biodiesel de óleo de fritura no diesel mineral.

Entretanto, a redução da emissão de CO₂ foi de 0,35% (valor absoluto) considerando a variação de 5% a 100% de biodiesel, o que representa uma menor participação na variação da emissão do que os modos de operação (Figura 4.24).

Se considerarmos o valor relativo a redução foi de 4,6% com B100 em relação ao B5, resultado este que difere do encontrado por Canakci et al. (2003), onde observaram um aumento nos níveis de emissão de CO₂ quando trabalharam com biodiesel de soja (de 1,8%) e gordura animal (1,2%).

Dependendo do modo de operação, as emissões de CO₂ podem ser maiores que 8% a menores que 2% (Figura 4.24). Quanto maior for a carga e menor a rotação, maior são as emissões de CO₂.

Observando a amplitude das emissões de CO₂ pelos combustíveis (Figura 4.23) foi de 0,35% e, pelos modos de operação (Figura 4.24) foi de 6%. Isto representa ~ 17 vezes a mais a influência do modo de operação do que do tipo de combustível, para esta variável analisada.

4.3.3 Opacidade (K)

O índice de opacidade é indicativo da qualidade da combustão. Pode-se dizer que quanto maior for a potência gerada aliada ao menor valor de opacidade, melhor é a qualidade da combustão.

A homogeneidade dos valores de opacidade obtidos no experimento foi de ± 5 DP da média, com alguns pontos extremos (Figura 4.25a). Já os valores de opacidade ficaram distribuídos com maior frequência entre 7% a 20%, seguindo basicamente uma distribuição normal assimétrica a direita, com valores chegando até 50% (Figura 4.25b). Os valores acima de 20% de opacidade somente ocorreram no modo de operação 5 (Figura 4.25d). Todos os *outliers* da (Figura 4.25c) foi devido ao modo de operação 5, com excessão do combustível 11.

De igual forma, o modo de operação teve maior influência do que os tipos de combustíveis (Figura 4.26). Entretanto, o combustível que mais emitiu opacidade foi o C10 (S500B50), seguido do C6 (S500B5) e C9 (S500B20) que \doteq . Estes três combustíveis que mais emitiram

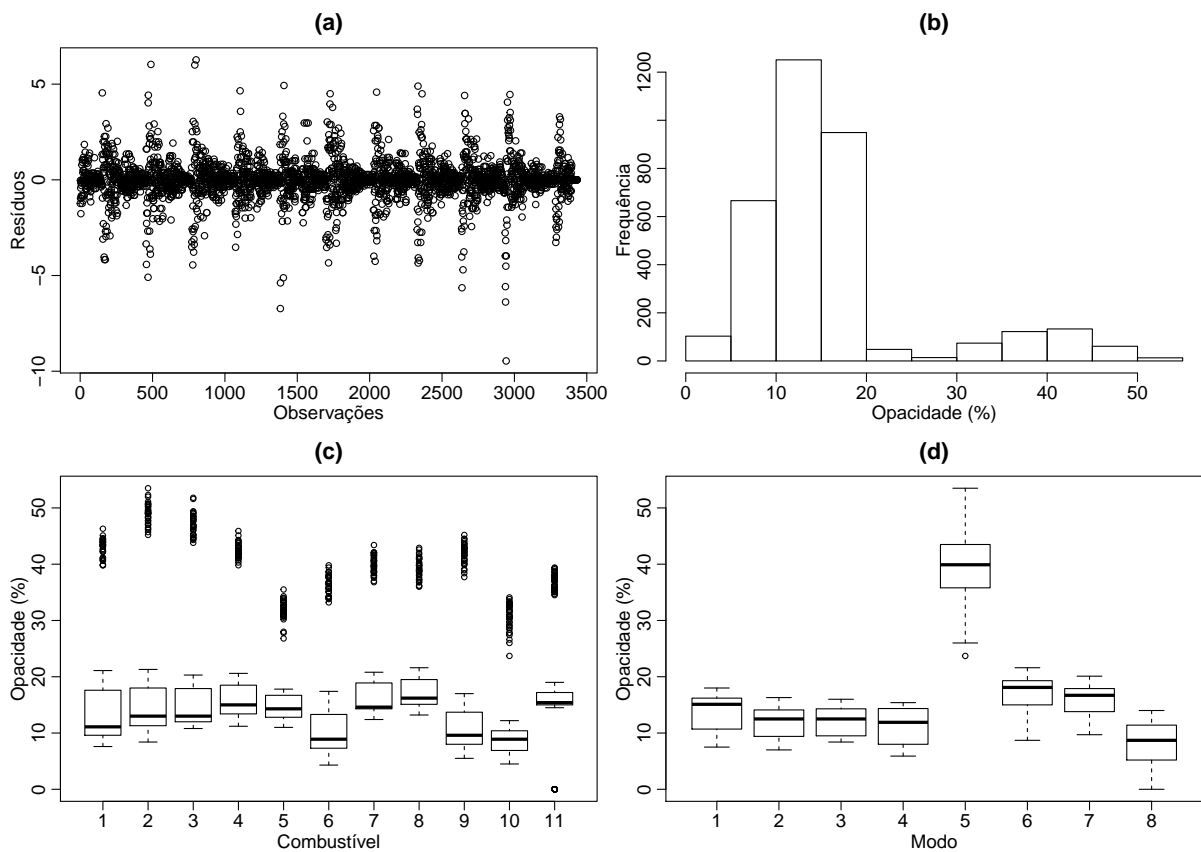


Figura 4.25: Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de opacidade em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).

utilizam o combustível mineral com maior teor de enxofre (S500). Os que menos emitiu foram o C1, C2, e C8 e o C5 que \div , e em segundo lugar, os combustíveis C11, C3, C4 e C7, \div . Percebe-se que quanto maior for a concentração de biodiesel na mistura, menor é a emissão de opacidade, e também que o diesel S10 possui valores menores de opacidade comparado com o S500.

Já o modo de operação em que a fumaça liberada foi mais escura foi o 5 (Figura 4.26). Neste modo de operação, os valores de opacidade ficaram na média de 40%, enquanto que o segundo modo com mais opacidade dos gases (M2) apresentou valores de opacidade próximos de 17%. Este comportamento gerou um aumento da escala do eixo y da Figura 4.26, dificultando a diferenciação dos modos de operação e de suas média (linhas tracejadas). Entretanto, optou-se por manter esta escala justamente para mostrar esta maior opacidade dos gases no M5. Fato semelhante também ocorreu com as emissões de CO (Figura 4.38 na página 93) e com as emissões de HC (Figura 4.42 na página 97).

A opacidade dos gases no modo de operação 5 apresentou uma considerável diferença dos outros modos de operação, fato este só apresentado pelos índices de emissão do monóxido

de carbono (Figura 4.38). Pode-se identificar também que neste modo de operação a influência dos tipos de combustíveis foi mais significativa para a alteração nos níveis de opacidade do que em outros modos (Figura 4.26).

Os modos 8, 7 e 6 foram o que apresentaram menos opacidade quando do seu funcionamento. Todos estes modos diferiram entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Semelhante com o que ocorreu com o CO₂, quanto maior a carga aplicada e menor a admissão de ar, maior é opacidade dos gases de escape.

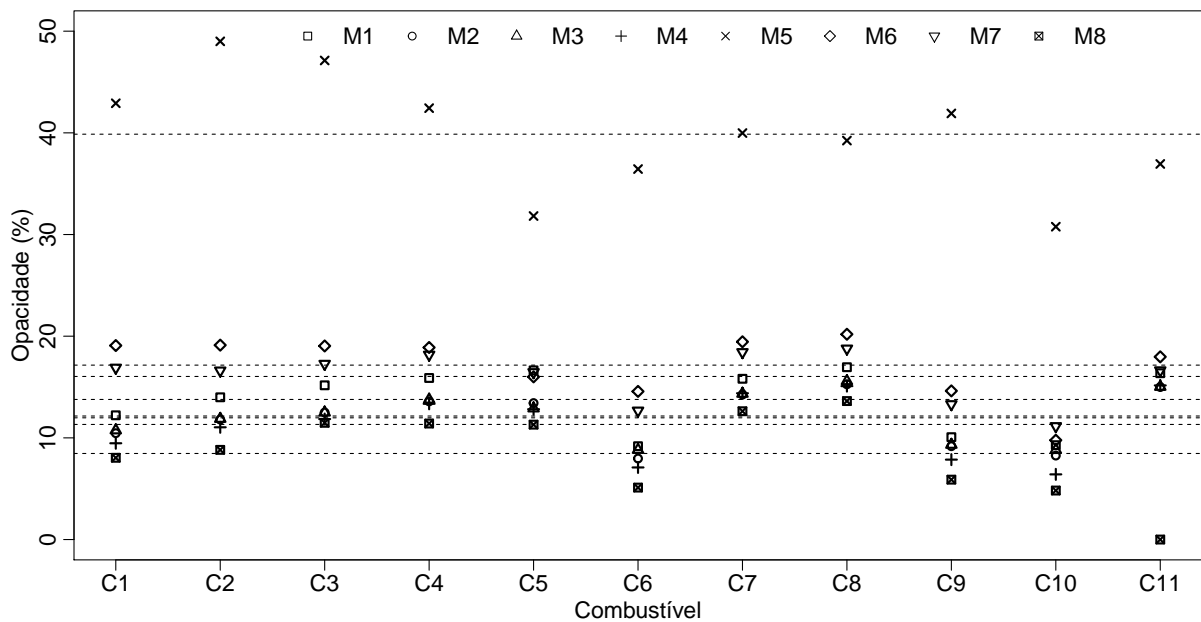


Figura 4.26: Variação da opacidade (%) dos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.

A variação da opacidade emitida em função do aumento da concentração de biodiesel na mistura está presente na Figura 4.27.

O comportamento da opacidade em função do tipo de combustível não se ajustou a uma equação linear simples com um bom coeficiente de determinação. Em virtude disto foi ajustado, tanto para do diesel S10 como para o S500 uma equação de 2º grau (Figura 4.27). Mesmo assim, o coeficiente de determinação foi na ordem de 83% para o S10 e 48% para o S500.

Neste ponto há um resultado importante. Em todas as variáveis respostas das emissões, o coeficiente de determinação foi menor para o S500 do que para o S10. Este menor ajuste para o S500 pode ser pelo fato de que este combustível é mais impuro e seu comportamento é mais facilmente influenciado pela adição de biodiesel.

Percebe-se que as emissões se comportaram de maneira diferente conforme o tipo de diesel mineral. Com o diesel S10, a menor opacidade dos gases ocorreu com a mistura comercial

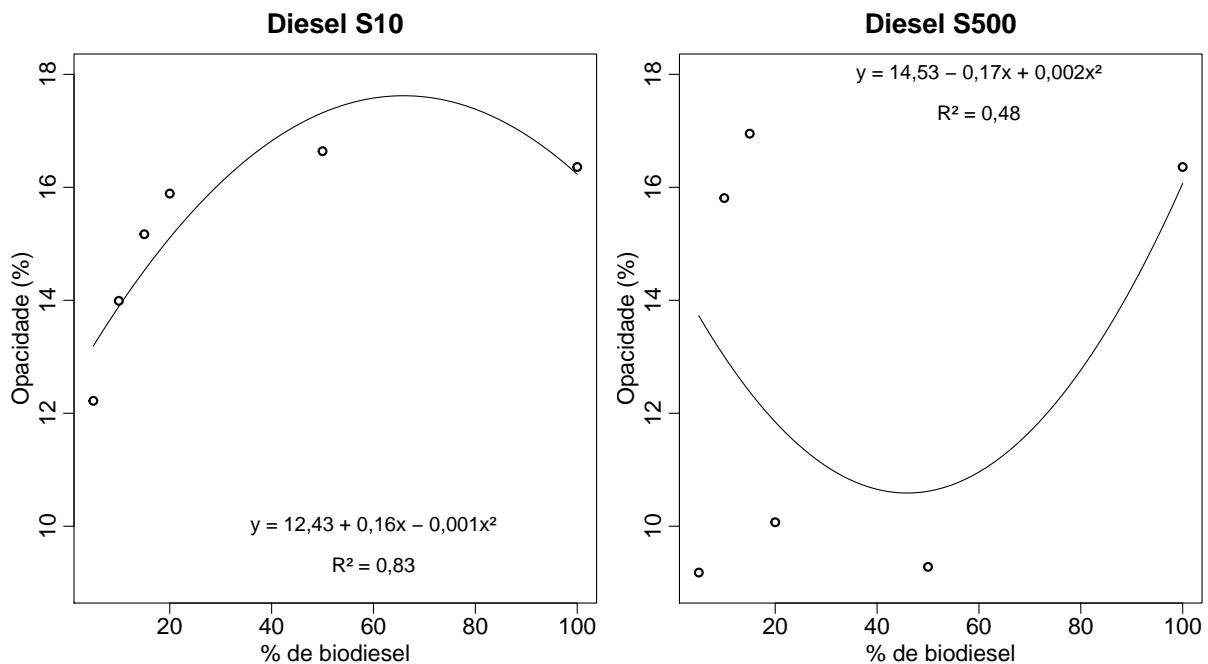


Figura 4.27: Comportamento da opacidade dos gases de escape em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.

atual (B5) (12,2%) enquanto que a maior opacidade foi com o B50 (16,4%). Isto representa uma diferença absoluta de 4,2%, ou um aumento de 34,4% na opacidade quando se utiliza uma mistura de 50% diesel S10/ biodiesel. Já, quando o diesel utilizado foi o S500, as menores opacidade dos gases de escape ocorreram com o B50 e as maiores com o B15. Estas características diferentes podem ser explicadas pelo fato que o diesel S10 é mais puro e a adição de biodiesel pode ter gerado uma emissão de material particulado maior. Todavia, o diesel S500 possui mais poluentes em sua constituição, comparado com o S10, e a adição de biodiesel pode diminuir esta opacidade. Resultados diferentes foram encontrados por Maziero *et al* (2006), onde houve uma redução de 41% nos níveis de emissão de material particulado quando trabalharam com biodiesel de girassol.

Igualmente, Prabhakar e Annamalai (2011), relataram que houve redução da opacidade com B100 na ordem de 20%, e em trabalho de Ozsezen *et al.* (2009) perceberam redução de 58% na opacidade quando foi aumentada a concentração de biodiesel na mistura. Raheman e Phadatare (2004) trabalhando com motor de um cilindro, encontraram redução nos níveis de opacidade dos gases de 50% quando trabalharam com B100 em relação ao B20.

Buyukkaya *et al.* (2010) trabalhando com óleo de canola puro (B100) comparando com diesel comercial B5 observaram uma redução superior a 60% na opacidade quando utilizaram B100. Já, para Gokalp *et al.* (2011), encontraram uma redução de 74%. Moser *et al.* (2009)

relataram redução de 25% nos níveis de emissão de material particulado quando utilizaram 20% de biodiesel em diesel mineral com baixo teor de enxofre. Em outro trabalho os autores relatam uma redução na opacidade dos gases de escape de 25% quando trabalharam com biodiesel em relação ao diesel mineral (NABI; AKHTER; ZAGLUL, 2006). Em todos estes trabalhos houve redução da opacidade dos gases com o biodiesel puro.

Este comportamento não esperado dos níveis de opacidade dos gases de escape conforme se altera a concentração de biodiesel na mistura com diesel mineral (Figura 4.27), não ocorreu quanto ao modo de operação, no qual teve um comportamento bastante semelhante com as outras variáveis respostas desta seção (Figura 4.28).

