

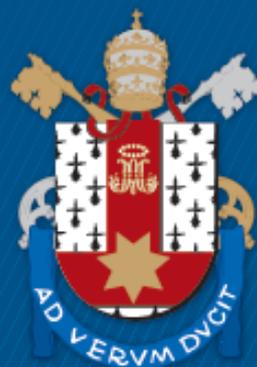
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

JOEL DE OLIVEIRA COSTA

ANÁLISE DOS GASES DA EXAUSTÃO EM UM MOTOR DIESEL COM  
INJEÇÃO COMMON RAIL ALIMENTADO COM DIESEL, BIODIESEL E  
SUAS MISTURAS

PORTO ALEGRE  
OUTUBRO, 2017

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**ANÁLISE DOS GASES DA EXAUSTÃO EM UM MOTOR DIESEL COM  
INJEÇÃO *COMMON RAIL* ALIMENTADO COM DIESEL, BIODIESEL E  
SUAS MISTURAS**

**JOEL DE OLIVEIRA COSTA**

TECNÓLOGO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA  
E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**

**Outubro, 2017**

## Ficha Catalográfica

C837a Costa, Joel Oliveira

Análise dos gases da exaustão em um motor diesel com injeção  
common rail alimentado com diesel, biodiesel e suas misturas /  
Joel Oliveira Costa . – 2017.

105 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.

1. Biodiesel. 2. Diesel. 3. Motor Diesel. 4. Common Rail. 5. Emissões  
de Gases. I. dos Santos, Carlos Alexandre. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecários responsáveis: Marcelo Votto Texeira CRB-10/1974 e Michelângelo Viana CRB-10/1306



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

# **ANÁLISE DOS GASES DA EXAUSTÃO EM UM MOTOR DIESEL COM INJEÇÃO COMMON RAIL ALIMENTADO COM DIESEL, BIODIESEL E SUAS MISTURAS**

**JOEL DE OLIVEIRA COSTA**

TECNÓLOGO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

*O presente trabalho foi alcançado em cooperação com a Hewlett-Packard Brasil Ltda. e com recursos provenientes da Lei de Informática (Lei nº 8.248, de 1991), e vinculado ao Projeto Promobio "Interação Universidade-Escolas para a Pesquisa e Disseminação de Saberes sobre os Biocombustíveis e o Petróleo – Convênio Nº: 01.10.0508.00 – FINEP/CNPq.*

**Porto Alegre  
Outubro, 2017**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

## **ANÁLISE DOS GASES DA EXAUSTÃO EM UM MOTOR DIESEL COM INJEÇÃO COMMON RAIL ALIMENTADO COM DIESEL, BIODIESEL E SUAS MISTURAS**

**CANDIDATO: JOEL DE OLIVEIRA COSTA**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

  
\_\_\_\_\_  
**DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - ORIENTADOR**

### **BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. LUIZ ANTONIO MAZZINI FONTOURA - DO CURSO DE QUÍMICA - ULBRA**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. MARCUS SEFERIN - DO PGETEMA/FENG - PUCRS**

**PUCRS**

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900

Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625

E-mail: [engenharia.pg.materiais@pucrs.br](mailto:engenharia.pg.materiais@pucrs.br)

[www.pucrs.br/feng](http://www.pucrs.br/feng)

*“A teoria também se converte em  
graça material uma vez que se  
apossa dos homens.”  
(Karl Marx)*

## **DEDICATÓRIA**

A minha querida família, pais (Nilo e Otília) e irmãs (Adriana e Eliane), pelo amor dado, por me darem força, incentivar, ensinar e orientar em momentos da minha vida.

A minha esposa Tânia, por ser parceira nesta etapa de minha vida, pela paciência, amor e dedicação.

Ao meu filho Arthur que me inspira na realização deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos, pela orientação, pela paciência, incentivo e amizade.

À Sra. Cláudia Maria P. Meira e Silva, pelo apoio e excelente trabalho realizado junto aos alunos do PGTEMA da PUCRS.

À Universidade PUCRS, pelo incentivo, pelo apoio, e pelos equipamentos utilizados nos ensaios.

Ao Projeto PROMOBIO – FINEP/CNPq pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho realizado.

À empresa Hewlett-Packard Brasil Ltda pelo apoio de recursos para realização deste trabalho.

Ao Centro de Formação Profissional SENAI Automotivo Porto Alegre.

À Diretora Sra. Suzana Sartori, por autorizar e incentivar o trabalho.

Ao Coordenador Sr. Sergio Flor, pela enorme ajuda na disponibilidade de horário para execução de testes e conclusão das disciplinas.

Ao Supervisor Sr. Felipe Andreolla, pela parceria e confiança no trabalho realizado.

Ao Prof. Eng. Paulo Ricardo Podorodezcki pela parceria durante o curso e nos ensaios realizados.

À empresa Fuel Tech pela confiança, parceria, apoio e empréstimo dos equipamentos de aquisição de dados usados durante os testes com os seguintes representantes, Eng. Mecânico Automotivo Sr. Cristian Pereira da Silva e Eng. Elétrico Anderson Frederico Dick.

À empresa OLEOPLAN S.A Óleos Vegetais Planalto pelo fornecimento do Biodiesel utilizado nos ensaios realizados.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>5</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>6</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E NOMENCLATURA .....</b>	<b>13</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1. Objetivos Específicos .....</b>	<b>19</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Motor de Combustão Interna.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2. Sistema de Injeção de Combustível Diesel.....</b>	<b>22</b>
3.2.1. Sistema de Injeção Common Rail.....	22
<b>3.3. Combustíveis.....</b>	<b>24</b>
3.3.1. Diesel.....	24
3.3.2. Biodiesel .....	25
3.3.3. Produção de Biodiesel.....	26
<b>3.4. Principais Propriedades do Biodiesel.....</b>	<b>28</b>
3.4.1. Número de Cetano.....	28
3.4.2. Poder Calorífico .....	30
3.4.3. Viscosidade.....	30
3.4.4. Massa Específica.....	31
3.4.5. Lubricidade .....	31
3.4.6. Teor de Enxofre .....	32
<b>3.5. Emissões de Gases .....</b>	<b>33</b>
3.5.1. Monóxido de Carbono (CO).....	34
3.5.2. Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	35

3.5.3. Óxidos de Enxofre (SO <sub>x</sub> ).....	36
3.5.4. Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) .....	37
3.5.5. Hidrocarbonetos (HC) .....	39
3.5.6. Material Particulado (MP) .....	40
3.5.7. Limites dos Gases Poluentes no Brasil .....	41
<b>3.6. Instrumentação de Parâmetros do Motor .....</b>	<b>43</b>
3.6.1. Sensores de Temperatura .....	43
3.6.2. Condicionador de Sinal.....	44
<b>3.7. Medição das Emissões de Poluentes.....</b>	<b>44</b>
<b>3.8. Análise dos Gases de Motores utilizando Biodiesel.....</b>	<b>45</b>
3.8.1. Monóxido de Carbono (CO) .....	46
3.8.2. Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) .....	48
3.8.3. Dióxidos de Carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	51
3.8.4. Material Particulado (MP) .....	52
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>54</b>
<b>4.1. Materiais.....</b>	<b>54</b>
4.1.1. Ambiente de Trabalho .....	54
4.1.2. Veículo .....	55
4.1.3. Dinamômetro .....	55
4.1.4. Combustíveis Utilizados.....	58
4.1.5. Diesel S10 (B7).....	59
4.1.6. Biodiesel (B100).....	59
4.1.7. Analisador de Gases.....	60
4.1.8. Opacímetro .....	62
<b>4.2. Instrumentação do Motor .....</b>	<b>64</b>
4.2.1. Sensor de Rotação .....	64
4.2.2. Medição de Temperatura.....	65
4.2.3. Temperatura dos Gases do Escapamento .....	67
4.2.4. Condicionador de Sinais de Temperatura .....	68
4.2.5. Aquisição de Dados .....	69
<b>4.3. Métodos.....</b>	<b>72</b>
4.3.1. Preparação das Misturas dos Combustíveis.....	72

4.3.2. Protocolos de Ensaio .....	75
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>79</b>
<b>5.1. Emissões dos Gases de Exaustão .....</b>	<b>79</b>
5.1.1. Monóxido de Carbono (CO) .....	79
5.1.2. Óxido de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) .....	80
5.1.3. Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> ) .....	82
5.1.4. Material Particulado (MP) .....	83
5.1.5. Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	85
<b>5.2. Desempenho do Motor .....</b>	<b>86</b>
5.2.1. Potência do Motor .....	86
5.2.2. Torque do Motor .....	87
<b>5.3. Considerações Finais .....</b>	<b>88</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>92</b>
<b>7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>94</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>
<b>9. APÊNDICE A .....</b>	<b>105</b>
<b>10. APÊNDICE B .....</b>	<b>106</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Sistema de injeção common rail, ilustrando seus principais componentes (FORD 2006).....	23
Figura 3.2. Representação da reação de transesterificação para obtenção de biodiesel. ....	27
Figura 4.1. Visão geral do ambiente de trabalho, destacando o veículo caminhonete Ford F250, posicionado sobre os rolos do dinamômetro, e os sistemas de controle. ....	54
Figura 4.2. Rolos e freio elétrico do dinamômetro BOSCH, modelo FLA 203. ....	57
Figura 4.3. Monitor e gabinete de controle do dinamômetro BOSCH, modelo FLA 203. ....	58
Figura 4.4. Reservatórios de acondicionamento de combustível: (A) reservatório diesel S10; (B) reservatório biodiesel.....	59
Figura 4.5. Sonda e suporte da sonda do analisador de gases TESTO, modelo 350.60	
Figura 4.6. Central de controle do analisador de gases TESTO, modelo 350. ....	61
Figura 4.7. Opacímetro NAPRO, modelo NA 9000. ....	63
Figura 4.8. Sensor piezelétrico posicionado sobre o cabeçote do motor. ....	64
Figura 4.9. Medidor de rotação do analisador NAPRO, modelo Pro 8500.....	65
Figura 4.10. Configuração do canal 6 do datalogger FUEL TECH, modelo Pro, 24 canais.....	66
Figura 4.11. Configuração do canal 5 do datalogger FUEL TECH, modelo Pro, 24 canais.....	67
Figura 4.12. Sensores termopares tipo K instalados no coletor de escape. ....	68
Figura 4.13. Condicionador de sinais de temperatura. ....	69
Figura 4.14. Datalogger FUEL TECH, modelo Pro, 24 canais. ....	70
Figura 4.15. Exemplo do gráfico gerado pelo Datalogger com o motor em ML abastecido com B55.....	71