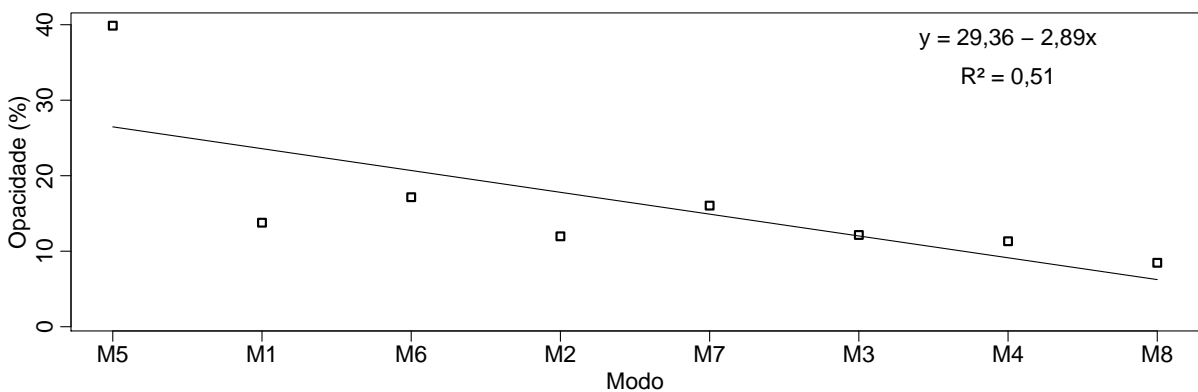


Figura 4.28: Comportamento da opacidade dos gases de escape em função do modo de operação.

Apesar do coeficiente de determinação da equação linear presente na Figura 4.28 ser de apenas 51%, o comportamento dos dados pontuais é bem próximo do esperado. Percebe-se que o modo de operação 5 é o que mais opacidade possui nos gases de escape (algo próximo de 40%) enquanto que os demais modos ficam com valores entre 10 a 15%, aproximadamente.

Comparando o modo que com maior opacidade (M5 \rightsquigarrow 40%) e o com menor opacidade (M8 \rightsquigarrow 10%) a diferença é uma redução de 75%. De forma análoga ao que ocorreu com as demais variáveis respostas anteriormente discutidas, os níveis de opacidade são mais alterados pelo modo de operação do que pela mistura diesel/biodiesel. Enquanto que a diferença máxima com os tipos de combustível é de 4,2%, com os modos de operação chega a 30%.

4.3.4 Monóxido de nitrogênio (NO)

As emissões de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) geralmente são apresentadas na literatura por emissão de óxido de nitrogênio (NO_x). Entretanto, no caso deste trabalho e, devido ao equipamento *Infralyt* (Figura 3.8 na página 45) ter a possibilidade de ler NO e NO₂ individualmente, estes compostos serão discutidos em separados.

Para Ileri e Koçar (2014), a formação de NO_x pode ser descrito geralmente por três métodos, isto é, NO_x térmico, NO_x combustível, e NO_x imediato. Segundo os autores, cada uma dessas três formas de geração contribui para as emissões globais de NO_x provenientes de um combustível. A formação de NO_x térmico é o principal contribuinte para as emissões de NO_x de um motor diesel.

A forma de apresentação dos dados em NO_x deve-se ao fato que ~ 95% destas emissões são de monóxidos e ~ 5% são de dióxidos. No caso deste trabalho, enquanto que as emissões de NO ficam na média 1250 ppm (Figuras 4.29b e 4.31), as emissões de NO₂ estão próximas de 80 ppm (Figuras 4.33b e 4.35).

As emissões de NO_x, CO e HC são bem menores em quantidade do que de CO₂, O₂ e opacidade, já que estas são apresentadas em percentagem do total enquanto aquelas estão apresentadas em partes por milhão, o que não significa que são menos importantes como componentes de poluição atmosférica.

Os dados de emissão de NO ficaram bem distribuídos, com a grande maioria dos resíduos até ± 4 DP em relação a média (Figura 4.29a). Já a distribuição destes dados ocorreram com maior frequência ao redor de 1250 ppm (> 600 ocorrências), mas também entre 0 e 800 ppm (Figura 4.29b).

Semelhantemente com as outras variáveis, o modo de operação (Figura 4.29d) alterou mais os níveis de emissão do que os combustíveis (Figura 4.29c). Entretanto, os modos de operação não alteraram tanto as emissões como no caso da opacidade (Figura 4.30).

Observando a Figura 4.30, percebe-se que o modo de operação 5 foi o que mais emitiu NO, entretanto a diferença para o segundo e terceiro colocado (M2 e M1) não foi tão discrepante como foi para as outras variáveis.

O combustível que mais emitiu NO foi o C9, seguido do C1 e C6 que não diferiram estatisticamente entre si (\doteq). O terceiro combustível que mais emitiu NO foi o C2. O quarto o C5. Vários combustíveis \doteq e foram o segundo grupo de combustíveis que menos emitiram NO:

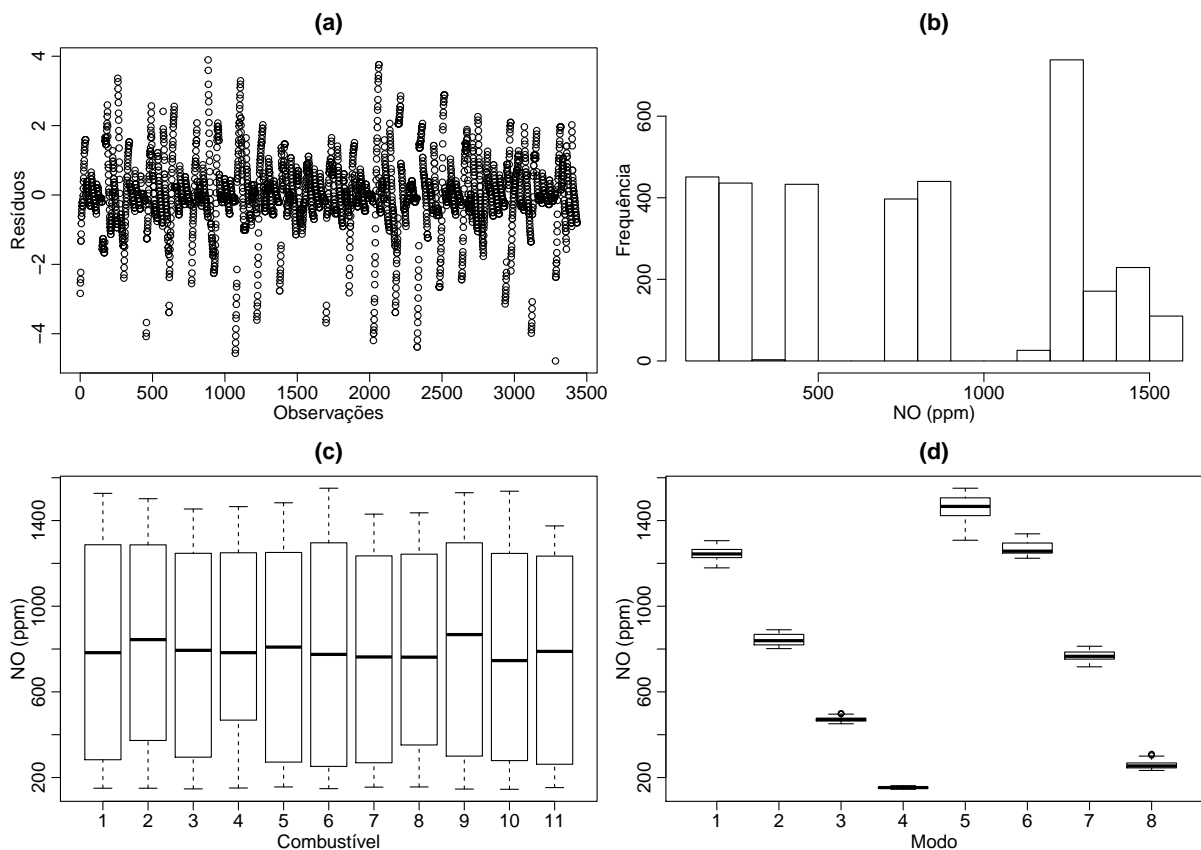


Figura 4.29: Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de NO em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).

C10, C4, C7 e C3. Os combustíveis que menos emitiram NO e ÷ foram o C8 e o C11 (Figura 4.30).

Todos os modos de operação diferiram estatisticamente entre si. O modo que mais emitiu NO foi o 5, seguido dos modos 6, 1, 2, 7, 3, 8 e 4 (Figura 4.30). Nota-se aqui que na rotação de potência máxima com 10% de carga (Modo 7) emite menos NO que na rotação de marcha lenta sem carga (Modo 8). Isto pode ser pelo fato que no M7 há maior entrada de ar e conseqüentemente menor temperatura média na câmara de combustão, já que a produção de NO_x é dependente de altas temperaturas.

O comportamento das emissões de NO conforme altera-se a mistura de diesel/biodiesel está apresentado na Figura 4.31. De maneira geral, há uma redução dos níveis de NO a partir do aumento de biodiesel na concentração, independente do tipo de diesel mineral.

Com o diesel S10 há uma redução de 4,5 ppm na emissão de NO com o aumento de 10% na concentração de biodiesel. Para o diesel S500 esta redução é maior e chega a 6,9 ppm a cada 10% de adição de biodiesel na mistura (Figura 4.31).

Independente do tipo de diesel, ocorre uma redução de ~ 100 ppm de NO utilizando

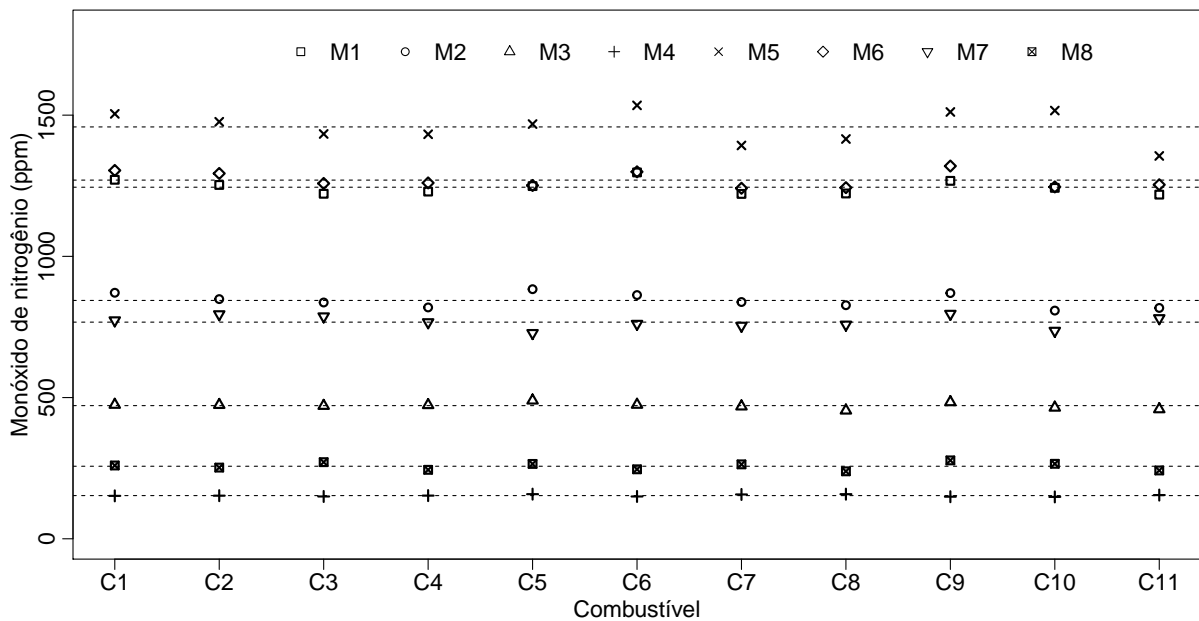


Figura 4.30: Variação do teor (ppm) de monóxido de nitrogênio nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.

B100 em relação ao B5. Esta redução é na ordem de 6,0%. Estes resultados vem de encontro aos de McCarthy, Rasul e Moazzem (2011) que, trabalhando com dois tipos de biodiesel em comparação com o diesel mineral constataram uma redução de 14% com o biodiesel A e um aumento de 17% com o biodiesel B. Segundo os autores, esta redução de NO_x com um tipo de combustível e aumento com outro significa que não é devido ao fato de ser biodiesel o único componente que atua na redução das emissões de NO_x .

Resultados semelhantes com este trabalho foi encontrado por Raheman e Phadatare (2004) que, trabalhando com motor de um cilindro, relataram redução nos níveis de NO_x de 26% quando trabalharam com B100 em relação ao B20. Zhu et al. (2011) relatam que os menores níveis de emissão de NO_x ocorreram quando se utilizou o diesel com baixo teor de enxofre, em relação ao biodiesel. Já, Fang et al. (2008) relatam uma redução nas emissões de NO_x de 13%, trabalhando com o diesel mineral muito parecido com o S10 brasileiro e com biodiesel puro. Estes pesquisadores também relatam que há uma grande redução na emissão de NO_x quando se realiza a combustão em menor temperatura.

Entretanto, na literatura, o mais comum é o aumento das emissões de NO_x com o incremento de biodiesel na mistura com diesel mineral. Maziero et al. (2006), encontraram um aumento de 5,7% nos níveis de emissão de NO_x quando trabalharam com biodiesel de girasol. Canakci e Gerpen (2003), observaram um aumento nos níveis de emissão de NO_x quando trabalharam com biodiesel de soja (de 13,1%) e gordura animal (11,6%). Também, Ozsezen

et al. (2009) verificaram um aumento de 15% nas emissões de NO_x quando foi aumentada a concentração de biodiesel na mistura. Resultado semelhante encontraram Özener et al. (2012), com aumento de 5% nas emissões de NO_x com na mistura B50 em relação ao diesel mineral puro. Em trabalho realizado por Moser et al. (2009) relataram incremento de 5% nos níveis de emissão de NO_x quando utilizaram 20% de biodiesel em diesel mineral com baixo teor de enxofre.

Em trabalho de Valente et al. (2012) encontram aumento de 4,8% de NO_x quando trabalharam com 50% de biodiesel de óleo de fritura no diesel mineral. Trabalhando com 3 tipos de biodiesel comparando com diesel comercial de baixo teor de enxofre, Knothe et al. (2006) relataram que houve aumento na ordem de 6% trabalhando com biodiesel de gordura animal e reduziu cerca de 5% com biodiesel de palma. No trabalho de Jayaram et al. (2011), trabalhando com motor de embarcação marinha, houve aumento de 3 vezes a emissão de NO_x . Já, Nabi et al. (2006) relatam um aumento nas emissões de NO_x de 5% quando trabalharam com biodiesel em relação ao diesel mineral.

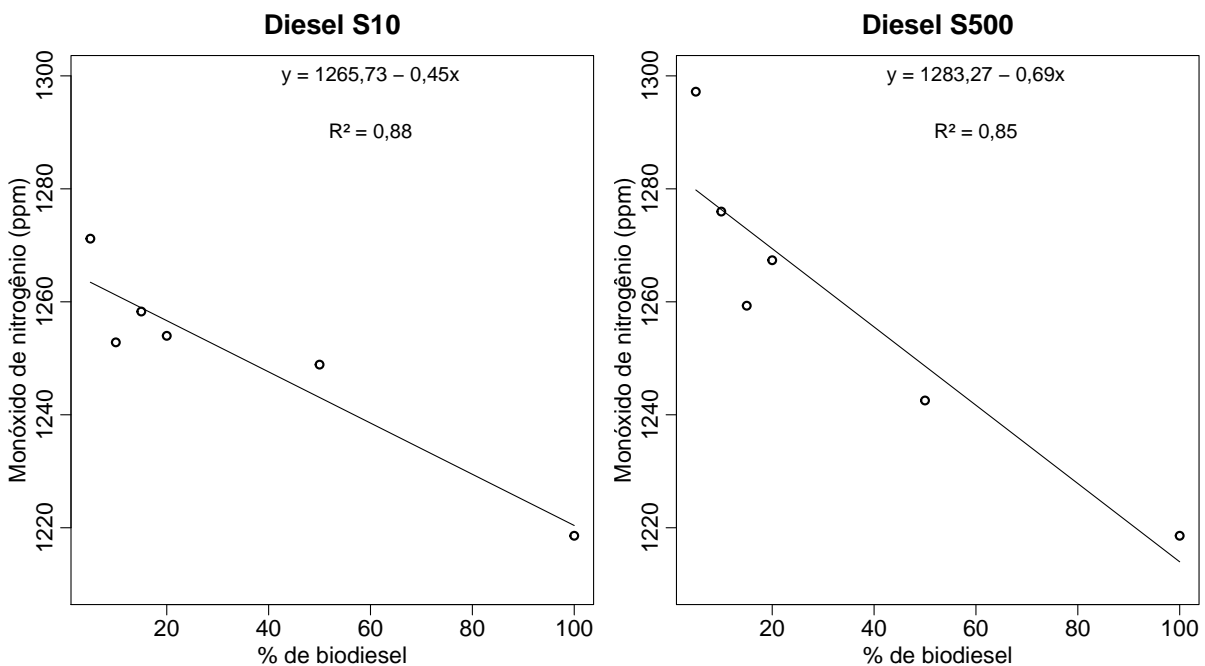


Figura 4.31: Comportamento das emissões de monóxido de nitrogênio em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.

Já, o comportamento dos níveis de emissão de NO pelo modo de operação do motor está apresentado na Figura 4.32.

Da mesma forma que as outras variáveis respostas, o modo de operação influi mais nos níveis de emissão do que o tipo de combustível. No caso da emissão de NO , variaram de ~ 1450

ppm no modo 5 a ~ 200 ppm no modo 4 (Figura 4.32). Isto representa uma redução de 86,2% nas emissões. Isto pode ser explicado pelo fato que a alta temperatura no M5, que converte o N e o O_2 atmosférico presente no ar admitido pelo motor para NO e NO_2 e que ocorre com menor intensidade nos modos onde a temperatura de combustão média é menor. Valente et al. (2012) observaram que as emissões de NO_x aumentam quanto menor for a carga aplicada ao motor.

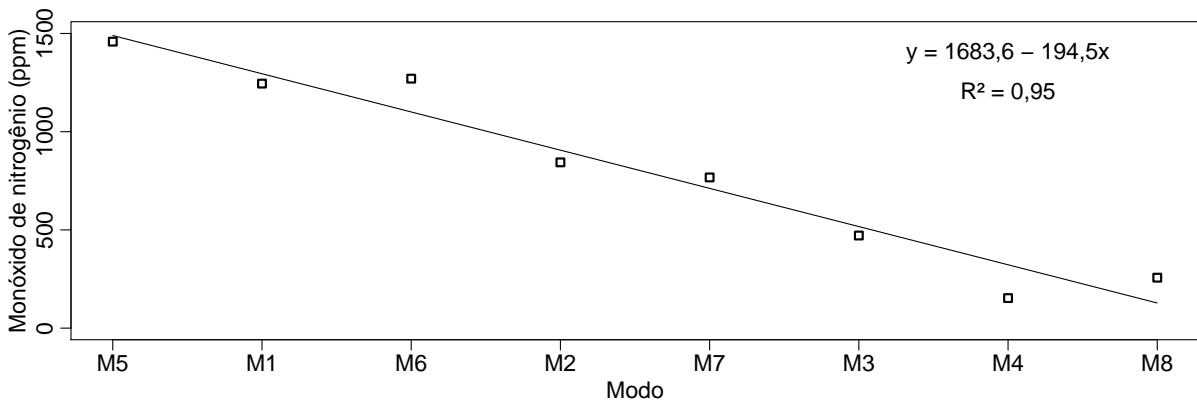


Figura 4.32: Comportamento da emissão de monóxido de nitrogênio nos gases de escape em função do modo de operação.

Comparando com o tipo de combustível (Figura 4.31) que reduz os níveis de emissão em 100 ppm, o modo de operação (Figura 4.32) reduz em 1250 ppm. Portanto, a participação do modo de operação na alteração das emissões de NO é de 92%, comparado com a alteração pelo tipo de combustível. Para Varuvel *et al* (2012) o principal problema com o uso de biocombustível puro no motor diesel é altas emissões de NO_x em todas as cargas. Os autores relatam que a adição de diesel com biocombustíveis reduziu as emissões de NO_x significativamente de 917 ppm para 889 ppm com carga de 80% com uma mistura ideal de B80.

4.3.5 Dióxido de nitrogênio (NO_2)

As emissões de NO_2 representaram $\sim 5\%$ das emissões de NO_x . De maneira geral, o comportamento das emissões de NO_2 se assemelharam ao das emissões de NO, discutidas na sessão anterior.

Os dados coletados de NO_2 apresentaram pouca dispersão (Figura 4.33a), muito parecido com o ocorrido com os dados de monóxido de nitrogênio. A emissão de NO_2 variou de 20 a 115 ppm (Figura 4.33b), sendo que a maior frequência dos dados ocorreu com 25 ppm (~ 800 ocorrências) (Figura 4.33b).

Novamente, o modo de operação (Figura 4.33d) teve mais influência nas emissões de NO_2 do que o tipo de combustível (Figura 4.33c).

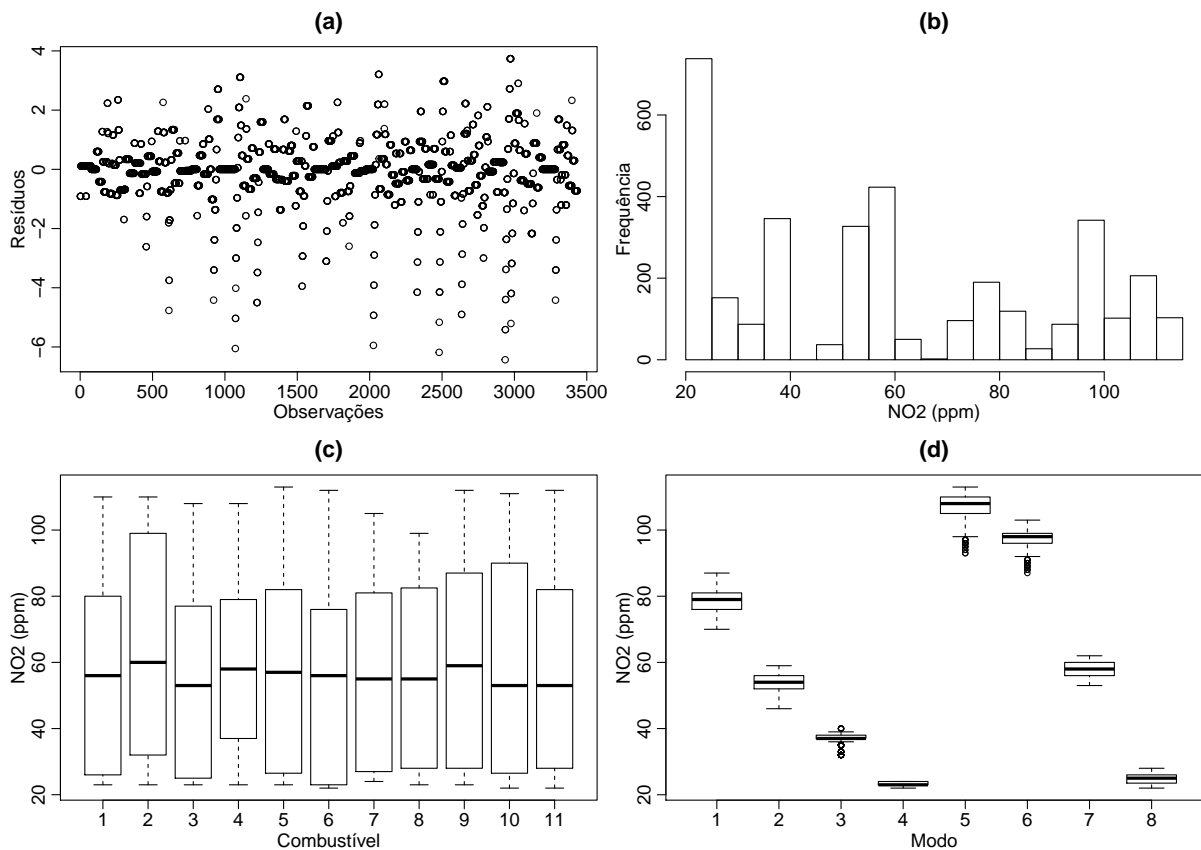


Figura 4.33: Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de NO_2 em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).

Melhor análise dos tipos de combustíveis e do modo de operação pode ser feita observando a Figura 4.34. O combustível que mais emitiu NO_2 foi o C11, seguido do C9. Os combustíveis C1, C6, C10, C3 e C4 \div e foram o terceiro grupo de combustíveis que mais emitiram. Já o C8 foi o combustível que menos emitiu, seguidos dos C5, C2 e C7 que \div .

Quando se analisa os modos de operação, conclui-se que o M5 novamente foi o que mais emitiu NO_2 , seguido do M6, M1, M7, M2 e M3. O M8 e M4 \div e foram os modos que menos emitiram NO_2 (Figura 4.34).

A análise separada das emissões de NO_2 em função do tipo de combustível pode ser realizada observando a Figura 4.35. Nela, percebe-se que quando se utiliza o diesel mineral S10, a variação das emissões de NO_2 vão de ~ 79 até 81 ppm, o que significa que praticamente não há alteração nestas emissões quando se adiciona biodiesel no diesel S10. Pela equação de regressão pode-se afirmar que o aumento de 10% na concentração de biodiesel na mistura no diesel com 10 ppm de enxofre, as emissões de NO_2 aumentam 0,2 ppm apenas, com 66% de

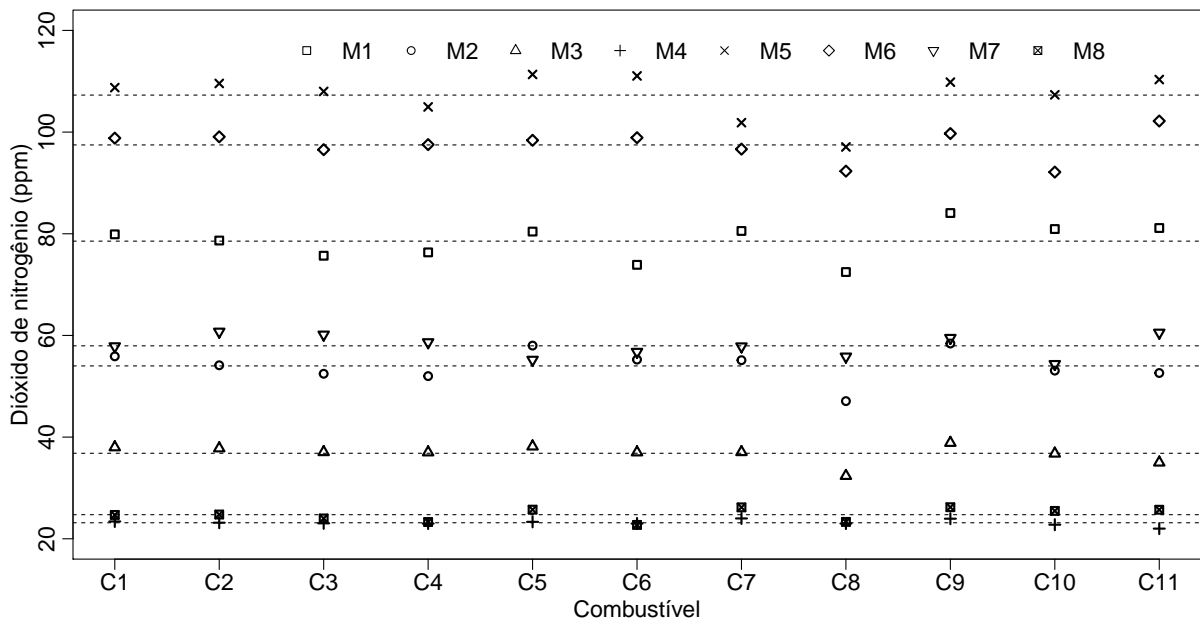


Figura 4.34: Variação do teor (ppm) de dióxido de nitrogênio nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.

coeficiente de determinação.

Quando o diesel utilizado é o S500, o comportamento das emissões com o incremento de biodiesel na mistura é mais errático. Percebe-se que, utilizando uma equação linear, o coeficiente de determinação R^2 é de 16% somente. Isto significa que 84% da variação das emissões de NO_2 com o diesel S500 não é explicada pela equação $y = 77,15 + 0,05x$. Além disto, ocorre uma amplitude maior nas emissões de 72,2 ppm (em B15) até 84 ppm (em B20). Devido a isto, podemos considerar que com o incremento de 10% de biodiesel na mistura com diesel mineral S500 há um aumento de 0,5 ppm nas emissões de NO_2 .

Da mesma maneira, podemos realizar uma análise da alteração das emissões de NO_2 conforme altera-se o modo de operação, observando a Figura 4.36. Os modos que mais emitem são aqueles que admitem menos ar e operam em maior carga. Há redução na emissão de NO_2 quando se reduz a carga no motor em uma taxa de 12,3 ppm por modo de operação ($R^2 = 0,89$).

Pelo modo de operação, as emissões de NO_2 reduzem de ~ 102 ppm para ~ 20 ppm, o que significa menos 80% de emissão de NO_2 . Comparando com o tipo de combustível, 85% da alteração dos níveis de emissão é contabilizado para o modo de operação, enquanto que nos outros 15% o tipo de combustível é responsável pela variação destas emissões.

Vale frizar que as emissões de NO_2 aumentaram com o incremento de biodiesel na mistura e as emissões de NO diminuíram. Como as emissões de NO são bem mais representativas que as de NO_2 , pode-se concluir que as emissões de NO_x diminuem conforme aumenta a parti-

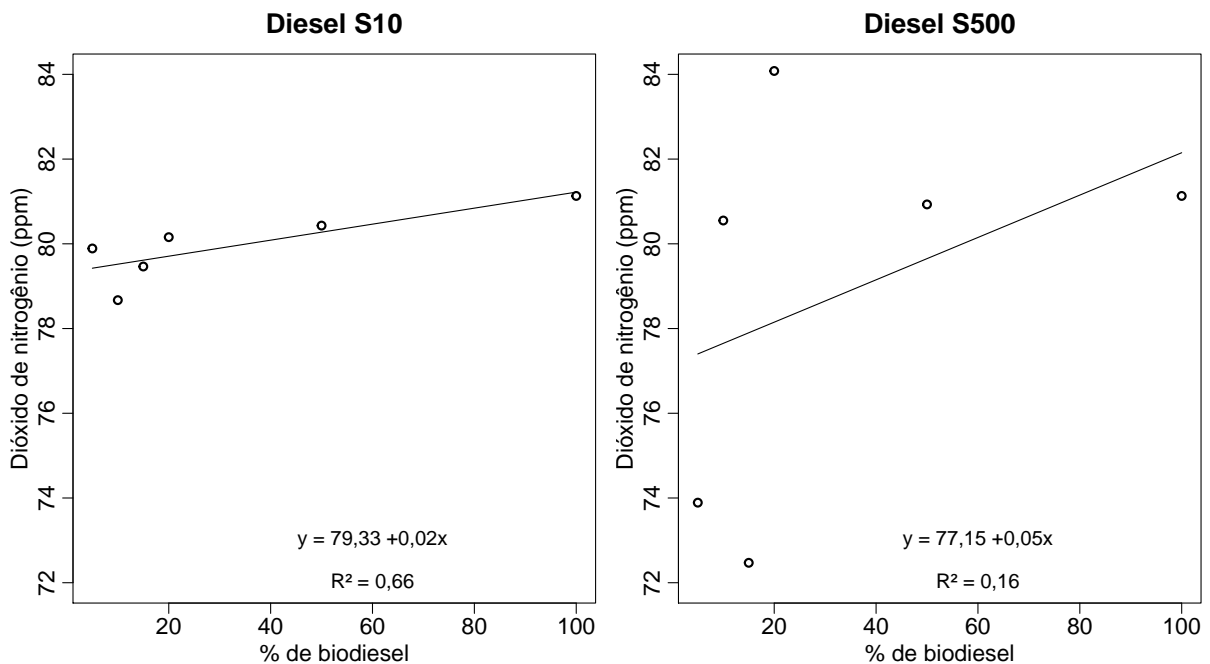


Figura 4.35: Comportamento das emissões de dióxido de nitrogênio em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.

cipação de biodiesel na mistura. Traduzindo em números, se utilizarmos as equações presentes nas Figuras 4.31 e 4.35, pode-se afirmar que, o diesel S10 na mistura B5 \rightsquigarrow 1342,8 ppm de NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$). Enquanto isto, o B100 \rightsquigarrow 1302,0 ppm. Há, portanto, uma redução de 3,0% nas emissões de NO_x . Com o diesel S500 na mistura B5 \rightsquigarrow 1357,2 ppm de NO_x . Já, o B100 \rightsquigarrow 1296,4 ppm. Isto significa uma redução de 8,2% nas emissões de NO_x .