Figura 4.16. Valores Mínimos e Máximos no Datalogger com o motor em ML abastecido com B55.....	71
Figura 4.17. Fluxograma esquemático da montagem dos testes.....	75
Figura 4.18. Ancoramento do veículo no dinamômetro através de cinta de fixação.	76
Figura 4.19. Formulação das misturas: (A) provetas graduadas, (B) aparato medidor de consumo de combustível.....	77
Figura 5.1. Emissões de monóxido de carbono (CO) para os diferentes combustíveis no regime de 750, 1450, 2000 e 2600 rpm. ....	80
Figura 5.2. Emissões de óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) para os diferentes combustíveis em regime de 750, 1450, 2000 e 2600 rpm. ....	82
Figura 5.3. Opacidade em regime de plena carga nas diferentes rotações para o B7.	84
Figura 5.4. Opacidade em regime de plena carga nas diferentes rotações e % de biodiesel. ....	84
Figura 5.5. Emissões de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) para os diferentes combustíveis no regime de 750, 1450, 2000 e 2600 rpm. ....	85
Figura 5.6. Potência máxima do motor para os diferentes combustíveis (Podorodeczki 2016). ....	86
Figura 5.7. Percentual de potência do motor para os diferentes combustíveis (Podorodeczki 2016). ....	87
Figura 5.8. Percentual de torque do motor para os diferentes combustíveis (Podorodeczki 2016). ....	87
Figura 5.9. Percentual de torque do motor para os diferentes combustíveis (Podorodeczki 2016). ....	88
Figura 5.10. Regressão linear multivariável entre NO <sub>x</sub> e opacidade em função de biodiesel e rpm do motor.....	89
Figura 5.11. Regressão linear multivariável entre CO <sub>2</sub> e NO <sub>x</sub> em função de biodiesel e rpm do motor.....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição do gás de escapamento de motores diesel (BOSCH, 2005).	33
Tabela 3.2. Limites máximo de emissões para motores diesel (PROCONVE, 2006).	42
Tabela 4.1. Características técnicas do motor do veículo F250 utilizado nos testes (FORD, 2006).....	55
Tabela 4.2. Características técnicas do dinamômetro BOSCH, modelo FLA 203 (BOSCH, 2002).....	56
Tabela 4.3. Características técnicas do analisador de gases TESTO, modelo 350 (TESTO, 2013).....	61
Tabela 4.4. Características técnicas do opacímetro NAPRO, modelo NA 9000 (NAPRO, 2013).....	63
Tabela 4.5. Características técnicas do medidor de rotação do motor NAPRO, modelo Pro 8500 (NAPRO, 2013).....	65
Tabela 4.6. Características técnicas do termopar tipo K (KZ ELETRONICS, 2014).	68
Tabela 4.7. Características elétricas do condicionador ETM-1 (FUEL TECH, 2017).	69
Tabela 4.8. Passos de operação do ciclo ESC (ESC, 2015). ....	72
Tabela 4.9. Passos de operação do ciclo utilizado (adaptado da ESC pelo autor)...	73

## LISTA DE SIGLAS E NOMENCLATURA

A/F	Mistura Ar/Combustível ( <i>Air/Fuel</i> )
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGL	Ácidos Graxos Livres
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B7 a B100	Proporção cujo numeral indica o percentual em volume de Biodiesel
CCE	<i>Comissão das Comunidades Europeias</i>
CD	Combustível Diesel
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ELR	<i>Ciclo Europeu de Resposta em Carga</i>
ESC	<i>European Stationary Cycle</i>
ETC	<i>Ciclo Europeu em Regime Transiente</i>
EURO	Norma Europeia de Emissões para Veículos Novos Comercializados na União Europeia
HMN	Heptametilnona
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JBX	Percentual de Jatropha (Mamona) no Diesel Fóssil
JXWX	Percentual de Jatropha no Oleo de Fritura
MME	Ministério de Minas e Energia
NAOA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NBR	Norma Regulamentadora Brasileira
NC	Número de Cetano
NTC	<i>Coeficiente de Temperatura Negativa</i>
PAN	Nitrato de Peroxiacetila
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCR	Principal Combustível de Referência
PCS	Poder Calorífico Superior
PMI	Ponto Morto Inferior

PMS	Ponto Morto Superior
PPM	Partes Por Milhão
PTC	<i>Coeficiente de Temperatura Positiva</i>
RPM	Rotações Por Minuto
U.S.EPA	<i>United States Environmental Protection</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

## RESUMO

OLIVEIRA COSTA, Joel. **Análise dos Gases da Exaustão em um Motor Diesel com Injeção *Common Rail* Alimentado com Diesel, Biodiesel e suas Misturas.** Porto Alegre. 2017. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as emissões de gases de exaustão e materiais particulados em um motor ciclo diesel. Foi utilizado um veículo caminhonete Ford, modelo F250, com motor Diesel Cummins ISB Maxi Power (EURO III), com gerenciamento eletrônico de injeção de combustível *Common Rail*, buscando identificar qual mistura obtém o melhor desempenho ambiental sem comprometer potência e torque. Foram analisados os gases de exaustão CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e material particulado em diferentes regimes de funcionamento do motor, utilizando o óleo diesel comercial (B7 - óleo diesel com 7% em volume de biodiesel) e percentuais de biodiesel até B100. Os procedimentos utilizados nos testes foram baseados na norma ESC (*European Stationary Cycle*) de teste de motores em dinamômetro de chassi. O dinamômetro usado foi da marca BOSCH, modelo FLA 203, em conjunto com analisador de gases da marca TESTO, modelo 350, opacímetro da marca NAPRO, modelo NA 9000, e Datalogger da marca FUEL TECH, 24 canais, modelo Pro. Os resultados mostraram que o monóxido de carbono (CO) teve uma redução de 57,22% com o motor operando com B100 em marcha lenta (750 rpm) e 84,39% na rotação de 2600 rpm, comparado com B7. Os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) tiveram aumentos de 145,43% com B100 a 2600 rpm. O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) apresentou valores próximos a 0 ppm em qualquer um dos regimes do motor. A potência e torque tiveram aumentos de 2,85% e 2,81% com B15 comparado com B7, e com B15 o monóxido de carbono (CO) teve redução de 35,78%, os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) tiveram aumentos de 40,71% e a opacidade redução de 1,9%.

Palavras-Chaves: Biodiesel, Diesel, Motor Diesel, Common Rail, Emissões de Gases.

## ABSTRACT

OLIVEIRA COSTA, Joel. **Exhaust Gas Emission Analizes in a Diesel Engine with Common Rail Injection System Fuelled with Diesel, Biodiesel and Their Blends.** Porto Alegre. 2017. Master Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The presente work aims to evaluate exhaust gas emissions and particulate matters in a diesel cycle engine. A Cummins ISB Maxi Power (EURO III) Ford F250 pickup truck with electronic commom rail fuel injection system was used to identify which blend achieves the best environmental performance without compromising power and torque. The exhaust gases (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) and particulate matters in different engine operating regimes were analyzed using commercial diesel oil B7 (diesel oil with 7% biodiesel volume) and additions of biodiesel up to B100. The procedures used in the tests were based on the ESC (European Stationary Cycle) test of engines in chassis dynamometer. The dynamometer used was the BOSCH model FLA 203, in conjunction with a TESTO model 350 gas analyzer, a NAPRO model NA 9000 opacimeter, and a 24-channel Pro Model FUEL TECH Datalogger. The results showed that the carbon monoxide (CO) had a significant reduction of 57.22% with the engine running with B100 at 750 rpm and 84.39% at 2600 rpm in a regime of 75% of the maximum power compared to B7. Nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) had an increase of 145.43% with B100 at 2600 rpm. Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) produced by the combustion of diesel S10, represents low values, reaching 0 ppm in any of the engine operating regimes operating with the blends. The power and torque of the engine had an increase of 2.85% and 2.81% with the B15 mixture compared to the B7 fuel, even with the B15 we can verify that the carbon monoxide (CO) had a reduction of 35.78%, nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) had an increase of 40.71% and opacity a reduction of 1.9%.

Key-words: Biodiesel, Diesel, Diesel Engine, Common Rail, Gas Emissions.

## 1. INTRODUÇÃO

A partir do crescimento do capitalismo, concomitante com a revolução industrial e o aumento da população. No final do século XIX, com a invenção dos motores de combustão interna, houve uma revolução nos meios de transporte, porém a queima de combustíveis de origem fóssil (petróleo) levou às emissões de poluentes a um nível insustentável, principalmente em motores do tipo ciclo Diesel. A contribuição das emissões provenientes de veículos é hoje mais significativa do que aquela proveniente das atividades industriais (KNOTHE, 2006). Tal fato se deve ao aumento constante da frota circulante nas ruas, especialmente nas grandes cidades, o que faz com que os padrões de emissão regulamentados para alguns poluentes atmosféricos sejam geralmente excedidos. O aumento do transporte de passageiros, bem como o de cargas, levaram a um aumento direto da utilização de diesel como combustível, trazendo consequências desfavoráveis ao meio ambiente e contribuindo para a escassez de petróleo no planeta (CUNHA, 2008).

Durante a década de 1970, foram criadas as primeiras normatizações para regular as emissões de gases poluentes de veículos automotores, que com o passar do tempo, forçaram a indústria automotiva a desenvolver novos sistemas de controle de emissões com tecnologia avançada, como por exemplo, os sistemas de injeção eletrônica de combustível Diesel tipo “*Common Rail*”, os conversores catalíticos e os agentes redutores de emissões de compostos nitrogenados (BOSCH, 2005).

Há uma outra via de redução de emissão de poluentes, que é a substituição dos combustíveis de origem fóssil por combustíveis de origem vegetal ou animal, no caso o biodiesel, uma vez que os mesmos provêm de fontes renováveis de ocorrência natural, gerando redução significativa nas emissões presentes nos gases

de exaustão, com exceção dos óxidos de nitrogênio (KNOTHE, 2006).

Além da redução da emissão de poluentes, o biodiesel apresenta vantagens econômicas, estrategicamente importantes. Devido a matriz de transporte brasileira ser essencialmente baseada em transporte rodoviária, valor próximo a 62% (CNT, 2016), o consumo de óleo diesel impacta bastante na economia, inclusive regulando o preço de produtos e insumos.

Devido a essas vantagens e pelo Brasil ser um país em desenvolvimento, em que a economia tem que ser equilibrada, tem uma posição de destaque na utilização de biodiesel, sendo o segundo mercado produtor e consumidor (MME, 2016), porém o número de pesquisas e patentes brasileiras não é desenvolvido na mesma proporção (INPI, 2008). Pesquisas abrangendo o desenvolvimento dos biocombustíveis como fonte energética vêm ganhando proporções cada vez maiores nos últimos anos. A grande maioria dessas pesquisas, entretanto, restringe-se apenas à investigação de poucos percentuais de biodiesel na mistura, devido as dificuldades de tempo e recursos. As publicações científicas similares às propostas neste trabalho apontam vantagens no uso do biodiesel em relação ao diesel de petróleo (redução significativa dos principais gases poluentes).