Independente do diesel mineral utilizado e do modo de operação (considerando apenas as misturas B5 (comercial) e B100 (biodiesel puro)) ocorreu uma redução nas emissões de NO_x de 5,6% quando se utilizou B100 em relação ao B5.

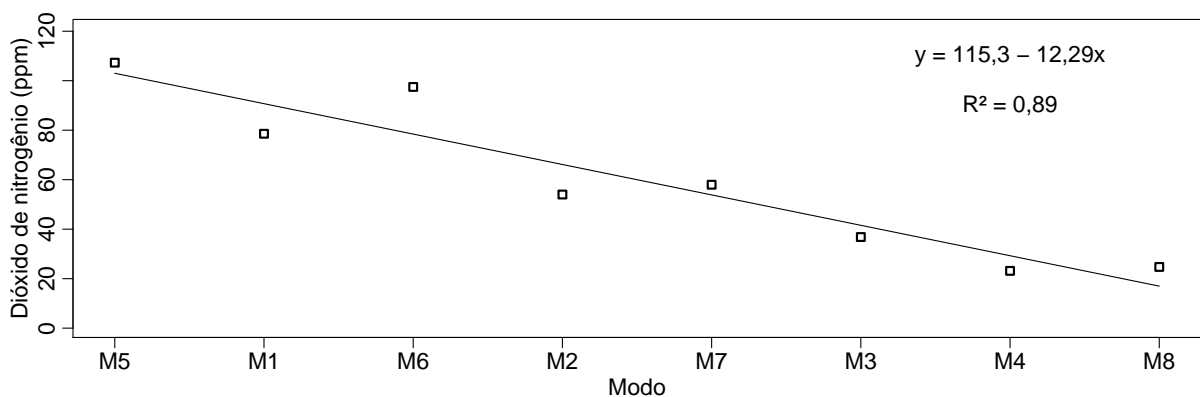


Figura 4.36: Comportamento da emissão de dióxido de nitrogênio nos gases de escape em função do modo de operação.

4.3.6 Monóxido de carbono (CO)

As emissões de monóxido de carbono seguem a mesma ordem de grandeza das emissões de NO_2 e acompanham, nesta mesma ordem de grandeza, as emissões de hidrocarbonetos. Os dados coletados de CO pelo *Infralyt* apresentaram boa distribuição (Figura 4.37a), permanecendo a maioria entre ± 5 DP da média. Como no caso das outras variáveis, há alguns *outleirs* (> 5 DP), que foram desconsiderados para a realização das análises.

Já a frequência da distribuição dos dados, apresentada na Figura 4.37b, apresenta valores de 0 a 1200 ppm, sendo que valores entre 0 e 200 ppm apresentam aproximadamente 3200 dados e a maioria dos valores ($\sim 95\%$) são menores que 100 ppm. Muito semelhante com o que ocorreu com as outras variáveis respostas o modo de operação (Figura 4.37d) teve mais influência nas emissões de CO do que o tipo de combustível (Figura 4.37c), sendo que o modo de operação 5 emitiu com todos os combustíveis mais de 400 ppm de CO. Uma análise mais detalhada pode ser realizada, observando a Figura 4.38.

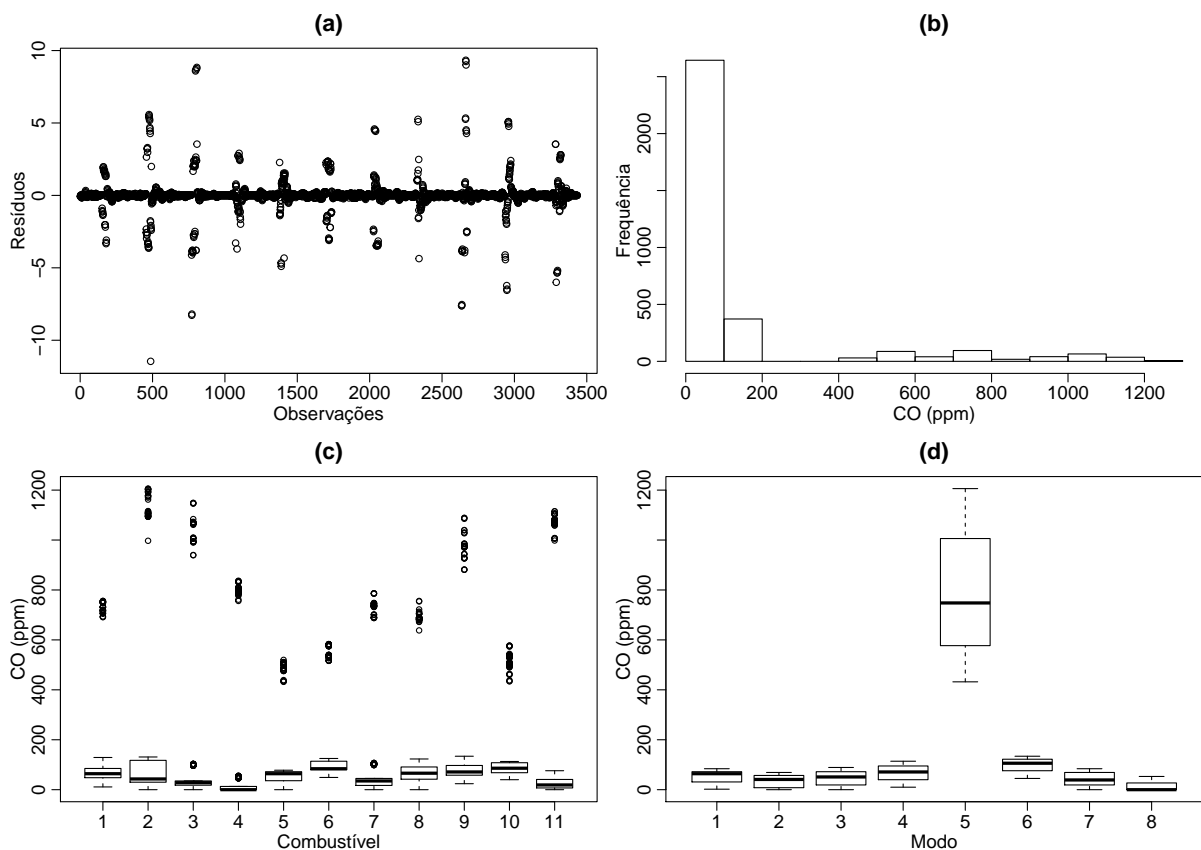


Figura 4.37: Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de CO em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).

Na Figura 4.38, percebe-se que o modo de operação 5 se destaca pela alta emissão de CO. O modo de operação 5 é o que mais produz CO devido ao fato que ele é produzido pela queima em condições de pouco oxigênio (combustão incompleta) e/ou alta temperatura. Percebe-se que no M5, a média de emissão de CO para todos os combustíveis permaneceu próximo a 800 ppm, com variação de ± 400 ppm. Já, o segundo modo que mais emitiu CO foi o M6, com média abaixo dos 100 ppm. Esta diferença foi a maior encontrada entre todas as variáveis respostas estudadas. Os outros modos praticamente não diferiram estatisticamente entre si (\doteq).

O combustível que mais emitiu CO foi o 6 ($\mu = 82$ ppm), seguido do combustível 10. Os combustíveis 9 e 8 foram os próximos que mais emitiram CO e \doteq . Já os combustíveis que utilizaram o diesel mineral S10 emitiram, na média, menos CO do que os que utilizaram S500. O biodiesel puro foi o que menos emitiu CO ($\mu = 22$ ppm) (Figura 4.38). Uma análise mais detalhada da alteração nos níveis de emissão em função do tipo de combustível pode ser realizada observando a Figura 4.39.

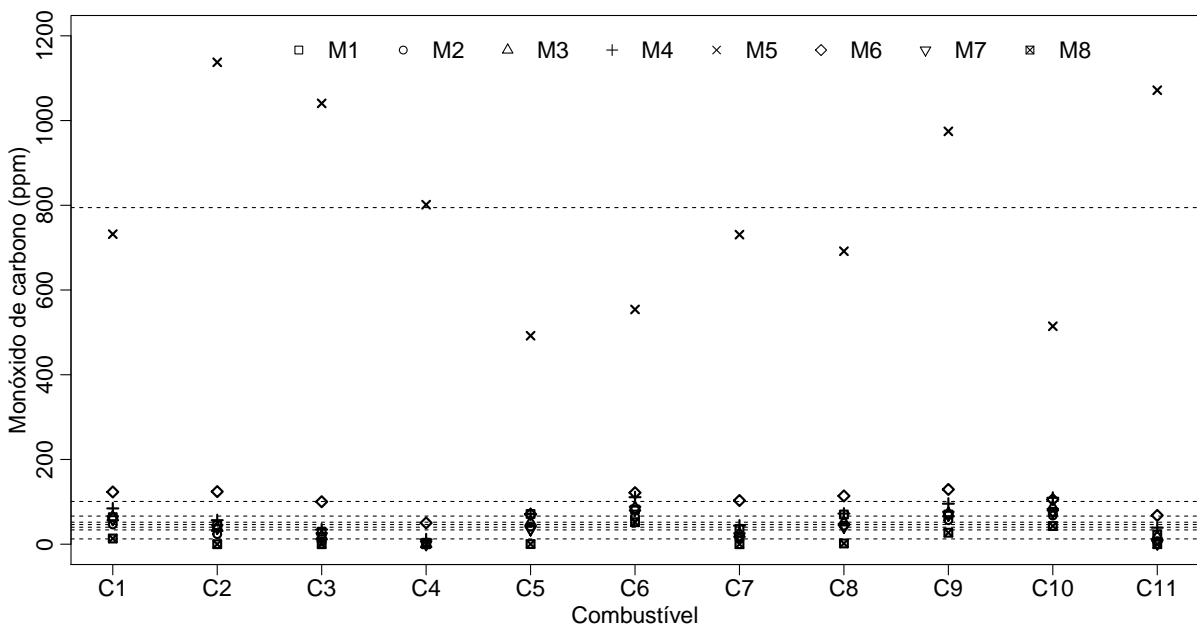


Figura 4.38: Variação do teor (ppm) de monóxido de carbono nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.

As emissões de CO reduzem com o incremento de biodiesel na mistura com diesel mineral (Figura 4.39). Esta redução é mais acentuada com o diesel S500 em relação ao S10, visto que aquele emite maior quantidade de CO quando em maior concentração com biodiesel do que este. A redução é de 2 ppm com a adição de 10% de biodiesel no diesel S10 e de 4 ppm com o mesmo percentual de biodiesel, no diesel S500 (observando o coeficiente angular das

duas equações presentes na Figura 4.39).

Independente do tipo de diesel mineral ocorre uma redução expressiva de 73,2% nas emissões de CO quando se utiliza biodiesel puro em relação ao diesel comercial atual (B5). Se considerar o diesel com menor teor de enxofre, esta redução foi de 54,2%. Em trabalho realizado por McCarthy et al. (2011), constataram uma redução de CO na ordem de 43% com o uso de biodiesel. Canakci e Gerpen (2003), também encontraram uma redução nos níveis de emissão de CO quando trabalharam com biodiesel de soja (de 18,2%) e gordura animal (17,8%). Outro trabalho foi desenvolvido por Maziero et al. (2006), onde houve uma redução de 32,2% nos níveis de emissão de CO quando trabalharam com biodiesel de girassol. Gokalp et al. (2011), trabalhando com duas misturas em comparação com diesel mineral puro (B0), encontraram redução de 3% em B5 e 52% com B100 nas emissões de monóxido de carbono.

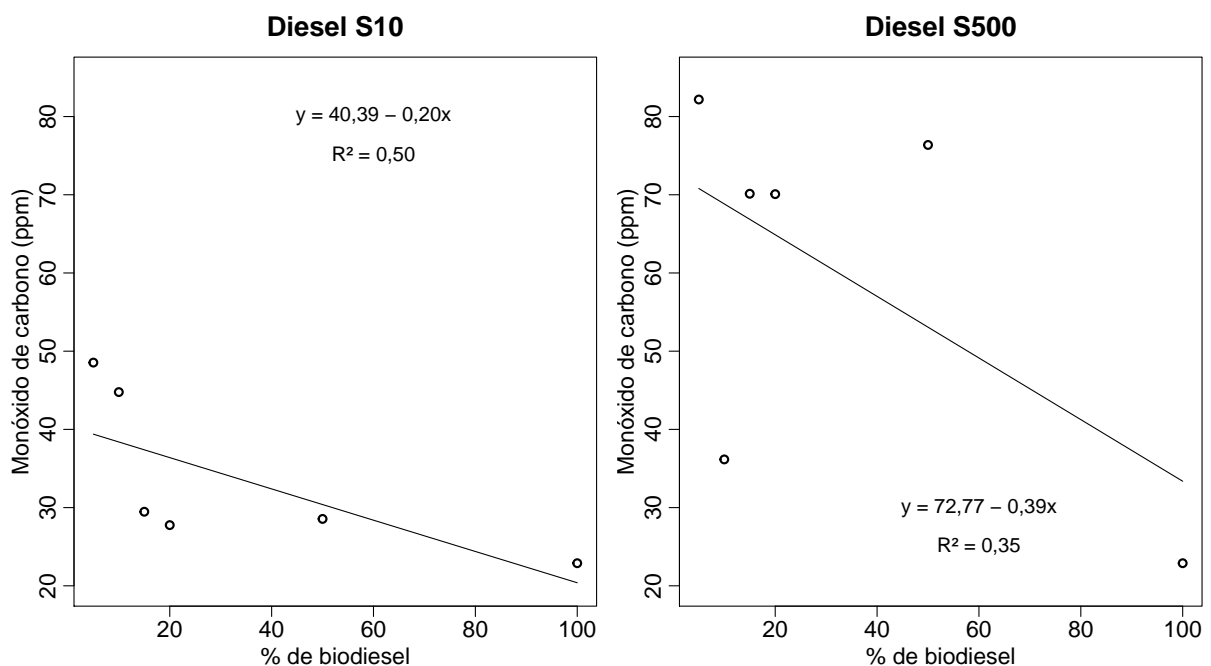


Figura 4.39: Comportamento das emissões de monóxido de carbono em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.

Raheman e Phadataré (2004) trabalhando com motor de um cilindro, encontraram redução nos níveis de CO de 83% quando trabalharam com B100 em relação ao B20. Em trabalho realizado por Moser et al. (2009) relataram uma redução de 11% nos níveis de emissão de CO quando utilizaram 20% de biodiesel em diesel mineral com baixo teor de enxofre. Buyukkaya et al. (2010) trabalhando com óleo de canola puro (B100) comparando com diesel comercial B5 observaram uma redução de 32% na emissão de CO. Nabi et al. (2006) relatam uma redução nas emissões de CO de 4% quando trabalharam com biodiesel em relação ao diesel mineral. Em

trabalho de Özener et al. (2012) relataram uma redução de até 46% nas emissões de monóxido de carbono com na mistura B50 em relação ao diesel mineral puro. Sanjid et al. (2014), em trabalho com motor de um cilindro e duas fontes de biodiesel, comparado com diesel mineral (B0), encontraram redução de 9,5% com B5 e 20,5% com B10.

Já, em trabalho de Valente et al. (2012) encontraram aumento de 20,1% de CO quando trabalharam com 50% de biodiesel de óleo de fritura no diesel mineral.

Quando se altera o modo de operação, as emissões de CO também se alteram. Isto pode ser observado na Figura 4.40. O ajuste da curva ocorreu com maior coeficiente de determinação, de forma logarítmica. Mesmo assim, o máximo de R^2 foi de 62%. Visualizando a Figura 4.40, percebe-se que este ajuste não foi melhor devido ao alto valor de emissão de CO no modo de operação 5 (800 ppm).

Os demais modos de operação permaneceram com valores de emissão abaixo de 100 ppm, e seguiram a tendência de diminuição das emissões conforme a carga aplicada ao motor foi menor. Comparando o M5 ($\mu \sim 800$ ppm) com o M8 ($\mu \sim 20$ ppm) representa uma redução de 97,5% nas emissões de CO neste modo de operação. Valente et al. (2012) observaram que as emissões de CO diminuem quanto menor for a carga aplicada ao motor.

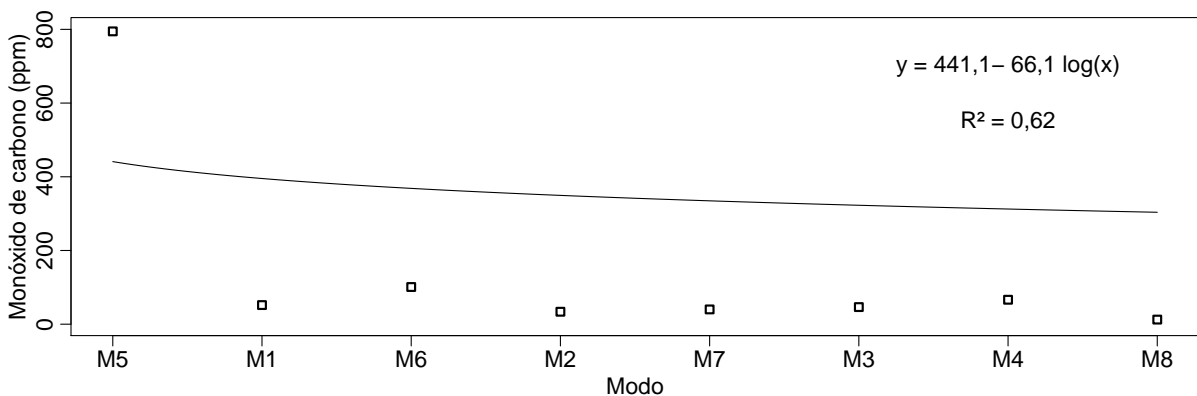


Figura 4.40: Comportamento da emissão de monóxido de carbono nos gases de escape em função do modo de operação.

Apesar do modo de operação significar uma alteração maior nos níveis de emissão de CO, o tipo de combustível para este poluente também alterou de maneira bastante expressiva as emissões. De todas as variáveis respondidas de emissões analisadas, foi com o monóxido de carbono que o biodiesel teve a segunda maior influência positiva na sua redução. A maior influência foi na emissão de hidrocarbonetos.

4.3.7 Hidrocarbonetos (HC)

Os hidrocarbonetos (HC) são compostos basicamente de hidrogênio e carbono, e são produzidos no processo de combustão e/ou presentes no combustível. Entretanto, como acontece com o CO e NO₂, as emissões permanecem na casa das dezenas de partes por milhão.

Os resultados das emissões de HC estão apresentados na Figura 4.41. Nela, pode-se observar, que os resíduos praticamente não existiram (Figura 4.41a) tendo ~ 10 observações superior a ± 2 DP da média. A frequência destes dados se apresentaram distribuídas entre 0 e 90 ppm, sendo que ~ 1300 valores foram entre zero e 20 ppm e o restante dos valores foram entre 35 e 85 ppm (Figura 4.41b). No caso dos HC, os combustíveis tiveram respostas interessantes. Analisando a Figura 4.41c percebe-se que os combustíveis 5, 7, 8 e 11 apresentaram menor emissão de HC enquanto que o modo de operação (Figura 4.41d) tiveram comportamento semelhante com as demais variáveis respostas das emissões, mostrando que as emissões de HC não depende tanto do modo de operação.

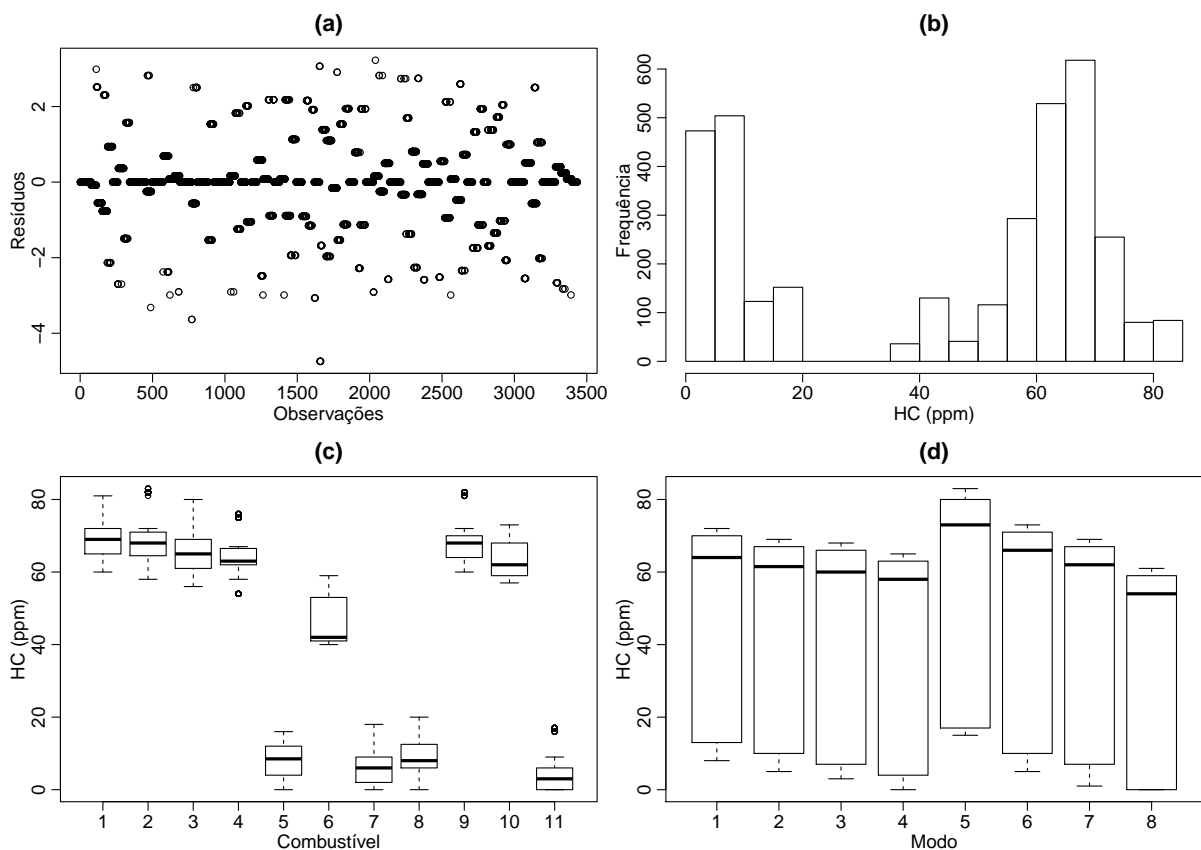


Figura 4.41: Resíduos (a), frequência (b), e distribuição dos níveis de HC em função dos combustíveis (c) e modo de operação (d).

Na Figura 4.42 está representada a variação das emissões de HC em função do combustível (colunas) e modo de operação (linhas). Comparando com as demais, nesta variável resposta o tipo de combustível apresentou grandes diferenças, sendo que a média, representada pela linha tracejada, não foi representativa. Os combustíveis 1, 2 e 9 e foram os que mais emitiram HC. Na sequência, os combustíveis 3, 4, 6 e 10, nesta ordem, emitiram mais HC. O combustível 11 (biodiesel puro) foi o que menos emitiu. Na sequência o 5, 7 e 8 emitiram menos, nesta ordem. Já o modo de operação que mais emitiu foi novamente o M5 (Figura 4.42). O segundo modo que mais emitiu HC foi o M6, seguido do M1. O modo de operação que menos emitiu HC foi o M8.

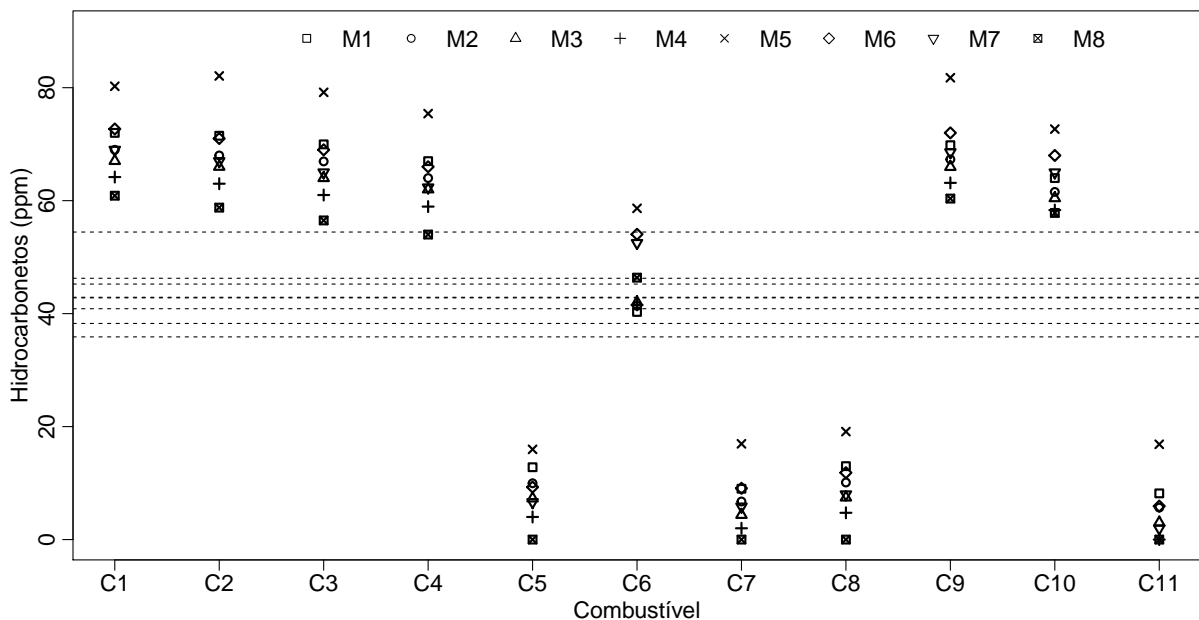


Figura 4.42: Variação do teor (ppm) de hidrocarbonetos nos gases de escape em função dos tipos de combustíveis e dos modos de operação.

A Figura 4.43 serve para compreender melhor o comportamento das emissões em função do tipo de diesel mineral e da concentração de biodiesel na mistura. Nela, percebe-se que o comportamento das emissões com o diesel S10 é linear conforme se altera a concentração de biodiesel. Há um decréscimo de 7,9 ppm de HC nas emissões com o aumento de 10% de biodiesel. Já o comportamento das emissões com o diesel S500 é diferente, devido as concentrações de 10 e 15% de biodiesel neste diesel apresentarem baixas emissões.

Independente do diesel mineral, as emissões de HC variaram de 72 ppm na menor concentração de biodiesel (B5) até 8 ppm, em média, com biodiesel puro. Isto representa uma redução bem expressiva de 88,9%. Esta redução também foi encontrada por Maziero et al. (2006), de 31% nos níveis de emissão de HC quando trabalharam com biodiesel de girassol.

Canakci e Garpen (2003), observaram uma redução nos níveis de emissão de HC quando trabalharam com biodiesel de soja (de 42%) e gordura animal (46%). Concluíram também que a diferença nas emissões de HC entre a fonte de biodiesel são bem menores do que entre o biodiesel e suas misturas com diesel mineral.

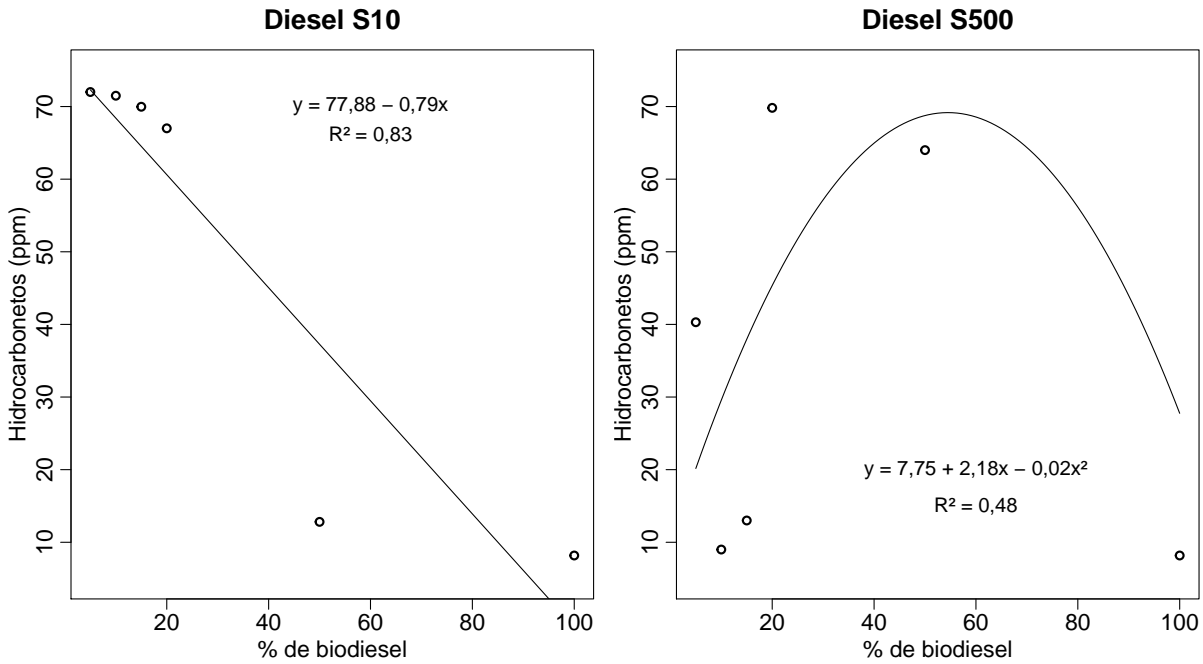


Figura 4.43: Comportamento das emissões de hidrocarbonetos em função do tipo de diesel mineral e da adição de biodiesel na mistura.

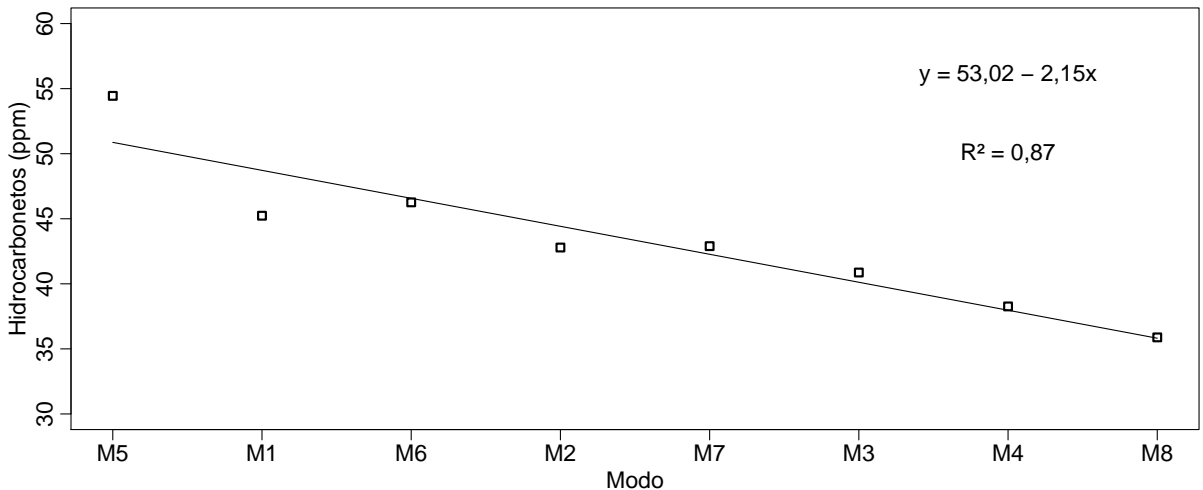


Figura 4.44: Comportamento da emissão de hidrocarbonetos nos gases de escape em função do modo de operação.