O uso do biodiesel como fonte de energia diante do cenário apresentado, surge como uma alternativa viável (em termos ambientais) para substituir o óleo diesel em motores automotivos que operam em ciclo Diesel, pois, além de permitir a redução da dependência do setor de transportes em relação ao petróleo, pode ser considerado um combustível menos poluente ao meio ambiente, em comparação aos de origem fóssil.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar, através da instrumentação dedicada, a emissão dos gases poluentes de um motor de combustão interna Ciclo Diesel operando desde óleo diesel comercial B7 (óleo diesel acrescido de 7% em volume de biodiesel) até B100 (74,5% óleo de soja, 25% gordura animal e 0,5% óleo recuperado e metanol), utilizando um dinamômetro de chassis operando baseado na norma ESC para fazer comparações entre os combustíveis e suas misturas.

### **2.1. Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- ✓ Quantificar e avaliar o desempenho ambiental do motor em cada uma das condições de funcionamento e percentuais de biodiesel na mistura em relação às emissões dos gases CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, e material particulado;
- ✓ Comparar e determinar qual das misturas obtém o melhor desempenho ambiental do motor sem comprometer a eficiência em termos de torque e potência.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo dedica-se a apresentação dos principais temas relacionados aos motores de combustão interna, combustíveis e suas propriedades, bem como análises em motores por meio da instrumentação embarcada e de ensaios controlados.

#### **3.1. Motor de Combustão Interna**

A invenção dos primeiros motores de combustão interna ocorreu no século XIX, impulsionada pelas grandes revoluções que ocorriam em diversas partes do mundo. Em 1876, o Alemão Nikolaus August Otto (1832-1891) patenteou o motor de ignição por centelha que hoje é conhecido por motor ciclo Otto. Em 1892, o Engenheiro francês Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913) patenteou o motor com ignição espontânea, que durou aproximadamente 10 anos para ser desenvolvido (BRUNETTI, 2012). Estes motores são máquinas térmicas que produzem energia mecânica através da energia química presente no combustível, sendo essa energia liberada pela queima controlada de combustível no interior da câmara de combustão.

O motor de combustão interna Ciclo Otto, também chamado de motor de ignição por centelha, é um motor com pistão, com formação interna ou externa de

mistura ar/combustível (A/F). O tempo de formação da mistura e a distribuição do combustível para os cilindros e na câmara de combustão são fatores importantes que influenciam o grau de homogeneização que pode ser atingido pela formação interna da mistura (BOSCH, 2005). Esta mistura que está no interior do cilindro, é comprimida e ignitada pela centelha.

O motor Ciclo Diesel é um motor com pistão alternativo, com a formação de mistura no interior dos cilindros, o ar é admitido no primeiro tempo que é chamado de admissão. Durante o segundo tempo que é chamado de compressão, o ar admitido é comprimido à pressões entre 30 e 55 bar nos motores aspirados naturalmente, ou entre 80 e 110 bar em motores sobrealimentados, fazendo com que a temperatura do ar admitido aumente para valores entre 700°C e 900°C. Esta temperatura é suficiente para induzir à auto-ignição no combustível injetado nos cilindros um pouco antes do final do tempo de compressão, quando o pistão se aproxima do ponto morto superior (PMS). No motor Diesel, a formação de mistura é importante para determinar a qualidade da combustão e a eficiência com que o ar da admissão é introduzido no interior dos cilindros para a definição dos níveis disponíveis de pressão média efetiva (PME) (BOSCH, 2005).

Após testes realizados em sua invenção abastecido com óleo de amendoim Rudolf Diesel afirma que "o motor a diesel pode ser alimentado com óleos vegetais e poderá ajudar consideravelmente o desenvolvimento da agricultura nos países onde funcionar. Isto parece um sonho do futuro, mas eu posso predizer com inteira convicção, que esse modo de emprego do motor Diesel pode, num dado tempo, adquirir uma grande importância".

### **3.2. Sistema de Injeção de Combustível Diesel**

No processo de combustão de um motor Diesel, o combustível deve ser injetado diretamente na câmara de combustão com alta pressão, de forma precisa e com quantidade certa conforme o regime de rotação. Até os anos 1980, a maioria dos sistemas de injeção se baseavam em sistemas completamente mecânicos, sempre ajustando o volume de combustível a ser injetado através de reguladores centrífugos, dependentes da rotação. Porém, a partir de leis de emissões de poluentes mais rigorosas, exigindo o controle de gases poluentes, os sistemas se desenvolveram, primeiramente em sistemas semi-eletrônicos, sendo os reguladores centrífugos substituídos por reguladores eletrônicos, o conjunto mecânico monitorado e ajustado eletronicamente, evoluindo até os sistemas atuais, onde o controle de injeção é totalmente eletrônico, sendo o sistema de injeção chamado de “common rail”, o estado da arte dos sistemas de gerenciamento (BOSCH, 2005).

#### **3.2.1. Sistema de Injeção Common Rail**

Segundo Podorodeczki (2016), o sistema de injeção eletrônica Diesel chamado de Common Rail, caracteriza-se por um controle maior da pressão de injeção no cilindro, bem como a sua geração de pressão de combustível que pode ser regulada e acumulada independente da rotação do motor e também da quantidade de diesel a ser injetado, diferentemente dos sistemas anteriores. O diferencial do sistema está em gerar e controlar a alta pressão através de uma bomba com válvula de controle, pilotada eletronicamente pela central de injeção do motor, que conforme a solicitação a que o motor está sendo submetido, envia essa pressão controlada para o tubo acumulador e distribuidor de combustível (common

rail). Como o controle de injeção de combustível é feito através da variação de volume e pressão que oscila de 400 a 2300 bar, ou seja, superior aos sistemas mecânicos que trabalham de 170 a 400 bar, naturalmente consegue-se diminuir significativamente as emissões de gases nocivos nos motores devido à atomização do combustível com a massa de ar admitida. Na Figura 3.1 pode-se ver uma ilustração do sistema de injeção eletrônica common rail com todos os seus componentes.

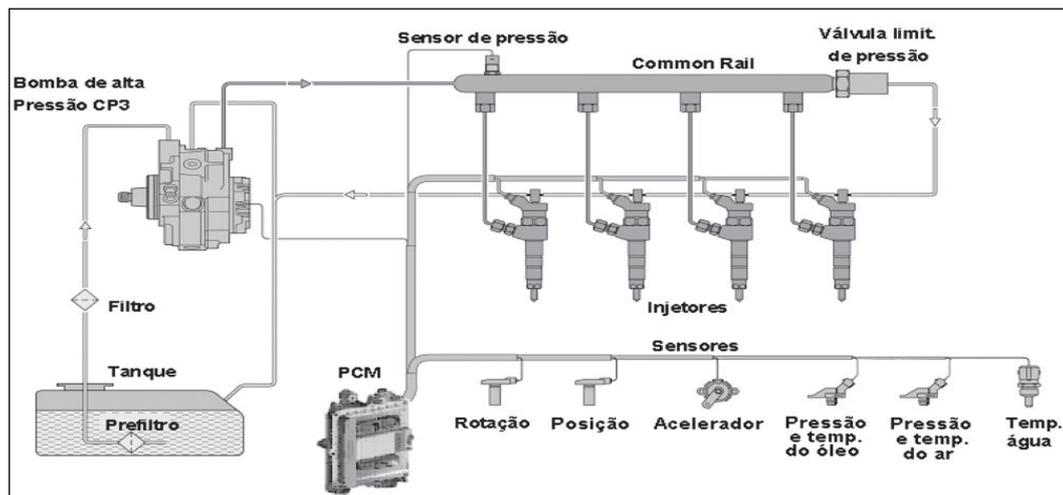


Figura 3.1. Sistema de injeção common rail, ilustrando seus principais componentes (FORD 2006).

A principal vantagem do sistema *Common Rail* em relação aos sistemas convencionais é que a pressão e o volume de injeção podem ser determinados de modo independente para cada ponto de operação do motor, oferecendo assim um grau de liberdade para a formação da mistura. Além disso, o volume e a pressão podem ser reduzidos no início da injeção (durante o atraso da ignição entre o início da injeção e início da combustão). Tudo isso contribui para que o motor tenha seu

máximo rendimento, com o menor ruído de operação e menor índice de emissões de poluentes.

Segundo o Manual de Serviço Ford (2006), a pré-injeção consiste em injetar uma quantidade pequena de combustível, aproximadamente  $1\text{mm}^3$  antes da injeção principal, fazendo com que ocorra uma breve combustão e aumento de pressão e temperatura na câmara de combustão. O combustível da injeção principal inicia imediatamente uma combustão mais homogênea e mais completa com o máximo de rendimento, resultando em maior potência, torque e economia de combustível.

### **3.3. Combustíveis**

#### **3.3.1. Diesel**

O combustível diesel convencional (diesel fóssil) é um produto da destilação do petróleo, possui ponto de ebulição entre o querosene e os óleos lubrificantes, entre  $180^{\circ}\text{C}$  e  $360^{\circ}\text{C}$ . Trata-se de uma fração que é destilada dentre os componentes intermediários do processo de craqueamento; assim, este produto também é chamado de “destilado intermediário” (LANE, 1980).

Segundo a ANP (2014), o óleo diesel está regulamentado através de seu teor de enxofre, sendo para venda e distribuição para uso rodoviário, o S-500 e o S-10, cuja sigla identifica a quantidade de enxofre em miligramas por quilograma (ppm de combustível). É um produto que possui pouca inflamabilidade, pouca volatilidade, média toxicidade, límpido, sendo isento de material em suspensão e com odor característico.

### 3.3.2. Biodiesel

É definido como biodiesel um combustível composto de alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de gorduras de origem vegetal ou animal (ANP nº 45, 2014). O biodiesel foi desenvolvido em trabalhos realizados na Bélgica e em sua antiga colônia, o Congo Belga, conhecido como Zaire depois de sua independência, e que merecem reconhecimento muito maior do que têm recebido na literatura internacional. A patente belga 422.877, concedida em 31 de agosto de 1937 ao pesquisador Charles G. Chavanne (Universidade de Bruxelas, Bélgica), representa o primeiro relato do que hoje é conhecido como biodiesel. Ele descreve o uso de ésteres etílicos de óleo de palma como combustível análogo ao petrodiesel. Estes ésteres foram obtidos do óleo de palma por transesterificação em meio ácido, e maiores detalhes desta pesquisas foram publicados posteriormente (CHAVANNE, 1938).

A partir da década de 1990, vários países no mundo começaram a apresentar significativas ações e avanços na produção e uso de biodiesel, motivados pela consolidação do conceito de desenvolvimento sustentável e pela preocupação com as limitações do uso dos combustíveis não renováveis. Seguindo essa tendência, no Brasil, um Decreto da Presidência da República instituiu um Grupo de Trabalho Interministerial encarregado de apresentar estudos sobre a viabilidade da utilização do biodiesel como fonte de energia no país. No ano de 2004, o governo federal lançou o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), com o objetivo de implementar, de forma técnica e economicamente sustentável, a produção e uso do biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, via geração de renda e empregos (PORTAL DO BIODIESEL, 2010).