Em trabalho de Ozsezen et al. (2009) perceberam redução de 21% nas emissões de HC quando foi aumentada a concentração de biodiesel na mistura. Sanjid et al. (2014), em trabalho com motor de um cilindro e duas fontes de biodiesel, comparado com diesel mineral (B0),

encontraram redução de 3,7% com B5 e 7,8% com B10. Para Ying et al. (2006) usando B30 encontraram redução de 10%. Valente et al. (2012) encontraram aumento de 23,5% de HC quando trabalharam com 50% de biodiesel de óleo de fritura no diesel mineral. Já, McCarthy et al. (2011), trabalhando com duas fontes de biodiesel, comparado com diesel mineral, constataram um incremento de HC na ordem de 10% com o biodiesel A e 80% com o uso de biodiesel B.

Na sequência, o comportamento das emissões de HC em função do modo de operação está apresentado na Figura 4.44. Nesta figura, observa-se que há uma redução das emissões de HC conforme se reduz a carga sobre o motor e se aumenta a admissão de ar (pela maior rotação do motor). Este comportamento ocorreu com todas as variáveis analisadas, com maior ou menor intensidade. Valente et al. (2012) observaram que as emissões de HC aumentam quanto maior for a carga aplicada ao motor.

Percebe-se também que as emissões reduziram de 55 ppm, no modo 5, até 36 ppm no modo 8. Esta redução, em termos percentuais, foi de 34,5%. Com isto, conclui-se que para as emissões de HC o tipo de combustível tem mais influência nas emissões do que o modo de operação, diferentemente do que aconteceu com as demais variáveis respostas.

4.3.8 Síntese das emissões do motor

Uma análise conjunta das sete variáveis respostas que correspondem as emissões do motor com o uso de diferentes combustíveis e modos de operação pode ser realizada observando a Tabela 4.6.

Praticamente as emissões de todos os gases de escape analisados diminuíram quando se adicionou biodiesel no Diesel mineral (Tabela 4.6), com exceção do O₂ e do NO₂. O modo de operação teve mais influência na redução dos gases do que o tipo de combustível. Somente as emissões de hidrocarbonetos foram mais influenciadas pelo combustível do que o modo de operação.

De maneira geral o combustível que menos emitiu foi o biodiesel puro ou em mistura de 50% com o Diesel mineral. Já o modo que mais emitiu poluentes foi o M5, que corresponde a rotação de torque máximo com 100% do torque aplicado, ponto no qual o motor tende a apagar. O modo de operação que menos emitiu foi o M8, que corresponde a marcha lenta, sem carga

Tabela 4.6: Síntese das emissões dos gases de escape com o uso de diferentes combustíveis e modos de operação.

¹	²	³	⁴	⁵	⁶	⁷	⁸	⁹
de		influência	C	C	C %	M	M	M %
					≠			≠
O ₂	↗	M	10	8	5%	8	5	52%
CO ₂	↘	M	2	10	4%	5	8	83%
K	↘	M	8	10	43%	5	8	79%
NO	↘	M	9	11	8%	5	4	89%
NO ₂	↗	M	9	8	11%	5	4	78%
CO	↘	M	9	5	45%	5	8	98%
HC	↘	C	1	11	87%	5	8	33%

¹Emissão de. ²Aumento de emissão com adição de biodiesel no Diesel mineral (↗) ou redução da emissão com incremento de biodiesel (↘).

³As emissões foram mais influenciadas pelo modo de operação (M) ou pelo combustível (C). ⁴Combustível que mais emitiu. ⁵Combustível que menos emitiu. ⁶Diferença percentual entre o combustível que mais emitiu e o que menos emitiu. ⁷Modo de operação que mais emitiu. ⁸Modo de operação que menos emitiu. ⁹Diferença percentual entre o modo de operação que mais emitiu e o que menos emitiu.

aplicada.

5 CONCLUSÕES

A quantidade mínima de repetições necessária para a determinação de torque, potência, consumo horário e consumo específico do motor são quatro.

O tempo de aquecimento mínimo para o motor do trator estabilizar seus parâmetros é de 20 minutos.

O torque máximo e a potência máxima reduziram 5,5% com o uso de B100 em relação ao B5.

A adição de biodiesel no diesel S10 reduz com maior intensidade o torque máximo e a potência máxima quando comparado com o diesel S500.

O consumo horário de combustível ficou praticamente estável com a variação do tipo de combustível e ocorreu um aumento de 17% no consumo específico mínimo quando se utilizou biodiesel puro em relação ao B5.

As emissões de NO_x, CO₂, CO e HC, reduziram respectivamente 5,6%, 4,5%, 73,2% e 89%, quando se utiliza biodiesel puro em relação ao B5.

As emissões de NO compõe a maior parte das emissões de NO_x com aproximadamente 95% do total.

Das emissões analisadas, as emissões de hidrocarbonetos foram as que tiveram o comportamento mais alterado em função do tipo de combustível e concentração de biodiesel. A redução com o uso de biodiesel (B100) em função do diesel comercial atual (B5) foram de 88,9%.

A concentração de 20% de biodiesel no Diesel mineral reduz as emissões do motor sem alterar significativamente o desempenho.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5484:1985. **Motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão (diesel) ou ignição por centelha (otto) de velocidade angular variável - Ensaio.** 1985.
- ABNT NBR ISO 1585:1996. **Veículos rodoviários - Código de ensaio de motores - Potência líquida efetiva.** 1996.
- ABNT NBR ISO 8178-4:2012. **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.** 2012.
- ARMAN, H. (Ed.). **New Developments in Renewable Energy.** 1.ed. Rijeka, Croatia: InTech, 2013. 418p.
- BALLESTEROS, R.; GUILLÉN-FLORES, J.; MARTÍNEZ, J. D. Carbonyl emission and toxicity profile of diesel blends with an animal-fat biodiesel and a tire pyrolysis liquid fuel. **Chemosphere**, [S.l.], v.96, p.155–66, 2014.
- BANZATO, D. A. (Ed.). **Experimentação Agrícola.** 4.ed. Jaboticabal - SP: Funep, 2006. 237p.
- BECKMAN, J.; KEENEY, R.; TYNER, W. Feed demands and coproduct substitution in the biofuel era. **Agribusiness**, [S.l.], v.27, n.1, p.1–18, 2011.
- BEN, E. d. P. E. **Balanco energético nacional.** 1.ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. 282p.
- BERNARDES, M. A. d. S. (Ed.). **Environmental Impact of Biofuels.** 1.ed. Rijeka, Croatia: InTech, 2011. 280p.
- BIODIESELBR. **Biodiesel é o 43º produto industrial mais importante do país.** 2013.
- BOLDAJI, T. M. et al. Effect of some BED blends on the equivalence ratio, exhaust oxygen fraction and water and oil temperature of a diesel engine. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v.35, n.10, p.4099–4106, 2011.
- BRIJESH, P.; SREEDHARA, S. Exhaust emissions and its control methods in compression ignition engines: a review. **International Journal of Automotive Technology**, [S.l.], v.14, n.2, p.195–206, 2013.

- BUYUKKAYA, E. Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. **Fuel**, [S.l.], v.89, n.10, p.3099–3105, 2010.
- CANAKCI, M.; GERPEN, J. H. V. Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel. **Transactions of the ASAE**, [S.l.], v.46, n.4, p.937–944, 2003.
- CARGNELUTTI, A.; GUADAGNIN, J. P. Planejamento experimental em milho. **Revista Ciência Agronômica**, [S.l.], v.42, n.4, p.1009–1016, 2011.
- CARNEIRO, P.; FERREIRA, P. The economic, environmental and strategic value of biomass. **Renewable Energy**, [S.l.], v.44, p.17–22, 2012.
- CHAUHAN, B. S. et al. A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with Karanja biodiesel and its blends. **Energy**, [S.l.], v.56, p.1–7, 2013.
- DIAS, L. A. d. S. Biofuel plant species and the contribution of genetic improvement. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, [S.l.], v.11, n.spe, p.16–26, 2011.
- DWIVEDI, G.; JAIN, S.; SHARMA, M. Impact analysis of biodiesel on engine performance—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v.15, n.9, p.4633–4641, 2011.
- FANG, T. et al. Reducing NO_x Emissions from a Biodiesel-Fueled Engine by Use of Low-Temperature Combustion. **Environmental Science & Technology**, [S.l.], v.42, n.23, p.8865–8870, 2008.
- FIORESE, D. A. et al. Metodologia experimental para avaliação de custos de produção e utilização de biodiesel: estudo de caso de quatro ésteres metílicos e óleo diesel comercial. **Ciência Rural**, [S.l.], v.41, n.11, p.1921–1926, 2011.
- 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**, [S.l.], v.42, n.4, p.660–666, 2012.
- FORE, S. R. et al. Economics of small-scale on-farm use of canola and soybean for biodiesel and straight vegetable oil biofuels. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v.35, n.1, p.193–202, 2011.

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**, [S.l.], v.44, n.8, p.1108–1115, 2010.

GODESA, T.; JEJ, V.; POJE, T. Characteristics of a tractor engine using mineral and biodiesel fuels blended with rapeseed oil. **Scientia Agricola**, [S.l.], v.67, n.5, p.510–516, 2010.

GOKALP, B.; BUYUKKAYA, E.; SOYHAN, H. Performance and emissions of a diesel tractor engine fueled with marine diesel and soybean methyl ester. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v.35, n.8, p.3575–3583, 2011.

GOLIMOWSKI, W.; PASYNIUK, P.; BERGER, W. Common rail diesel tractor engine performance running on pure plant oil. **Fuel**, [S.l.], v.103, n.x, p.227–231, 2013.

HOCHMAN, G.; RAJAGOPAL, D.; ZILBERMAN, D. The Effect of Biofuels on the International Oil Market. **Applied Economic Perspectives and Policy**, [S.l.], v.33, n.3, p.402–427, 2011.

HOEKMAN, S. K.; ROBBINS, C. Review of the effects of biodiesel on NO_x emissions. **Fuel Processing Technology**, [S.l.], v.96, p.237–249, 2012.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Censo Agropecuário**. 2006.

ILERI, E.; KOÇAR, G. Experimental investigation of the effect of antioxidant additives on NO_x emissions of a diesel engine using biodiesel. **Fuel**, [S.l.], v.125, n.x, p.44–49, 2014.

JAYARAM, V. et al. Real-time gaseous, PM and ultrafine particle emissions from a modern marine engine operating on biodiesel. **Environmental science & technology**, [S.l.], v.45, n.6, p.2286–92, 2011.

KNOTHE, G.; SHARP, C. A.; RYAN, T. W. Exhaust Emissions of Biodiesel, Petrodiesel, Neat Methyl Esters, and Alkanes in a New Technology Engine †. **Energy & Fuels**, [S.l.], v.20, n.1, p.403–408, 2006.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, [S.l.], v.24, n.68, p.223–253, 2010.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; FERNANDEZ, J. R. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S.l.], v.34, n.2, p.198–223, 2008a.

LAPUERTA, M. et al. Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions. **Fuel**, [S.l.], v.87, n.15-16, p.3161–3169, 2008b.

LEITE, R. C. d. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. **Novos Estudos - CEBRAP**, [S.l.], n.78, p.15–21, 2007.

LINDGREN, M. et al. Analysis of unregulated emissions from an off-road diesel engine during realistic work operations. **Atmospheric Environment**, [S.l.], v.45, n.30, p.5394–5398, 2011.

MACHADO, P. R. **Ésteres combustíveis em motor de ciclo diesel sob condições de pré-aquecimento e variação no avanço de injeção**. 2008. 163p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) — Universidade Federal de Santa Maria.

MÁRQUEZ, L. **Tractores agrícolas: tecnología y utilización**. [S.l.]: B & H, 2012. 844p.

MAZIERO, J. V. G. et al. Avaliação de emissões poluentes de um motor diesel utilizando biodiesel de girassol como combustível. **Engenharia na Agricultura**, [S.l.], v.14, n.4, p.287–292, 2006.

MCCARTHY, P.; RASUL, M.; MOAZZEM, S. Analysis and comparison of performance and emissions of an internal combustion engine fuelled with petroleum diesel and different biodiesels. **Fuel**, [S.l.], v.90, n.6, p.2147–2157, 2011.

MENDIBURU, F. de. **agricolae**: statistical procedures for agricultural research. [S.l.: s.n.], 2012. R package version 1.1-1.

MIRAVALL, C. et al. Influence of Selective Catalytic Reduction (SCR) system on stainless steel durability. **Rem: Revista Escola de Minas**, [S.l.], v.66, n.2, p.153–158, 2013.

MOSER, B. R. et al. Exhaust emissions and fuel properties of partially hydrogenated soybean oil methyl esters blended with ultra low sulfur diesel fuel. **Fuel Processing Technology**, [S.l.], v.90, n.9, p.1122–1128, 2009.

NABI, M. N.; AKHTER, M. S.; ZAGLUL, S. M. M. Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel-biodiesel blends. **Bioresource technology**, [S.l.], v.97, n.3, p.372–8, 2006.

NIETIEDT, G. H. et al. Desempenho de motor de injeção direta sob misturas de biodiesel metílico de soja. **Ciência Rural**, [S.l.], v.41, n.7, p.1177–1182, 2011a.

NIETIEDT, G. H. et al. Performance evaluation of a direct injection engine using different blends of soybean (*Glycine max*) methyl biodiesel. **Engenharia Agrícola**, [S.l.], v.31, n.5, p.916–922, 2011b.

OZENER, O. et al. Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. **Fuel**, [S.l.], v.In press, 2012.

OZSEZEN, A. N.; CANAKCI, M.; SAYIN, C. Effects of Biodiesel from Used Frying Palm Oil on the Performance, Injection, and Combustion Characteristics of an Indirect Injection Diesel Engine. **Energy & Fuels**, [S.l.], v.22, n.2, p.1297–1305, 2008.

OZSEZEN, A. N. et al. Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. **Fuel**, [S.l.], v.88, n.4, p.629–636, 2009.

POHIT, G.; MISRA, D. Optimization of Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine with Biodiesel Using Grey-Taguchi Method. **Journal of Engineering**, [S.l.], v.2013, p.1–8, 2013.

PRABHAKAR, S.; ANNAMALAI, K. Comparison of sound , exhaust gas temperature and smoke opacity characteristics of methyl esters of vegetable oils blends. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, [S.l.], v.6, n.10, p.34–40, 2011.

R Development Core Team. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2012. ISBN 3-900051-07-0.

RAHEMAN, H.; PHADATARE a.G. Diesel engine emissions and performance from blends of karanja methyl ester and diesel. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v.27, n.4, p.393–397, 2004.

REIS, E. F. dos et al. Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v.17, n.5, p.565–571, 2013.

RIFFELL, S. et al. Biofuel harvests, coarse woody debris, and biodiversity – A meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, [S.l.], v.261, n.4, p.878–887, 2011.

RIGHELATO, R.; SPRACKLEN, D. V. Environment. Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests? **Science (New York, N.Y.)**, [S.l.], v.317, n.5840, p.902, 2007.

SAHOO, P. et al. Comparative evaluation of performance and emission characteristics of jatropha, karanja and polanga based biodiesel as fuel in a tractor engine. **Fuel**, [S.l.], v.88, n.9, p.1698–1707, 2009.

SALLA, D. A. et al. Estudo energético da produção de biocombustível a partir do milho. **Ciência Rural**, [S.l.], v.40, n.9, p.2017–2022, 2010.

SANJID, a. et al. Production of palm and jatropha based biodiesel and investigation of palm-jatropha combined blend properties, performance, exhaust emission and noise in an unmodified diesel engine. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v.65, p.295–303, 2014.

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**, [S.l.], v.37, n.5, p.1329–1335, 2007.