Assim, com a Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética do país, com o fortalecimento da participação das fontes renováveis, adquire caráter de política pública e estratégia energética (BRASIL, 2005).

### 3.3.3. Produção de Biodiesel

Diesel, já no início do século XX, havia sugerido que seu motor pudesse admitir não apenas derivados do petróleo, mas também óleos vegetais. Estes últimos, porém apresentam uma viscosidade aproximadamente dez vezes superior ao petrodiesel, e problemas como baixa atomização, combustão incompleta e formação de gomas e resíduos de carbono podem estar associados ao seu uso.

Há quatro métodos para reduzir a alta viscosidade de óleos vegetais e assim, permitir o seu uso em motores diesel sem problemas operacionais, como a formação de incrustações e depósitos, sendo: a) uso de misturas binárias com o petrodiesel, b) pirólise (craqueamento térmico), c) microemulsificação (ou mistura co-solvente), e d) transesterificação (SCHWAB *et al.*, 1987). A transesterificação é o método mais comum, e apenas este leva a produtos comumente denominados biodiesel, isto é, ésteres alquílicos de óleos e gorduras.

O processo de transesterificação consiste na reação de um éster com álcool de cadeia curta, que pode ser etanol ou metanol, com óleo vegetal ou gordura animal, normalmente na presença de um catalisador, ocorrendo assim a formação final de mono-álquil ésteres e glicerol (ou glicerina). Para que ocorra uma reação estequiométrica de transesterificação são necessários 3 moles de álcool para cada mol de triglicerídeos, formando então 3 moles de ésteres de ácidos graxos e 1 mol

de glicerina residual (PINTO *et al.*, 2005). Como a reação de transesterificação é reversível é usado geralmente um excesso de álcool para que ocorra a formação dos produtos (DABDOUB *et al.*, 2009).

Além de óleos vegetais e gordura animal, outros materiais como óleos utilizados para a cocção de alimentos (fritura) também são adequados para a produção de biodiesel; no entanto, mudanças no procedimento de reação são frequentemente necessárias devido a presença de água e de ácidos graxos livres (AGL). O esquema geral da reação de transesterificação esta apresentado na Figura 3.2.

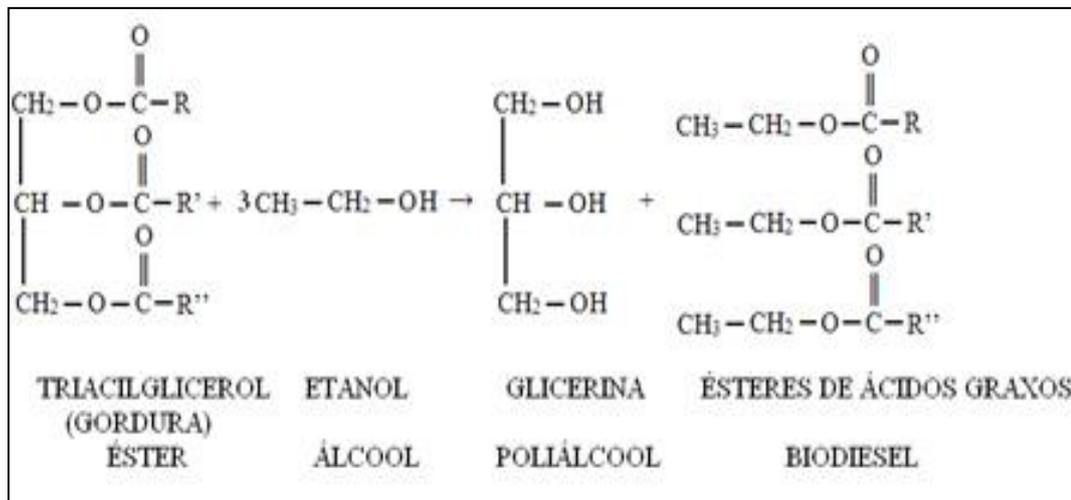


Figura 3.2. Representação da reação de transesterificação para obtenção de biodiesel.

Geralmente, a transesterificação pode ser realizada por catálise ácida ou básica. No entanto, em catálise homogênea, catalisadores alcalinos (hidróxidos de sódio e de potássio; ou alcóxidos correspondentes) proporcionam processos mais rápidos que catalisadores ácidos (CANAKCI *et al.*, 1999). Para a transesterificação proporcionar rendimentos máximos, o álcool deve ser livre de umidade e o conteúdo

de AGL do óleo vegetal deve ser inferior a 0,5% para catalise alcalina.

Da mesma forma, a reação de triacilgliceróis com a água pode formar AGL porque estas substâncias também são ésteres. A 32°C, a transesterificação atinge 99% de rendimento em 4 h quando catalisador alcalino é empregado (NaOH ou NaOMe). Em temperaturas de 60°C, empregando óleos vegetais refinados em razões molares álcool: óleo de pelo menos 6:1, a reação pode se completar em 1 h, fornecendo ésteres metílicos, etílicos ou butílicos (CANAKCI *et al.*, 1999). Apesar de que os óleos brutos também possam ser transesterificados, os rendimentos de reação são geralmente reduzidos, devido à presença de goma e materiais de outra natureza química no óleo vegetal. Estes parâmetros (temperatura de 60°C e razão molar de 6:1 metanol:óleo) têm se definido como uma condição padrão para a transesterificação metílica comumente divulgadas na literatura (KURZ, 1937).

### **3.4. Principais Propriedades do Biodiesel**

#### **3.4.1. Número de Cetano**

O número de cetano (NC) geralmente é um indicativo adimensional da qualidade da ignição de um combustível. Como tal, representa um excelente indicador da qualidade do combustível diesel (CD). Uma escala, denominada NC, conceitualmente similar à escala de octanagem utilizada para gasolina, foi estabelecida para descrever a qualidade de ignição de petrodiesel e seus componentes. O hexadecano ( $C_{16}H_{34}$ ; designado por cetano e que dá à escala o seu nome), um hidrocarboneto longo de cadeia linear, é considerado o padrão de alta qualidade de PCR (principal combustível de referência); e a ele é atribuído um NC de 100 (PUCKETT, 1948). No outro lado da escala, há o 2,2,4,4,6,8,8

heptametilnonano (HMN, também  $C_{16}H_{34}$ ), um composto altamente ramificado com péssima qualidade de ignição em motores diesel, com NC de 15, sendo este também considerado um PCR. O NC de um CD é determinado pelo tempo de retardo da ignição, isto é, pelo tempo que passa entre a injeção do combustível nos cilindros e a ocorrência da ignição. Quanto menor o tempo de retardamento da ignição, maior o valor de NC e vice-versa. Se o NC for muito alto, a combustão pode ocorrer antes do combustível e o ar estarem apropriadamente misturados, resultando em combustão incompleta e na emissão de fumaça. Se for muito baixo, podem ocorrer falhas no motor, trepidação, aumento excessivo da temperatura do ar, aquecimento lento do motor ao ser acionado e também, fenômeno de combustão incompleta.

Padrões têm sido estabelecidos em todo mundo para determinação do NC, por exemplo, a norma ASTM D613 (ASTM D613) nos Estados Unidos, e internacionalmente a norma ISO 5165 (ISO 5165) da Organização Internacional da Padronização (ISO). Na norma ASTM, hexadecano e HMN são os compostos de referência. A norma ASTM D975 (ASTM D975) para CD convencionais exige um NC mínimo de 40, enquanto as especificações de biodiesel prescrevem um mínimo de 47 (ASTM D6751) ou 51 (EN 14214), o biodiesel pode ter um NC entre 8 a 10 % maior que o diesel fóssil dependendo da matéria(LADOMMATOS, 1996).

No Brasil, o diesel S10 é uma mistura de diesel A (combustível isento de biodiesel) com biodiesel no teor de 8%, em volume, este atende a especificação conforme método utilizado pela norma ASTM D613, ASTM D6890, ASTM D7170 e D7668, e exige o NC mínimo de 48, segundo a resolução ANP nº 30, (2016).

### 3.4.2. Poder Calorífico

O poder calorífico é a quantidade de energia química disponível e liberada por um combustível por unidade de massa na hora da combustão. Segundo trabalho de Martins (2006), existem 2 tipos de poder calorífico, o superior e inferior. O poder calorífico superior é definido pela soma da energia libertada na forma de calor e a energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de oxidação, já o poder calorífico inferior despreza a energia gasta na vaporização da água.

O poder calorífico é importante, pois para um combustível de menor valor, haverá um consumo maior, o poder calorífico do biodiesel é menor que o diesel fóssil isso faz com que o motor tenha uma potência menor quando opera com percentuais elevados de biodiesel segundo (TZIOURTZIOUMIS *et al.*, 2012).

### 3.4.3. Viscosidade

A viscosidade é definida como a propriedade que descreve como se comporta a resistência do fluido ao seu escoamento. Esse parâmetro exerce grande influência sobre a forma como o combustível é pulverizado na câmara de combustão. Bosch (2005) indica que a viscosidade baixa provoca perda de potência e eficiência do motor, pois ocorrerá vazamentos internos no sistema de injeção de combustível; Por outro lado, uma viscosidade alta causa mudança no padrão de pulverização, devido a formação de gotículas maiores, atomização pobre e alta penetração do jato do combustível na câmara de combustão. Esse efeito dificulta a mistura do ar com o combustível, acarretando uma combustão pobre, acompanhada de perda de potência e desperdício de combustível, sendo este o caso quando se

utiliza o biodiesel, onde geralmente as viscosidades tendem a ser mais altas que o óleo diesel.

#### **3.4.4. Massa Específica**

É definida como a quantidade de massa por unidade de volume, podendo ocorrer variações devido à mudanças de temperatura e pressão. A resolução ANP nº 50 (2013) determinou, conforme a norma NBR 14065, a massa específica para o combustível diesel S10 de 815 a 850 kg/m<sup>3</sup>, e a resolução ANP nº 45 (2014), também pela norma NBR 14065, determina para o biodiesel o valor de 850 a 900 kg/m<sup>3</sup>.

A massa específica do combustível possui uma relação com o poder calorífico. Segundo Martins (2006), combustíveis com massa específica mais alta, aumentam o poder calorífico, conseqüentemente podem aumentar tanto a potência do motor quanto o aumento de material particulado.

#### **3.4.5. Lubricidade**

A lubricidade pode ser definida de diversas maneiras. “A lubricidade é a habilidade de um líquido em fornecer lubrificação hidrodinâmica e/ou contato para prevenir o desgaste entre partes que se movem”, também pode ser definida como: “habilidade de reduzir a fricção entre superfícies sólidas em movimento relativo” (CHEVRON, 1998). Outra definição é a “qualidade que evita o desgaste quando duas partes metálicas em movimento entram em contato entre si” (LE PERA, 2000).

A produção de um combustível diesel com baixo teor de enxofre pode de fato

reduzir a lubricidade do combustível (KEITH *et al.*, 1995). Em 1993, a lubricidade do diesel caiu significativamente nos Estados Unidos quando foi exigido o uso de combustíveis diesel que apresentassem valores inferiores a 500 ppm de enxofre.

Embora se pensasse que a viscosidade do combustível diesel estava relacionada com a lubricidade (LACEY *et al.*, 2000), vários pesquisadores observaram que a lubricidade é fornecida pelo teor de outros componentes do combustível, como substâncias policíclicas aromáticas que contêm enxofre, oxigênio e nitrogênio. Foi demonstrado que o oxigênio e o nitrogênio conferem uma lubricidade natural ao combustível diesel (MITCHELL, 2001).

É importante observar que alguns sistemas de injeção de motores diesel dependem inteiramente do combustível diesel para lubrificar as partes móveis internas do sistema de alimentação, onde operam com grande precisão a altas temperaturas e altas pressões (LE PERA, 2000). Foi evidenciado em vários países um aumento de problemas de desgastes relacionados à lubricidade quando as frotas passaram a utilizar combustível diesel de baixos teores de enxofre para reduzir a emissão de poluentes (KNOTHE, 2006 *apud* Anônimo, 2002). As bombas injetoras rotativas foram as que apresentaram maiores problemas devido ao desgaste por má lubrificação segundo Le Pera (2000).

#### **3.4.6. Teor de Enxofre**

Os combustíveis de origem fóssil, como o diesel, são formados principalmente por moléculas de carbono e hidrogênio, entretanto há contaminantes como o Enxofre, o Nitrogênio e o Oxigênio que estão intrínsecos no combustível. Martins (2006) cita que o enxofre é indesejável no processo de combustão devido à

ação corrosiva dos novos sistemas de injeção eletrônica diesel e sua capacidade de se ligar quimicamente a outros produtos da combustão para a formação de gases tóxicos como o  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre) e o  $\text{SO}_3$  (trióxido de enxofre), que por sua vez na presença de água, forma ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), que é um ácido forte, corrosivo e altamente poluente no meio ambiente. Devido a essas dificuldades técnicas, a resolução (ANP nº 50, 2013) institui a comercialização do diesel S10, com limite máximo de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  de enxofre em sua composição .

### 3.5. Emissões de Gases

Os gases de exaustão são produzidos em motores à gasolina, álcool, gás natural veicular (GNV) e diesel, quando o combustível é oxidado no interior do cilindro no momento da combustão. Estes gases contêm diferentes produtos de combustão e alguns deles são caracterizados como poluentes.

A Tabela 3.1 apresenta os valores típicos na composição dos gases de escapamento de motores diesel em regime de marcha lenta e na potência máxima, segundo Bosch(2005).

Tabela 3.1. Composição do gás de escapamento de motores diesel (BOSCH, 2005).

Componentes do gás de escapamento	Em marcha lenta	Na potência máxima
Monóxido de carbono (CO)	100...450 ppm	350...2.000 ppm
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	...3,5 vol.%	12...16 vol.%
Óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ )	50...200 ppm	600...2.500 ppm
Hidrocarbonetos (HC)	50...500 ppm	< 50
Vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ )	2...4 vol.%	...11 vol.%

Oxigênio (O <sub>2</sub> )	18 vol.%	2...11 vol.%
Quantidade de fumaça	≤ 0,5	2...3
Temperatura do gás	100...200 °C	550...800°C

### 3.5.1. Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono é um gás incolor, inodoro e insípido em condições ambientes de temperatura e pressão. Reduz a capacidade do ser humano de absorver oxigênio no sangue, provocando envenenamento. Inalar ar com uma concentração volumétrica de 0,3% de CO pode provocar a morte por asfixia em 30 min (BOSCH, 2005). Por ser um subproduto resultante da combustão incompleta de combustíveis, em locais que apresentam congestionamentos intensos onde a rotação dos motores é baixa diminuindo assim a eficiência da combustão, as concentrações podem chegar a 50 - 100 ppm e, em condições normais, a concentração é de 0,01 ppm (MANAHAN, 2001).

A formação de CO ocorre quando o A/F (mistura ar/combustível) é menor que o ideal, isso ocorre durante a partida dos veículos, e áreas de grandes altitudes onde o ar é mais rarefeito (MANAHAN, 2001). Nos Estados Unidos, a emissão de CO é gerada de fontes móveis, onde os veículos automotores são responsáveis por mais de 90% deste gás, conforme relatório da Agência de Proteção Ambiental Americana (U.S.EPA, 1993). No Brasil, o cenário não ficou diferente, sendo que na cidade de São Paulo foi encontrado na região mais de 90% do total de CO proveniente da frota de veículos automotores (ÁLVARES JUNIOR *et al.*, 2002).

Segundo o PROCONVE (2011), antes da implantação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, a média da emissão de

monóxido de carbono de um veículo era de  $54 \text{ g km}^{-1}$ , em 2011 os valores estavam em média  $0,375 \text{ g km}^{-1}$ . Mesmo com o aumento da frota dos veículos automotores para 70.543.535 unidades, esses resultados fizeram com que tivesse condições de exercer melhor o controle da emissão do monóxido de carbono, garantindo assim a qualidade do ar nas grandes cidades brasileiras.

### 3.5.2. Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

Por não ser um gás tóxico aos seres humanos, muitas vezes não é levado em consideração em algumas análises, sendo também chamado de não poluente. Entretanto, ele é considerado como uma das causas do efeito estufa e está associado à mudança climática global. Desde 1920, o teor de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumentou aproximadamente 20%, com mais de 360 ppm em 1995. Alguns consideram a possibilidade de aumento do CO<sub>2</sub> durante este século podendo duplicar ou triplicar os níveis atuais (REAY *et al.*, 2007).

Segundo a NAOA (2017) - Administração Oceânica e Atmosférica Nacional, que é uma instituição governamental que faz parte do Departamento de Comércio dos Estados Unidos, no final de 2016 os níveis de dióxido de carbono medidos no observatório atmosférico Mauna Loa aumentaram 3 partes por milhão, chegando a 405,1 partes por milhão (ppm), um aumento que corresponde ao salto recorde observado em 2015.

A emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera pode ser de fontes naturais, como a queima de biomassa proveniente dos incêndios florestais de origem natural, atividades vulcânicas, respiração animal e vegetal. As atividades antropogênicas de mudança de uso e ocupação do solo, especialmente o desmatamento e as queimadas são

responsáveis por quase 90% das perdas de carbono desde o século XIX. Outra fonte de emissão é decorrente das termo elétricas utilizadas nos países industrializados, da indústria, setor de transporte e da queima de biomassa (REAY *et al.*, 2007).

### 3.5.3. Óxidos de Enxofre (SO<sub>x</sub>)

São considerados dois poluentes atmosféricos: o SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) e o SO<sub>3</sub> (trióxido de enxofre). O SO<sub>2</sub> representa cerca de 95% da quantidade que é emitida na atmosfera, com periculosidade para os animais e vegetais (MING-HO, 2005).

Anualmente em decorrência da queima de óleo residual e de carvão, são emitidas na atmosfera global aproximadamente 100 milhões de toneladas de óxido enxofre (em especial SO<sub>2</sub>). Os motores de combustão interna ciclo Diesel fizeram parte da fonte de emissão de enxofre na atmosfera até a década de 70, logo a comunidade Europeia (C.E) estabeleceu diretrizes para valores máximos de enxofre nos combustíveis diesel e gasolina. Foi regulamentado o valor máximo de 350 ppm de enxofre para o combustível diesel e 150 ppm para gasolina. Após 2005, estes valores foram reduzidos para 150 ppm para os dois combustíveis e até 2010, reduzindo o valor para 10 ppm (FENGER, 2009).

A exposição ao SO<sub>2</sub>, pode causar a irritação das vias respiratórias, especialmente em pessoas que apresentam alguma doença crônica como bronquite e asma (MANAHAN, 2001). Segundo Ming-Ho, 2005, evidências epidemiológicas observadas durante episódios de smog (neblina com concentração elevada de poluentes) na cidade de Londres, sugerem que o SO<sub>2</sub> pode causar efeitos adversos

à saúde a partir de 0,19 ppm (considerando um tempo de exposição de 24 h), quando associado com altos níveis de material particulado. Concentrações entre 0,10 ppm e 0,18 ppm podem alterar as funções pulmonares. Tais efeitos podem advir somente da exposição ao SO<sub>2</sub> ou podem ser causados com a formação do óxido em H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

No Brasil, a ANP, 2009 estabelece quatro diferentes tipos comerciais de diesel, em função de seu conteúdo de enxofre. O diesel com até 10 mg kg<sup>-1</sup> (S10) de enxofre, enquanto o diesel com teor de enxofre máximo de 50 mg kg<sup>-1</sup> (S50), o (S500) com teor de enxofre máximo de 500 mg kg<sup>-1</sup>. O diesel cujo teor de enxofre é de 1800 mg kg<sup>-1</sup> (S1800) não é mais comercializado na maioria das cidades brasileiras até final de 2013. Desde de janeiro de 2014, o óleo diesel S1800 deixou de ser comercializado como óleo diesel de uso rodoviário e foi integralmente substituído pelo S500.

#### **3.5.4. Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)**

O monóxido de nitrogênio (NO) é incolor, inodoro e na presença de O<sub>2</sub> é rapidamente convertido em dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), um gás tóxico de cor marrom-avermelhado, com forte odor que ataca os alvéolos pulmonares (NAJJAR, 2011).

Segundo Ming-Ho (2005), o nitrogênio pode ser encontrado na atmosfera sob seis formas: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); trióxido de nitrogênio (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), tetróxido de nitrogênio (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) e pentóxido de nitrogênio (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Destas seis formas, o NO e NO<sub>2</sub> são chamados de (NO<sub>x</sub>) e é importante

lembrar que são os poluentes atmosféricos de importância significativa de toxicidade e reatividade (SCHNELLE Jr. e BROWN, 2002).

As principais fontes emissoras de NO<sub>x</sub> em áreas urbanas são os veículos automotores à diesel, uma vez que as grandes pressões e temperaturas do interior da câmara de combustão favorecem a formação destes compostos (ÁLVARES JR, LACAVA e FERNANDES, 2002).

Processos de combustão tendem a emitir baixas concentrações de NO<sub>2</sub> em relação aos valores de NO, mas ao entrar em contato com o oxigênio do ar, as moléculas de NO logo se convertem em NO<sub>2</sub> e, por este motivo, as taxas de emissão são sempre calculadas considerando ambos os compostos como sendo apenas NO<sub>2</sub>.

O NO<sub>2</sub> é um precursor do ácido nítrico na atmosfera, sendo, assim como o SO<sub>2</sub>, um contribuinte para a formação de chuva ácida. Ainda, os NO<sub>x</sub> reagem fotoquimicamente dando origem ao *smog* fotoquímico, fenômeno que engloba também outros poluentes secundários como o ozônio troposférico (O<sub>3</sub>), o nitrato de peroxiacetila (PAN) e outros agentes oxidantes (SCHNELLE Jr. e BROWN, 2002).