SHI, X. et al. Emission characteristics using methyl soyate?ethanol?diesel fuel blends on a diesel engine. **Fuel**, [S.l.], v.84, n.x, p.1543–1549, 2005.

SORANSO, A. M. et al. Desempenho dinâmico de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado de óleo residual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v.12, n.5, p.553–559, 2008.

STORCK, L. (Ed.). **Experimentação vegetal**. 1.ed. Santa Maria - RS: [s.n.], 2000. 198p.

SUN, J.; CATON, J. A.; JACOBS, T. J. Oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fuelled diesel engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S.l.], v.36, n.6, p.677–695, 2010.

TEIXEIRA, E. C.; FELTES, S.; SANTANA, E. R. R. de. Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Química Nova**, [S.l.], v.31, n.2, p.244–248, 2008.

VALENTE, O. S. et al. Exhaust emissions from a diesel power generator fuelled by waste cooking oil biodiesel. **The Science of the total environment**, [S.l.], v.431, n.X, p.57–61, 2012.

VARUVEL, E. G. et al. Experimental analysis of biofuel as an alternative fuel for diesel engines. **Applied Energy**, [S.l.], v.94, p.224–231, 2012.

XUE, J.; GRIFT, T. E.; HANSEN, A. C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v.15, n.2, p.1098–1116, 2011.

YANOWITZ, J.; MCCORMICK, R. L. Effect of biodiesel blends on North American heavy-duty diesel engine emissions. **European Journal of Lipid Science and Technology**, [S.l.], v.111, n.8, p.763–772, 2009.

YAO, C. et al. Effect of Diesel/methanol compound combustion on Diesel engine combustion and emissions. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v.49, n.6, p.1696–1704, 2008.

YING, W.; LONGBAO, Z.; HEWU, W. Diesel emission improvements by the use of oxygenated DME/diesel blend fuels. **Atmospheric Environment**, [S.l.], v.40, n.13, p.2313–2320, 2006.


ZHU, R. et al. Regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with diesel fuel blended with diethyl adipate. **Atmospheric Environment**, [S.l.], v.45, n.13, p.2174–2181, 2011.

APÊNDICES

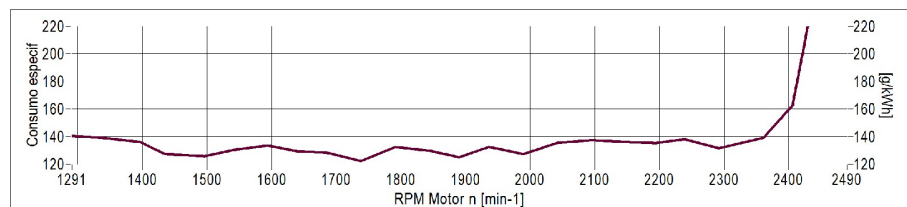
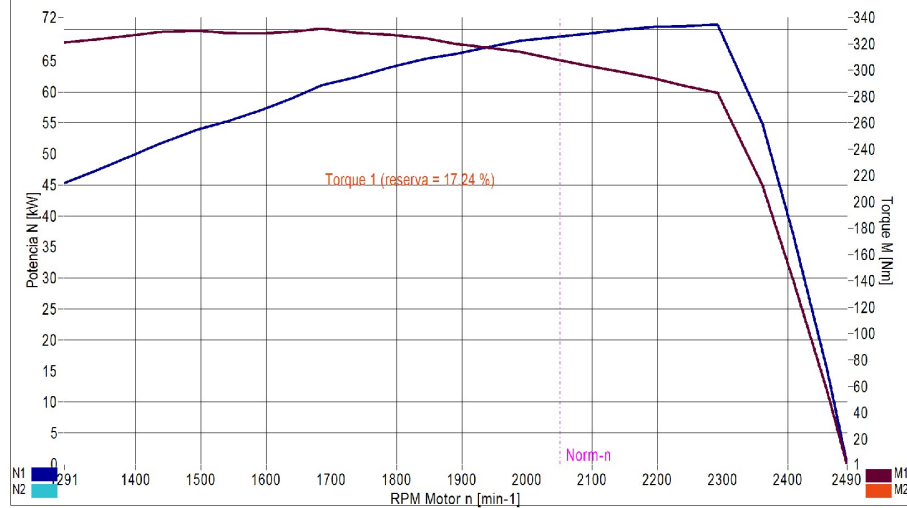
APÊNDICE A – Resultado padrão de um ensaio dinanométrico.

Este é em exemplo do formato padrão do resultado de um ensaio dinanométrico. Para exemplificar foi utilizado a primeira repetição do tratamento C1. Estão presentes as curvas de torque, potência e consumo específico, em todas as rotações do ensaio.

Favor registrar aplicativo

Relatório		Massey Ferguson		Data 14/01/2014	
Numero do ordem T1_R1	Numero do chassi	RPM nominal 540	RPM TDF 540	Pressão atmosférica 992,7	Temperatura local 33,2
Horas de operação 125	Ano de fabricação 2013	Ralação 2050:540	Cliente MF 4291		
Nota Test routine after DIN 70020, Power rudiction after DIN ISO 3046	Resultado max. potência: com RPM: max torque: com RPM: reserva de torque:	1. Medição 70.8 2293 331 1686 17.24	2. Medição	kW mi	
automático					

registre a aplicação com KL-Maschinenbau!



APÊNDICE B – Equações de regressão para as variáveis de desempenho do motor.

As tabelas a seguir apresentam as equações de regressão das variáveis torque, potência, consumo horário e consumo específico, juntamente com o coeficiente de determinação ajustado.

Tabela B.1: Equações das curvas de torque obtidas com diferentes combustíveis.

Combustível	Equação	R^2 ajustado
T1	$y = 9,652 \times 10^1 + 2,969 \times 10^{-1}x - 9,385 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T2	$y = 8,318 \times 10^1 + 3,034 \times 10^{-1}x - 9,417 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T3	$y = 7,714 \times 10^1 + 3,096 \times 10^{-1}x - 9,577 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T4	$y = 8,585 \times 10^1 + 3,004 \times 10^{-1}x - 9,407 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T5	$y = 5,623 \times 10^1 + 3,260 \times 10^{-1}x - 1,003 \times 10^{-4}x^2$	0,99
T6	$y = 9,474 \times 10^1 + 2,858 \times 10^{-1}x - 8,973 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T7	$y = 7,870 \times 10^1 + 3,096 \times 10^{-1}x - 9,660 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T8	$y = 9,605 \times 10^1 + 2,914 \times 10^{-1}x - 9,287 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T9	$y = 1,003 \times 10^2 + 2,842 \times 10^{-1}x - 9,058 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T10	$y = 6,969 \times 10^1 + 3,130 \times 10^{-1}x - 9,755 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T11	$y = 9,070 \times 10^1 + 2,075 \times 10^{-1}x - 8,544 \times 10^{-5}x^2$	0,98

Tabela B.2: Equações das curvas de potência obtidas com diferentes combustíveis.

Combustível	Equação	R^2 ajustado
T1	$y = -5,603 \times 10^1 + 1,071 \times 10^{-1}x - 2,248 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T2	$y = -5,647 \times 10^1 + 1,060 \times 10^{-1}x - 2,203 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T3	$y = -5,687 \times 10^1 + 1,064 \times 10^{-1}x - 2,209 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T4	$y = -5,643 \times 10^1 + 1,062 \times 10^{-1}x - 2,203 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T5	$y = -6,087 \times 10^1 + 1,102 \times 10^{-1}x - 2,333 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T6	$y = -5,266 \times 10^1 + 1,014 \times 10^{-1}x - 2,105 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T7	$y = -5,785 \times 10^1 + 1,082 \times 10^{-1}x - 2,288 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T8	$y = -5,553 \times 10^1 + 1,062 \times 10^{-1}x - 2,257 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T9	$y = -5,355 \times 10^2 + 1,035 \times 10^{-1}x - 2,179 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T10	$y = -5,975 \times 10^1 + 1,099 \times 10^{-1}x - 2,344 \times 10^{-5}x^2$	0,99
T11	$y = -5,037 \times 10^1 + 9,676 \times 10^{-2}x - 1,976 \times 10^{-5}x^2$	0,99

Tabela B.3: Equações das curvas de consumo horário obtidas com diferentes combustíveis.

Combustível	Equação	R^2 ajustado
T1	$y = -5,992 + 1,302 \times 10^{-2}x - 2,503 \times 10^{-6}x^2$	0,97
T2	$y = -6,605 + 1,450 \times 10^{-2}x - 2,992 \times 10^{-6}x^2$	0,94
T3	$y = -7,623 + 1,525 \times 10^{-2}x - 3,136 \times 10^{-6}x^2$	0,96
T4	$y = -1,412 \times 10^1 + 2,327 \times 10^{-2}x - 5,402 \times 10^{-6}x^2$	0,92
T5	$y = -6,521 + 1,410 \times 10^{-2}x - 2,725 \times 10^{-6}x^2$	0,97
T6	$y = -5,400 + 1,310 \times 10^{-2}x - 2,565 \times 10^{-6}x^2$	0,96
T7	$y = -2,197 + 8,966 \times 10^{-3}x - 1,360 \times 10^{-6}x^2$	0,94
T8	$y = -3,733 + 1,095 \times 10^{-2}x - 1,948 \times 10^{-6}x^2$	0,97
T9	$y = -1,056 \times 10^1 + 1,891 \times 10^{-2}x - 4,191 \times 10^{-6}x^2$	0,97
T10	$y = -3,590 + 1,021 \times 10^{-2}x - 1,597 \times 10^{-6}x^2$	0,97
T11	$y = -4,730 + 1,203 \times 10^{-2}x - 2,172 \times 10^{-6}x^2$	0,96

Tabela B.4: Equações das curvas de consumo específico obtidas com diferentes combustíveis.

Combustível	Equação	R^2 ajustado
T1	$y = 713,5 - 0,952x + 5,082 \times 10^{-4}x^2 - 8,886 \times 10^{-8}x^3$	0,57
T2	$y = 880,8 - 1,254x + 6,918 \times 10^{-4}x^2 - 1,259 \times 10^{-7}x^3$	0,65
T3	$y = 654,3 - 0,883x + 4,896 \times 10^{-4}x^2 - 8,924 \times 10^{-8}x^3$	0,46
T4	$y = 1063,0 - 1,602x + 9,129 \times 10^{-4}x^2 - 1,712 \times 10^{-7}x^3$	0,79
T5	$y = 691,9 - 0,922x + 5,050 \times 10^{-4}x^2 - 9,070 \times 10^{-8}x^3$	0,42
T6	$y = 698,3 - 0,928x + 5,026 \times 10^{-4}x^2 - 8,967 \times 10^{-8}x^3$	0,49
T7	$y = 820,8 - 1,127x + 6,021 \times 10^{-4}x^2 - 1,054 \times 10^{-7}x^3$	0,59
T8	$y = 773,2 - 1,065x + 5,786 \times 10^{-4}x^2 - 1,030 \times 10^{-7}x^3$	0,76
T9	$y = 721,6 - 1,020x + 5,811 \times 10^{-4}x^2 - 1,087 \times 10^{-7}x^3$	0,73
T10	$y = 507,7 - 0,599x + 3,129 \times 10^{-4}x^2 - 5,288 \times 10^{-8}x^3$	0,52
T11	$y = 929,4 - 1,285x + 6,932 \times 10^{-4}x^2 - 1,229 \times 10^{-7}x^3$	0,63

APÊNDICE C – Tabelas para controle manual do dinamômetro para o experimento de emissões.

Neste apêndice serão apresentadas 11 tabelas que foram utilizadas para o controle manual da rotação e torque do dinamômetro para o experimento de emissões. As duas últimas colunas das tabelas são os valores que foram observados para o referido controle.

Tabela C.1: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C1.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2300	284	606	1078
2	75	2300	213	606	809
3	50	2300	142	606	539
4	10	2300	28	606	108
5	100	1700	332	448	1260
6	75	1700	249	448	945
7	50	1700	166	448	630
8	-	900	-	237	-

Tabela C.2: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C2.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2300	284	606	1078
2	75	2300	213	606	809
3	50	2300	142	606	539
4	10	2300	28	606	108
5	100	1650	328	435	1245
6	75	1650	246	435	934
7	50	1650	164	435	623
8	-	900	-	237	-

Tabela C.3: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C3.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2250	284	606	1078
2	75	2250	213	606	809
3	50	2250	142	606	539
4	10	2250	28	606	108
5	100	1700	328	435	1245
6	75	1700	246	435	934
7	50	1700	164	435	623
8	-	900	-	237	-

Tabela C.4: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C4.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2250	280	606	1063
2	75	2250	210	606	797
3	50	2250	140	606	531
4	10	2250	28	606	106
5	100	1700	325	448	1234
6	75	1700	244	448	925
7	50	1700	163	448	617
8	-	900	-	237	-

Tabela C.5: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C5.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2250	284	593	1078
2	75	2250	213	593	809
3	50	2250	142	593	539
4	10	2250	28	593	108
5	100	1750	323	461	1245
6	75	1750	242	461	934
7	50	1750	162	461	623
8	-	900	-	237	-

Tabela C.6: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C6.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2250	284	593	1078
2	75	2250	213	593	809
3	50	2250	142	593	539
4	10	2250	28	593	108
5	100	1700	323	448	1241
6	75	1700	242	448	931
7	50	1700	162	448	621
8	-	900	-	237	-

Tabela C.7: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C7.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2300	279	606	1059
2	75	2300	209	606	794
3	50	2300	140	606	530
4	10	2300	28	606	106
5	100	1700	325	448	1234
6	75	1700	244	448	925
7	50	1700	163	448	617
8	-	900	-	237	-

Tabela C.8: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C8.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2250	277	593	1051
2	75	2250	208	593	789
3	50	2250	139	593	526
4	10	2250	28	593	105
5	100	1700	325	448	1234
6	75	1700	244	448	925
7	50	1700	163	448	617
8	-	900	-	237	-

Tabela C.9: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C9.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2250	277	593	1051
2	75	2250	208	593	789
3	50	2250	139	593	526
4	10	2250	28	593	105
5	100	1650	324	435	1230
6	75	1650	243	435	922
7	50	1650	162	435	615
8	-	900	-	237	-

Tabela C.10: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C10.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2250	273	593	1036
2	75	2250	205	593	777
3	50	2250	137	593	518
4	10	2250	27	593	104
5	100	1750	321	461	1219
6	75	1750	241	461	914
7	50	1750	161	461	609
8	-	900	-	237	-

Tabela C.11: Controle manual de rotação e torque do motor pelo dinamômetro para o C11.

Modo	% Torque	Rotação	Torque	Rotação	Torque
		Motor	Motor	Dinamômetro	Dinamômetro
1	100	2250	271	593	1029
2	75	2250	203	593	772
3	50	2250	136	593	514
4	10	2250	27	593	103
5	100	1600	312	421	1184
6	75	1600	234	421	888
7	50	1600	156	421	592
8	-	900	-	237	-

APÊNDICE D – Resultados da Análise da Variância para o experimento das emissões.

Neste apêndice será apresentado os resultados da ANOVA para as variáveis respostas do experimento das emissões. Nota-se que todas as variáveis respostas diferiram significativamente tanto pelo combustível como pelo modo de operação.