A inalação de altas concentrações de O<sub>3</sub> pode causar, a curto prazo, alterações nas funções pulmonares (reversíveis), bem como inflamação dos pulmões (KINNEY, 2008). Isoladamente, o NO, apesar de apresentar menor toxicidade quando comparado ao NO<sub>2</sub>, é capaz de atacar a hemoglobina (assim como o CO) e reduzir a eficiência do transporte de oxigênio pelas células (MANAHAN, 2000). Em relação ao NO<sub>2</sub>, exposições a uma concentração entre 50 a

100 ppm por um período de até uma hora podem causar inflamações severas no pulmão, que podem durar de 6 a 8 semanas.

Exposições a concentrações maiores, segundo a U.S. EPA (2010), a exposições agudas ao NO<sub>2</sub> (que variam de 30 min a 24 h) ocasionam efeitos adversos tais como inflamação das vias respiratórias em pessoas saudáveis e aumento dos problemas respiratórios em asmáticos. Além disso, as concentrações de NO<sub>2</sub> nos veículos nas proximidades das rodovias podem ser aproximadamente 2,5 vezes maiores que aquelas medidas por monitores localizados em áreas distantes, em virtude da liberação deste gás pelos escapamentos. Estima-se que as concentrações de NO<sub>2</sub> num raio de 50 m das estradas possam ser de 30 a 100% superiores às concentrações encontradas em ambientes mais afastados do tráfego intenso.

### **3.5.5. Hidrocarbonetos (HC)**

Os hidrocarbonetos (HC) são originados por uma combustão incompleta, seja por falta ou excesso de oxigênio na mistura. Podem ser formados de partes de combustíveis que foram absorvidos pelo óleo lubrificante do motor ou pelas partes que ficam presas nas folgas entre o pistão e o cilindro durante a compressão (HEYWOOD, 1988).

Os HC podem ser emitidos para a atmosfera tanto por fontes biogênicas (incêndios florestais, processos metabólicos de espécies vegetais, etc), como por fontes antropogênicas, onde se destacam atividades de estoque e combustão de combustíveis fósseis, refino de petróleo, pinturas e uso de solventes, processos de

incineração e queima de materiais orgânicos, evaporação, entre outros (ÁLVARES JR, LACAVA e FERNANDES, 2002; MING-HO, 2005).

### **3.5.6. Material Particulado (MP)**

É um dos poluentes que apresentam maiores riscos ao meio ambiente. O termo material particulado refere-se ao conjunto de micropartículas sólidas e líquidas suspensas no ar, compreendendo ácidos, compostos orgânicos, metais, partículas de solo, poeira e pólen.

De modo geral, a exposição aguda a este tipo de poluente está relacionada ao desenvolvimento de crises asmáticas, agravamento de doenças pulmonares e aumento da vulnerabilidade às doenças respiratórias. Exposições prolongadas podem levar ao comprometimento das funções pulmonares, causar bronquite crônica e diminuir a expectativa de vida do indivíduo (U.S.EPA, 2003). De acordo com *World Health Organization* (WHO), o material particulado age predominantemente sobre o sistema respiratório e cardiovascular, sendo que a suscetibilidade da população afetada depende do estado geral de saúde e da idade do indivíduo (WHO, 2006).

São formados pela combustão incompleta e tem a maior presença nos motores de ciclo Diesel. Os materiais particulados são facilmente visualizados em forma de fumaça de cor escura, também conhecido como fuligem. São contaminantes mecânicos que afetam os pulmões, além de serem cancerígenos (HEYWOOD, 1988).

Segundo Carvalho *et al.* (2003), o material particulado é basicamente

constituído de aglomerados de núcleo de carbono, hidrocarbonetos, enxofre e água. Pode ser subdividido em duas fases, uma fase insolúvel que é apresentada na forma sólida, formada por carbono e espécies orgânicas (sulfatos e metais) resultante do desgaste dos componentes e dos aditivos do óleo lubrificante do motor, já a fase solúvel é formada por hidrocarbonetos dos combustíveis e do óleo lubrificante.

O material particulado é formado sob altas temperaturas e em regiões da câmara de combustão onde a mistura está rica, ocorre o processo de formação de material particulado em cada gota individual de combustível em seis etapas: pirólise, nucleação, crescimento da superfície, coalescência, aglomeração e oxidação (MENEZES, 2009).

### **3.5.7. Limites dos Gases Poluentes no Brasil**

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou em 1986 o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) que tem como objetivo, promover a redução dos níveis de emissões de gases poluentes nos veículos automotores, além de incentivar o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto da engenharia automotiva, como em métodos e equipamentos para realização de ensaios e medições de poluentes.

Os limites máximos de emissões foram fixados com um cronograma específico para três categorias distintas de veículos automotores: “Veículo Leve de Passageiros” (automóveis), “Veículo Leve Comercial” (*pick-up*, van, utilitários, etc...)

e “Veículo Pesado” (caminhões e ônibus).

Ao longo dos anos a tolerância para os índices de poluentes é menor. Segundo o CONAMA (2006), todos os veículos movidos à diesel fabricados após 2006, deverão atender aos índices exigidos no programa PROCONVE P5, os índices exigidos nos programas P5, P6 e P7 estão em vigor desde 2006 e são equivalentes às normas Euro III, IV e VI usadas na Europa conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Limites máximo de emissões para motores diesel (PROCONVE, 2006).

Norma CONAMA Ciclo E.S.C	CO (g/kwh)	HC (g/kwh)	Metano (g/kwh)	NO <sub>x</sub> (g/kwh)	Material Particulado MP (g/kwh)
PROCONVE P5 01/01/2006 (EuroIII)	2,1	0,66	1,6	5,0	0,10
PROCONVE P6 01/01/2009 (Euro IV)	1,5	0,46	1,1	3,5	0,02
PROCONVE P7 01/01/2012 (Euro VI)	1,5	0,46	1,1	2,0	0,02

Para a realização das análises de emissões faz-se necessário um padrão de ensaio conforme normas Europeias: Ciclo de teste E.T.C, denominado Ciclo Europeu em Regime Transiente - ciclo de ensaio que consiste de mil e oitocentos modos transientes, segundo a segundo, simulando condições reais de uso. O ciclo E.S.C, denominado Ciclo Europeu em Regime Constante - consiste de um ciclo de ensaio com 13 modos de operação em regime constante. O ciclo E.L.R,

denominado Ciclo Europeu de Resposta em Carga - ciclo de ensaio que consiste numa sequencia de quatro patamares a rotações constantes e cargas crescentes de dez a cem por cento, para determinação da opacidade da emissão de escapamento.

### **3.6. Instrumentação de Parâmetros do Motor**

A instrumentação de parâmetros de um motor quando ensaiado é muito importante, tanto para monitoramento de parâmetros críticos (temperatura e pressão de óleo, por exemplo, uma vez que o mesmo encontra-se em solicitação extrema e o descuido pode ocasionar uma falha severa) quanto para variáveis a serem estudadas, como no caso a análise de emissões na saída de escape. Serrano *et al.* (2012) e (TZIOUTZIOUMIS *et al.*, 2012) em seus estudos demonstra a importância da instrumentação de dados automatizada, pois parâmetros como temperatura de escape são importantes para confrontação com dados de emissão de NO<sub>x</sub>, por exemplo, além de diminuir o erro humano nas medições.

#### **3.6.1. Sensores de Temperatura**

As medições das temperaturas em veículos a motor são realizadas pela exploração da sensibilidade à variação das mesmas, encontrada na resistência elétrica dos materiais com coeficiente de temperatura positivo (PTC) ou negativo (NTC). Resistores cerâmicos sinterizados (NTC), também conhecidos como termistores, são fabricados a partir de óxidos de metal pesado e cristais oxidados misturados (sinterizados em pérola ou placa). Os termistores incluem-se naqueles materiais semicondutores que apresentam uma curva de temperatura exponencial inversa. A alta sensibilidade térmica significa que as aplicações restringem-se a uma “janela” de - 40 a aproximadamente 850°C (BOSCH, 2005).

### **3.6.2. Condicionador de Sinal**

Muitas aplicações necessitam de medições em ambientes ou estruturas, como temperatura e vibração, realizadas a partir de sensores. Esses sensores, por sua vez, necessitam de condicionamento de sinal para que o dispositivo de aquisição de dados efetue a medição de forma eficaz e exata. As principais tecnologias de condicionamento de sinal fornecem melhorias distintas tanto no que diz respeito ao desempenho quanto à exatidão de sistemas de aquisição de dados

Os sistemas de aquisição de dados, comumente usados em dinamômetros, podem ser de dois tipos, "caixa preta" comercial ou customizada. Comparando estes dois sistemas, podemos ver que o segundo oferece não apenas uma alta flexibilidade no ajuste de parâmetros operacionais (frequência de gravação, taxa de amostragem, etc.), mas também permite uma fácil adaptação a diferentes testes (ASAD *et al.*, 2011).

### **3.7. Medição das Emissões de Poluentes**

Em cada país existe uma legislação de controle das emissões de poluentes e também definição dos procedimentos de testes a serem realizados, com o objetivo de manter um padrão mundial de medição da concentração dos gases da exaustão, com ensaios e métodos padrões. Para fins de desenvolvimento são utilizadas bancadas de testes em conjunto com dinamômetros de motores para veículos comerciais pesados (peso total acima de 3,5 t) e veículos fora de estrada (máquina agrícola e florestal), sendo utilizado dinamômetro de chassi para testes de veículos leves e comerciais leves com medição contínua da concentração do poluente do veículo ou somente do motor. Os gases controlados pela norma e outros

componentes que não são sujeitos a legislação, são coletados e analisados para melhorias no desenvolvimento dos veículos, segundo Bosch (2005).

O princípio de funcionamento do Analisador Infravermelho Não-Dispersivo (*NDIR- Non-Dispersive Infrared Analyser*) baseia-se no fato de que algumas moléculas absorvem radiação em faixas muito específicas do espectro luminoso, exemplo é o CO<sub>2</sub>, que tem maior absorção com comprimento de onda na faixa de 4,2 µm, enquanto o CO apresenta em torno de 4,6 µm. Deste modo, a faixa de absorção e a intensidade indicam a concentração e o tipo de molécula da amostra. No infravermelho é onde encontra-se a maior faixa de absorção de CO e CO<sub>2</sub>. É chamado de não dispersivo, pois toda a luz policromática da fonte passa através da amostra de gás antes de atravessar por um filtro em frente ao sensor, enquanto que em sistemas dispersivos a luz de origem é filtrada para uma estreita faixa de frequência da amostra do gás (PLINT, 2007).

Os sensores eletroquímicos são muito utilizados para medições de concentrações gasosas. Tem o princípio de funcionamento na reação espontânea de oxidação e redução do gás a ser medido, as quais geram uma circulação de corrente elétrica entre dois eletrodos, que é proporcional a concentração do gás da amostra. O eletrólito, os eletrodos e o material a ser oxidado, definem qual o gás a ser mensurado (HABMIGERN, 2003).

### **3.8. Análise dos Gases de Motores utilizando Biodiesel**

Nas últimas duas décadas houve um incremento considerável nos desenvolvimentos de testes de motores alimentados com biodiesel, procurando verificar a performance, consumo e emissões de poluentes. Os países mais envolvidos nesses desenvolvimentos são Brasil, Índia, EUA e China em termos de

publicações. As análises foram agrupadas em ordem cronológica, para fins de comparação da evolução tecnológica do gerenciamento de motores, procurando analisar o CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> e material particulado.

### **3.8.1. Monóxido de Carbono (CO)**

De acordo com a maioria das literaturas, é comum a redução de 50% das emissões de CO quando o diesel é substituído por biodiesel puro. As principais razões apresentadas pelos autores é que o teor de oxigênio extra na composição e o maior número de cetano do biodiesel, resulta em combustão completa.

No Instituto Barbara Hardi, Escola de Engenharia da Universidade do Sul da Austrália, Bari e colaboradores (2014) realizaram testes de emissões em um ônibus equipado com motor Man D0826 LUH de 6871 cm<sup>3</sup> no banco de rolos com 20% de biodiesel produzido de canola e misturado com 80% de diesel com baixo teor de enxofre. Foi escolhido o B20 em vez do B100 devido à redução do poder calorífico do B100 que tornaria o ônibus impróprio para subir colinas em plena carga durante o horário de pico. As emissões de CO foram reduzidas.

Özener *et al.*(2014) realizaram experimentos comparando diesel puro com misturas diesel/biodiesel nas proporções de 10%, 20% e 50% de biodiesel e constataram que as emissões de CO diminuiriam com o aumento do teor de biodiesel em relação ao diesel fóssil, indica uma melhoria na eficiência da combustão em razão ao aumento do oxigênio presente na composição do biodiesel gerando uma maior oxidação das moléculas de carbono, levando a redução das emissões de CO.

Liaquat *et al.* (2012) relataram que um motor monocilíndrico a quatro tempos normalmente aspirado com refrigeração líquida, operando com JB5 e JB10 (5% e 10% de óleo de mamona no diesel fóssil) e J5W5(5% de óleo de mamona com 5% de óleo de fritura), em comparação com diesel fóssil, foi encontrada uma redução média de 17,26% de CO com JB5 e JB10 a 2300 rpm com 100% posição do acelerador; para JB10, 25,92% e 26,87% para J5W5, enquanto que, 80% da posição do acelerador, a redução de 20,70% de CO foi observado para JB5, 33,24% para JB10 e 35,57% para J5W5, respectivamente. O oxigênio extra na composição, maior número de cetano do biodiesel e a variação de carga aplicado no motor, reduz emissões de CO.

Lapuerta (2007 - *apud* LAST, 1995) realizaram um estudo de emissões e performance em um motor ciclo diesel, equipado com sistema de alimentação por injeção direta de combustível, abastecido com blendas de biodiesel de óleo de soja com diesel de baixo teor de enxofre, verificou-se que o valor do CO reduziu 14% em relação ao combustível diesel de referência. Knothe *et al.*(2006) revisaram alguns estudos e relataram uma redução média de 15% ao usar biodiesel em vez de combustível diesel.

Peterson e Reece (1996) testaram um motor ciclo diesel sobrealimentado, abastecido com biodiesel produzidos de matérias primas diferentes, puros e em blendas com diesel de diferentes percentuais em volume. Eles concluíram que a diminuição das emissões de CO com biodiesel foi de quase 50% comparado com diesel fóssil.

Dois veículos comerciais, um Renault Master 2463 cm<sup>3</sup> e um Renault Trafic 1870 cm<sup>3</sup>, sobrealimentados e com sistema de injeção direta Common Rail Euro 3, foram testados em dinamômetro de chassi usando como combustíveis diesel e B30. Os testes foram repetidos em 4 diferentes normas para obter valores significativos conforme as normas *European Standard Urban Driving Cycle* (UDC), *European Standard Extra Urban Driving Cycle* (EUDC), *Common Artemis Driving Cycles* (CADC) e *Urban Cycle* (URBAN). Os resultados demonstraram que o CO teve um aumento de quase 20 % para os dois veículos (MACOR *et al.*, 2011). Existem alguns estudos que os autores encontraram valores iguais na emissão de CO entre diesel fóssil e biodiesel.

### 3.8.2. Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)

Segundo Bari (2014), o teste de emissões realizado em um ônibus equipado com o motor Man D0826 LUH de 6871 cm<sup>3</sup> no banco de rolos com 20% de biodiesel produzido de canola e misturado com 80% de diesel com baixo teor de enxofre. Teve uma média de 4,4% no aumento do NO<sub>x</sub> devido à presença de oxigênio na composição do biodiesel.

Özener *et al.* (2014) relataram que as emissões de NO<sub>x</sub> aumentaram com o aumento do teor de biodiesel, fato explicado pelo aumento do teor de oxigênio no biodiesel, propiciando um aumento de temperatura devido ao excesso de locais de oxidação dos hidrocarbonetos, aumentando a máxima temperatura no momento da combustão e por consequência a formação do NO<sub>x</sub>. O fato de que o biodiesel aumenta o tempo de exposição da chama dentro da câmara de combustão, propicia uma reação de combustão mais completa, desencadeando assim um aumento na formação de NO<sub>x</sub>.

Liaquat *et al.* (2012) observou-se que as emissões de NO<sub>x</sub> com um motor operando a 2300 rpm com 100% do acelerador teve um aumento de 4% para JB5, 6,25% para JB10 e 8% para J5W5 considerando que, a 80% da posição do acelerador, foi encontrado um aumento de 9,5% para JB5, e 17,0% para JB10 e 20,0% para J5W5, respectivamente. Foi relatado que a formação de NO<sub>x</sub> são fortemente dependente da concentração de oxigênio e temperatura dos gases queimados na câmara de combustão.

Segundo Macor (2011), os veículos comerciais, um Renault Master 2463 cm<sup>3</sup> e um Renault Trafic 1870 cm<sup>3</sup>, sobrealimentados e com sistema de injeção direta Common Rail Euro 3, foram testados em dinamômetro de chassi usando como combustíveis diesel e B30 e 4 diferentes normas para obter valores significativos conforme as normas *European Standard Urban Driving Cycle* (UDC), *European Standard Extra Urban Driving Cycle* (EUDC), *Common Artemis Driving Cycles* (CADC) e *Urban Cycle* (URBAN). Observou-se que o NO<sub>x</sub> não teve variação significativa em qualquer um dos ciclos de testes dos veículos.

Os pesquisadores acreditam que o uso de biodiesel causa o aumento das emissões de NO<sub>x</sub>. Amand *et al.* (2011) e Lei Zhu *et al.* (2011), por exemplo, observaram um aumento máximo de 15% nas emissões de NO<sub>x</sub> para B100 com o motor em carga. Segundo os autores isso é devido aos 12% de oxigênio na composição do biodiesel e também um aumento na temperatura da câmara de combustão operando com o combustível B100.

Buyykaya (2010) realizou testes com B5, B20, B70 e B100 biodiesel de canola misturado com diesel fóssil puro (B0), o ensaio foi realizado em um motor

diesel de seis cilindros, quatro-tempos alimentado com uma injeção direta, acoplado a um dinamômetro hidráulico, desenvolveu uma potência máxima de 350 kW. Os testes foram realizados com o motor na condição de plena carga, variando as rotações de 1000 a 2100 rpm, em intervalos de 200rpm. Concluiu-se que o menor retardo da ignição com a combustão do B100 e todas as blendas testadas, promoveu um aumento na formação de NO<sub>x</sub>, comparado com o diesel fossil.

Marshall *et al.* (1995) realizou testes em um motor Cummins L10E sobrealimentado, equipado com turbina de geometria variável. Os testes foram em condições transitórias com combustível diesel e 20% e 30% de misturas de biodiesel. Eles observaram um aumento de 3,7% nas emissões do NO<sub>x</sub> quando abastecido com a mistura de 20%, enquanto que apenas 1,2% com a mistura de 30%. Eles também testaram o motor com biodiesel em condições estacionárias onde foi verificado que o NO<sub>x</sub> teve um aumento de 16% em relação ao combustível diesel.

Fev (1994) realizaram um trabalho experimental em um motor ciclo diesel da marca Navistar International T 444E V8 de 7300 cm<sup>3</sup> sobrealimentado com 157 kW de potência a 3000 rpm, operando com diesel de baixo teor de enxofre e misturas de óleo de soja, foi realizado o ciclo de teste de 13 pontos conforme norma ESC. Verificou-se o aumento das emissões de NO<sub>x</sub> proporcionais a concentração de biodiesel, o máximo atingido foi de 8% para o B100.

Schumacher *et al.* (1994) testaram um motor ciclo diesel 6 cilindros com 200kW de potência nas faixas de 1200 e 2100 rpm a 50% e 100% de carga operando com 10%, 20%, 30% e 40% de mistura de biodiesel de óleo de soja. O NO<sub>x</sub> apresentou um aumento de 15% com o combustível B40.

Outros autores concluíram que o efeito do biodiesel sobre as emissões de  $\text{NO}_x$  depende do tipo de motor, condições de funcionamento, tecnologias e condições de manutenção dos motores ensaiados.

### 3.8.3. Dióxidos de Carbono ( $\text{CO}_2$ )

De forma simplificada, o ciclo de carbono dos vegetais consiste na fixação do carbono  $\text{CO}_2$  e liberação de oxigênio pelas plantas através do processo de fotossíntese. Durante o processo de combustão, o oxigênio e o carbono combinam-se para gerar novamente  $\text{CO}_2$ . É apropriado mencionar que o  $\text{CO}_2$  liberado pela combustão do diesel foi fixado a partir da atmosfera a milhões de anos. No entanto, o  $\text{CO}_2$  liberado na combustão do biodiesel tem fixação contínua pelas plantas e pode ser reciclado na próxima colheita.

Assim, o tempo do ciclo de carbono para a fixação do  $\text{CO}_2$  e sua liberação a partir da combustão do biodiesel é muito menor (poucos anos) comparativamente ao tempo do ciclo do diesel.

Nos trabalhos de Armas *et al.*(2004) e Kaplan *et al.* (2006) foi relatado que, o biodiesel resultou em menos emissões de  $\text{CO}_2$  do que o diesel, percebeu-se que a combustão completa foi devido ao menor teor de hidrogênio e carbono.

Liaquat *et al.* (2012) relataram que a redução do  $\text{CO}_2$  na combustão de biodiesel no motor a 2300 rpm e 100% de posição do acelerador foi de 12,10% para JB5, 20,51% para JB10 e 24,91% para J5W5, Considerando que, a 80% da posição

do acelerador, as reduções foram observado como 5,98% para JB5, 10,38% para JB10 e 18,49% para J5W5, respectivamente.