D.1 ANOVA para a variável resposta Oxigênio

Analysis of Variance Table

Response: dados

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
modo	7	31550.7	4507.2	14239944.8	< 2.2e-16	***
tratamento	10	111.9	11.2	35368.8	< 2.2e-16	***
modo:tratamento	70	49.7	0.7	2242.3	< 2.2e-16	***
Residuals	3346	1.1	0.0			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

D.2 ANOVA para a variável resposta Dióxido de Carbono

Analysis of Variance Table

Response: dados

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
modo	7	15764.7	2252.10	13327934.0	< 2.2e-16	***
tratamento	10	8.9	0.89	5262.2	< 2.2e-16	***
modo:tratamento	70	12.3	0.18	1036.9	< 2.2e-16	***
Residuals	3346	0.6	0.00			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

D.3 ANOVA para a variável resposta Opacidade

Analysis of Variance Table

Response: dados

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
modo	7	286922	40989	71611.89	< 2.2e-16	***
tratamento	10	22721	2272	3969.61	< 2.2e-16	***
modo:tratamento	70	16298	233	406.79	< 2.2e-16	***
Residuals	3346	1915	1			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

D.4 ANOVA para a variável resposta Monóxido de Nitrogênio

Analysis of Variance Table

Response: dados

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
modo	7	726980055	103854294	1025106.84	< 2.2e-16	***
tratamento	10	856114	85611	845.04	< 2.2e-16	***
modo:tratamento	70	1519926	21713	214.32	< 2.2e-16	***
Residuals	3346	338986	101			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

D.5 ANOVA para a variável resposta Dióxido de Nitrogênio

Analysis of Variance Table

Response: dados

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
modo	7	3088854	441265	444983.39	< 2.2e-16 ***
tratamento	10	10495	1050	1058.35	< 2.2e-16 ***
modo:tratamento	70	13152	188	189.47	< 2.2e-16 ***
Residuals	3346	3318	1		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

D.6 ANOVA para a variável resposta Monóxido de Carbono

Analysis of Variance Table

Response: dados

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
modo	7	203769748	29109964	188202.9	< 2.2e-16 ***
tratamento	10	2117448	211745	1369.0	< 2.2e-16 ***
modo:tratamento	70	20247947	289256	1870.1	< 2.2e-16 ***
Residuals	3346	517537	155		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

D.7 ANOVA para a variável resposta Hidrocarbonetos

Analysis of Variance Table

Response: dados

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
modo	7	99221	14174	129972.1	< 2.2e-16	***
tratamento	10	2646580	264658	2426767.1	< 2.2e-16	***
modo:tratamento	70	13579	194	1778.8	< 2.2e-16	***
Residuals	3346	365	0			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXOS

ANEXO A – Certificado de qualidade do biodiesel utilizado no ensaio de repetição

CERTIFICADO DE QUALIDADE DE BIODIESEL

OLFA
ALIMENTO E ENERGIA

Olfa S/A - Alimento e Energia

CNPJ: 91.830.836/0006-83

Endereço: BR 153, km 53, Bairro Frinape

CEP: 99700-000

Erechim/RS

Nº do Certificado:	130701
Código do lote:	130701-Olfa

Adquirente:	Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS) Avenida República do Chile, nº 65, 14º andar, Rio de Janeiro/RJ
-------------	--

Descrição do Biodiesel					
Rota:	Metilica	Oleaginoso(s):	Soja (80%)	Gordura suína (5%)	Gordura Bovina 15%

Informações Sobre a Amostra					
Nº do Lote:	130701	Antioxidante:	50ppm	Lacres da Descarga:	894996/894945
Volume Amostra:	1000mL	Tanque:	15	Lacres da Carga:	894932
Validade (7):	30 Dias	Volume do Lote:	2000 m3	Data de Produção:	02/07/2013
Lacre da Amostra Testemunho:	894910/894926	Método de Amostragem:	NBR 14883		

CARACTERÍSTICA	RESULTADO	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO	CODIGO DE CADASTRO DE LABORATÓRIO
Aspecto*	L.II (21,0°C)	-	LII (1)	VISUAL	43
Massa específica a 20°C*	879,9	kg/m³	850 - 900	ASTM D 4052	43
Viscosidade cinemática a 40°C*	4,1103	mm²/s	3,0 - 6,0	NBR10441	43
Teor de água, máx. (2)*	188,9	mg/kg	380	ENISO12937	43
Contaminação total, máx.	23,6	mg/kg	24	EN 12662	50
Ponto de fulgor, min. (3)	159,0	°C	100,0	NBR14598	43
Teor de éster, mín.*	96,63	% massa	96,5	NBR 15764	43
Resíduo de carbono (4)	0,03	% massa	0,050	ASTM D 4530	50
Cinzas sulfatadas, máx.	0,005	% massa	0,020	NBR 6294	50
Enxofre total, máx.	2,2	mg/kg	10	ASTM D 5453	50
Sódio + potássio, máx.*	4,102	mg/kg	5	EN 14538	43
Cálcio + magnésio, máx.*	0,311	mg/kg	5	EN 14538	43
Fósforo, máx.*	0,475	mg/kg	10	EN 14107	43
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx.	1	-	1	ASTM D 130	50
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx. (5)	3	°C	5 (9)	ASTM D 6371	50
Índice de acidez, máx.*	0,35	mg KOH/g	0,50	ASTM D 664	50
Glicerol livre, máx.*	0,013	% massa	0,02	EN 14105	43
Glicerol total, máx.*	0,233	% massa	0,25	EN 14105	43
Mono, di, triacilglicerol*	0,694/0,156/0,195	% massa	0,80/0,20/0,20	EN 14105	43
Metanol ou etanol, máx. (3)*	-	% massa	0,20	EN 14110	43
Índice de Iodo	108,45	g de I ₂ /100g	Anotar	EN 14111	50
Estabilidade à oxidação a 110°C, min. (2)*	8,91	h	6	EN 14112	43

Os resultados aplicam-se exclusivamente aos itens ensaiados. Este documento só poderá ser reproduzido por inteiro.

Observações:

(1) LII - Limpido e isento de impurezas com anotação da temperatura de ensaio. (2) O limite indicado deve ser atendido na certificação do biodiesel pelo produtor ou importador. (3) Quando a análise de ponto de fulgor estiver com valor superior a 130°C, é dispensada a análise de teor de metanol ou etanol. (4) O resíduo foi analisado em 100% da amostra. (5) O limite máximo de 5°C é válido para as regiões Sul, nos meses de Mai, Jun, Jul, Ago e Set, passando a 10°C nos meses de Out e Abr e 14°C nos meses de Jan, Fev, Mar, Nov e Dez. (6) Estas características serão analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil. Se neste período houve mudança de tipo de matéria-prima, a Olfa analisará o número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas. (7) Se o produto não for comercializado no prazo máximo de 30 dias, será novamente analisada a massa específica a 20°C. Caso a diferença encontrada com relação à massa específica a 20°C do Certificado de Qualidade seja inferior a 3,0 Kg/m³, será novamente analisado o teor de água, o índice de acidez e a diferença seja superior a 3,0 Kg/m³, deverá ser realizada a recertificação completa segundo a Resolução de 14/2012. (8) Duas amostras testemunha de 1 litro devidamente lacrada e rotulada serão armazenadas por um período mínimo de 01 mês em local protegido de luminosidade.

Informações Adicionais (Dados Equipamentos de Carregamento)

Sistema mássico de carregamento (1)	9227	Calibrado em:	17/06/2013	Valido até:	17/06/2014
Sistema mássico de carregamento (2)	9228	Calibrado em:	17/06/2013	Valido até:	17/06/2014

Nota: Os ensaios marcados com (*) são realizados em laboratório próprio da Olfa. Os demais ensaios foram realizados pelo laboratório CAMERA S/A. A coluna código de cadastro de laboratório expressa o número do cadastro do laboratório na ANP.

Data de Emissão do Certificado:	04/07/2013	Data de Revisão:	07/06/2013	Data de Elaboração:	23/07/2012
Revisão:	01	Página 01 de 01			

Elaborado	Conferido	Aprovado
Eliane Czyewski	Maiquel Bonato	Maiquel Bonato

Maiquel Bonato

Maiquel Bonato
Coordenador de Laboratório
CRQ Região 5 / 5.202.114

Mateus Henrique Andrich

Mateus Henrique Andrich
Diretor Industrial

ANEXO B – Certificado de qualidade do biodiesel utilizado nos ensaios de desempenho e emissões

CERTIFICADO DE QUALIDADE DE BIODIESEL



Olfar S/A - Alimento e Energia
 CNPJ: 91.830.836/0006-83
 Endereço: BR 153, km 53, Bairro Frinape
 CEP: 99700-000 Erechim/RS

Nº do Certificado:	131205
Código do lote:	131205-Olfar

Adquirente:	Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS) Avenida República do Chile, nº 65, 14º andar, Rio de Janeiro/RJ
-------------	--

Descrição do Biodiesel					
Rota:	Metilica	Oleaginoso(s):	Soja (80%)	Gordura suína (5%)	Gordura bovina (35%)

Informações Sobre a Amostra					
Nº do Lote:	131205	Antioxidante:	50ppm	Lacres da Descarga:	1427915/1427965
Volume Amostra:	1000mL	Tanque:	16	Lacres da Carga:	1427961
Validade (7):	30 dias	Volume do Lote:	2000m ³	Data de Produção:	23/12/2013
Lacre da Amostra Testemunho:	1427949/1427914			Método de Amostragem:	NBR14883

CARACTERÍSTICA	RESULTADO	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO	CODIGO DE CADASTRO DE LABORATÓRIO
Aspecto*	L.II (22,3°C)	-	LII (1)	VISUAL	43
Massa específica a 20°C*	875,5	kg/m ³	850 - 900	NBR7148	43
Viscosidade cinemática a 40°C*	4,4775	mm ² /s	3,0 - 6,0	NBR10441	43
Teor de água, máx. (2)*	149,7	mg/kg	380	ENISO12937	43
Contaminação total, máx.	20,4	mg/kg	24	EN12862	50
Ponto de fulgor, mín. (3)	155,3	°C	100,0	NBR14598	43
Teor de éster, mín.*	97,61	% massa	96,5	EN14103	43
Resíduo de carbono (4)	0,04	% massa	0,050	ASTMD4530	50
Cinzas sulfatadas, máx.	0,002	% massa	0,020	NBR6294	50
Enxofre total, máx.	7,0	mg/kg	10	ASTMD5453	50
Sódio + potássio, máx.*	2,759	mg/kg	5	EN14538	43
Cálcio + magnésio, máx.*	0,035	mg/kg	5	EN14538	43
Fósforo, máx.*	0,997	mg/kg	10	EN14107	43
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx.	1	-	1	ASTMD130	50
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx. (5)	6	°C	5 (9)	ASTMD6371	50
Índice de acidez, máx.*	0,25	mg KOH/g	0,50	ASTMD664	43
Glicerol livre, máx.*	0,008	% massa	0,02	EN14105	43
Glicerol total, máx.*	0,159	% massa	0,25	EN14105	43
Mono. di. triacilglicerol*	0.424/0.175/0.164	% massa	0.80/0.20/0.20	EN14105	43
Metanol ou etanol, máx. (3)*	-	% massa	0,20	EN14110	43
Índice de Iodo	75,92	g de I ₂ /100g	Anotar	EN14111	43
Estabilidade à oxidação a 110°C; mín. (2)*	10,80	h	6	EN14112	43

Os resultados aplicam-se exclusivamente aos itens ensaiados. Este documento só poderá ser reproduzido por inteiro.

Observações:
(1) LII - Limpido e isento de impurezas com anotação da temperatura de ensaio. (2) O limite indicado deve ser atendido na certificação do biodiesel pelo produtor ou importador. (3) Quando a análise de ponto de fulgor estiver com valor superior a 130°C, é dispensada a análise de teor de metanol ou etanol. (4) O resíduo foi analisado em 100% da amostra. (5) O limite máximo de 5°C é válido para a região Sul, nos meses de Mai, Jun, Jul, Ago e Set, passando a 10°C nos meses de Out e Abr e 14°C nos meses de Jan, Fev, Mar, Nov e Dez. (6) Estas características serão analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil. Se neste período houve mudança de tipo de matéria-prima, a Olfar analisará o número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas. (7) Se o produto não for comercializado no prazo máximo de 30 dias, será novamente analisada a massa específica a 20°C. Caso a diferença encontrada com relação à massa específica a 20°C do Certificado de Qualidade seja inferior a 3,0 Kg/m ³ , será novamente analisado o teor de água, o índice de acidez e a diferença seja superior a 3,0Kg/m ³ , deverá ser realizada a recertificação completa segundo a Resolução de 14/2012. (8) Duas amostras testemunha de 1 litro devidamente lacrada e rotulada serão armazenadas por um período mínimo de 01mês em local protegido de luminosidade. Laboratório registrado no CRQ Região 5 sob AFT nº 77679.

Informações Adicionais (Dados Equipamentos de Carregamento)					
Sistema méssico de carregamento (1)	9227	Calibrado em:	17/06/2013	Valido até:	17/06/2014
Sistema méssico de carregamento (2)	9228	Calibrado em:	17/06/2013	Valido até:	17/06/2014

Nota: Os ensaios marcados com (*) são realizados em laboratório próprio da Olfar. Os demais ensaios foram realizados pelo laboratório CAMERA S/A. A coluna código de cadastro de laboratório expressa o número do cadastro do laboratório na ANP.

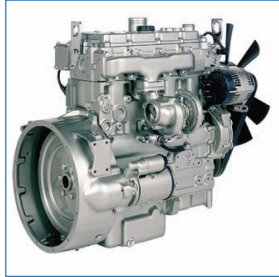
Data de Emissão do Certificado:	31/12/2013	Data de Revisão:	26/11/2013	Data da Elaboração:	23/07/2012
Revisão:	02	Página 01 de 01			

Elaborado	Conferido	Aprovado
Giovana	Maiquel	Maiquel

Maiquel Bonato

Maiquel Bonato
Gerente de Qualidade de Produto
CRQ Região 5 / 5.202.114

ANEXO C – Especificações técnicas do motor utilizado no experimento



1100 Series

1104A-44T

73.5-80.5 kW/98.5-108 bhp

1104A is a 4 cylinder, 4.4 litre family of naturally aspirated and turbocharged engines. It provides a superior successor to the very popular 1004 and 4.41 products. Driven by the requirements of our customers, it has been tailored to meet the needs of the construction, materials handling, and agricultural non-emission legislated markets.

Designed and built to the most demanding standards, the 1104A brings with it significant improvements in all aspects of the engine's performance and operating characteristics.

The family is complemented by a range of power solutions known as 'Industrial Open Power Units' and 'ElectropaKs.'

The 1104A-44T is a 4.4 litre turbocharged engine that delivers improved performance and reduced operating costs, in a quiet and efficient package. It is ideal for a wide range of off-highway applications.

In the 1100 Series, Perkins has designed to perform and delivered with choice.

Flexibility

- The 1100 Series provides a comprehensive platform of engines that enable OEM's to remain flexible, responsive and competitive
- The 1100 Series offers a choice of emissions and non-emissions compliant models with similar hook-up points. Similarity in envelope size, mounting points, fuel, electrical, gaseous and coolant connection points results in lower design and installation costs for the machine manufacturer

Commonality

- Using this single platform concept, the 1104A has been aligned with its successful 1104C emissions-compliant cousin
- The use of many common components, reduces parts variety, inventory levels and servicing costs, benefits that can be passed on to the end customer and their servicing outlets

Performance

- The 1100A engine family meets the demanding needs of markets with no emissions legislation for off-highway machines
- Significant improvements to power, torque and torque back-up

Lower Operating Costs

- Improved cylinder bore finish and piston ring technology, combined with optimized cylinder head and block design have all contributed to significantly lowering fuel and oil consumption levels

Quieter

- The new and improved timing gear train, cylinder block design and use of noise deadening materials are just some of the features contributing to reduced bare engine noise across its operating range

Cleaner

- Reduction in smoke and harmful gaseous emissions from an advanced combustion system design
- Latest gasket and sealing technology ensure a product far cleaner and friendlier to the environment

Quality by Design

Perkins follows a rigorous and comprehensive New Product Introduction process to ensure product integrity. Design, testing and manufacturing process improvements have been adopted in the introduction of the new 1100A engine family. The result is a confidence in a product that is reliable and durable for non-emissions legislated markets

Product Support

- Total worldwide service is provided through a network of 4,000 distributors and dealers.
- TIPSS - The Integrated Parts and Support System enables customers to specify and order parts electronically as well as service engines with on-line guides and service tools.

designed to perform ...
delivered with choice

Performance Data	Gross Intermittent (ISO/TR 14396)	Speed (rev/min)
Power Output (kW)	80.5	2200
Power Output (bhp)	108.0	2200
Peak Torque (Nm)	404.0	1400
Peak Torque (lbf ft)	298.0	1400