Dorado *et al.* (2003) realizaram teste com biodiesel metílico de óleo de oliva residual e diesel puro em motor de injeção indireta operando em estado estacionário. Nesta situação, verificou-se que a utilização do biodiesel levou a uma redução na emissão de CO<sub>2</sub> de aproximadamente de 9%.

Lapuerta (2007 - *apud* LAST, 1995) após uma avaliação minuciosa sobre a utilização de biodiesel metílico na substituição do diesel fóssil com baixo teor de enxofre, foi utilizado um motor com injeção direta Navistar T444E HEUE com gerenciamento eletrônico que permite a flexibilidade na mudança do tempo de injeção e pressão de combustível, concluiu-se que as reduções na emissão de CO<sub>2</sub> foram próximas 30% independentemente da proporção de biodiesel.

Foi apontado no trabalho de Daming Huang *et al.* (2004) que, no caso de biodiesel, a maior emissão de dióxido de carbono deve causar menos preocupação por causa da natureza recuperar por meio do cultivo de biodiesel o valor de CO<sub>2</sub>. Enquanto alguns autores como ARMAS O. *et al.*(2004) relatam sobre o efeito do biodiesel nas emissões globais de gases com efeito de emissões de CO<sub>2</sub>. E eles indicam que, o biodiesel provocará uma redução de 50 a 80% nas emissões de CO<sub>2</sub> em relação ao diesel fóssil.

#### **3.8.4. Material Particulado (MP)**

Alguns autores como Durbin *et al.* (2000)<sup>72</sup>, Munack *et al.*(2001) e Alfuso *et al.*(1993) após a realização de ensaios relataram o aumento na emissão de material

particulado quando o combustível diesel fóssil foi substituído parcialmente ou totalmente pelo biodiesel. Na maioria das literaturas de Graboski *et al.*(1998), Lapuerta *et al.*(2002), e Monyem *et al.*(2001), o MP apresenta uma redução em seu valor com acréscimo do biodiesel.

Segundo a EPA (2002), as emissões de MP reduzem quando o teor de biodiesel aumenta, foi verificado esta redução de emissão nos motores diesel pesados sem recirculação dos gases da exaustão (EGR) e sem sistema pós tratamento, também relatam que os motores pesados tem uma redução de aproximadamente 20 % ou em alguns casos não houve redução, já os motores diesel de médio porte a redução do MP foram próximo de 40%.

Canakci e Van Gerpen (2001) obtiveram uma redução de 65% na emissão de material particulado ao realizar ensaios com motor ciclo diesel abastecido com B100 produzido de soja como materia prima. Kado *et al.*(2003) relataram em seus trabalhos que o motor abastecido com biodiesel a base de óleo de soja reduziu a emissão do MP em 75% comparado com diesel fóssil. Knothe *et al.*(2006) testou um motor de 6 cilindros de 14l abastecido com biodiesel de óleo de soja e obteve reduções de 45-50% nas emissões de material particulado.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os principais materiais, equipamentos e métodos utilizados para a realização dos procedimentos experimentais.

### 4.1. Materiais

#### 4.1.1. Ambiente de Trabalho

A Figura 4.1 apresenta uma visão geral do ambiente utilizado para a realização dos ensaios, que está localizado no Centro de Educação Profissional SENAI Automotivo Porto Alegre.



Figura 4.1. Visão geral do ambiente de trabalho, destacando o veículo caminhonete Ford F250, posicionado sobre os rolos do dinamômetro, e os sistemas de controle.

### 4.1.2. Veículo

O veículo utilizado para realização dos testes foi uma caminhonete Ford, modelo F250, ano 2005, tração 4x4, a diesel com 55.300 km, com as especificações técnicas do motor apresentada na Tabela 4.1. O veículo analisado foi devidamente revisado, instrumentado e ancorado conforme recomendação do fabricante do dinamômetro de chassi.

Tabela 4.1. Características técnicas do motor do veículo F250 utilizado nos testes (FORD, 2006).

Número de cilindros/disposição	4 – linha
Potência (cv/kW) @rpm	203/149,2 @ 2900
Torque (kgfm/Nm) @rpm	56/560 @ 1.500
Ciclo	Diesel quatro tempos
Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	3.920
Relação de compressão	17,3: 1
Sistema de injeção	<i>Common Rail</i> EURO III
Refrigeração	Líquida

### 4.1.3. Dinamômetro

O dinamômetro utilizado para o estudo é da marca BOSCH, modelo FLA 203, conforme Figura 4.2 e 4.3, com as especificações técnicas apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Características técnicas do dinamômetro BOSCH, modelo FLA 203 (BOSCH, 2002).

Parâmetro	Valor
Velocidade máxima	270 km/h
Potência máxima suportada	400 kw
Comprimento dos rolos	2200 mm
Incerteza na medição de potência	+/- 0,5% + 2 kW
Correção de potência	DIN 70020 ou EEC 80/1269
Diâmetro dos rolos (2)	318mm
Peso máximo por eixo	2000kg
Sistema operacional	MS-DOS
Correção de potência (Norma)	DIN 70020/CEE801269
Correção de pressão/Temp. ar admitido	Autom.
Grau de inexatidão do banco (Pot. dinâmica)	+/-0,5% +/- 2kW
Grau de inexatidão do banco (Pot. estática)	+/-0,5% +/- 2kW
Medição de pressão do ar	700 a 1050 hPa
Grau de inexatidão pressão do ar	+/- 0,6% do valor medido +/- 6hPa
Medição de temperatura do ar	-20 a 120 °C
Grau de inexatidão temperatura do ar	+/- 2°C

Segundo Bosch (2001), as potências dos veículos podem ser medidas através de análise estática ou de análise dinâmica. Entretanto, podem ocorrer diferenças entre potências, pois as condições se modificam de teste para teste, como por exemplo o atrito pneu-rolô, temperatura e pressão atmosférica. Para a análise estática, define-se em software os parâmetros de velocidade e rotação do motor, em seguida acelerando os rolos contra a resistência do freio de correntes

parasitas. Através da célula de carga acoplada ao dinamômetro, é medido o torque e sabendo-se a rotação, a potência na roda é determinada. Para análise dinâmica, o procedimento diz que o veículo deverá ser acelerado e trocar as marchas por volta de 2000 rpm, até a marcha que contenha uma relação de engrenamento que a rotação do motor seja aproximadamente a de saída da caixa de câmbio, sendo esta normalmente a quarta marcha. Após atingida esta relação, se acelera ao máximo e o sistema de aquisição mede a velocidade dos rolos inerciais, utilizando o princípio da inércia, podendo ser verificada a potência. Após deve-se deixar o veículo em condição neutra (“ponto morto”) e os rolos irão desacelerar até pararem completamente, devido aos atritos do conjunto de transmissão, roda e pneu, determinando assim a potência dissipada. A soma das duas potências é igual a potência do motor.



Figura 4.2. Rolos e freio elétrico do dinamômetro BOSCH, modelo FLA 203.

A Figura 4.3 mostra o monitor usado para visualização das configurações e resultados dos testes de potência e torque. No gabinete encontra-se o *hardware* de controle e aquisição de dados, que internamente possui uma estação medidora de

condições ambientais que analisa a medição da pressão de ar e temperatura do teste para fazer o cálculo e posterior correção de potência, assim como um *software* dedicado para a aquisição e tratamento de dados (BOSCH, 2002).

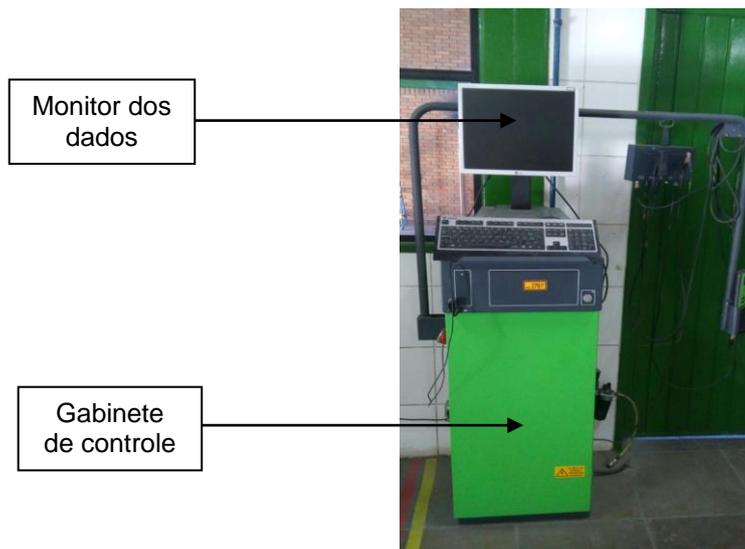


Figura 4.3. Monitor e gabinete de controle do dinamômetro BOSCH, modelo FLA 203.

#### 4.1.4. Combustíveis Utilizados

Para a realização e verificação dos testes foram utilizados dois combustíveis: o diesel S10 (B7) e biodiesel (B100) fornecido pela empresa Oleoplan S.A. A Figura 4.4 mostra os recipientes de acondicionamento de combustível. Também foram utilizadas as misturas B10, B15, B20, B25, B30, B35, B40, B45, B50, B55, B60, B65, B70, B75, B80, B85, B90 e B95.



Figura 4.4. Reservatórios de acondicionamento de combustível: (A) reservatório diesel S10; (B) reservatório biodiesel.

#### 4.1.5. Diesel S10 (B7)

A Lei Federal nº 13.033 estabelece os percentuais de adição de biodiesel no diesel comercial. Em novembro de 2015, o percentual previsto na lei é de 7% em volume de combustível. O óleo diesel utilizado neste trabalho foi adquirido em posto de combustível com bastante rotatividade de abastecimento, devido ao grande movimento de caminhões, na cidade de Porto Alegre, em novembro de 2015, contendo assim 7% de biodiesel. As misturas foram consideradas em volume a partir da formulação B7. No APÊNDICE A, pode ser visto o boletim técnico com as principais propriedades do diesel S10 (B7), segundo a (ANP, 2011).

#### 4.1.6. Biodiesel (B100)

O biodiesel utilizado neste experimento foi gentilmente cedido pela empresa Oleoplan S/A, no volume aproximado de 50 l. Cabe salientar que a composição do biodiesel fornecido é de 74,5% óleo de soja, 25% de gordura animal, 0,5% de óleo recuperado e metanol. Este combustível fornecido, segundo a empresa, está em

conformidade com a resolução ANP nº45 de 25/08/2014. No APÊNDICE B pode ser visto o boletim de ensaio que a empresa forneceu com a caracterização do biocombustível.

#### 4.1.7. Analisador de Gases

Para a realização das medições de emissões dos gases da combustão utilizou-se um analisador de gases da marca TESTO, modelo 350, com a sonda de medição montada antes do abafador de ruídos dos gases do escapamento, conforme Figura 4.5. O analisador (Figura 4.6) é capaz de mensurar  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{SO}_2$  pelo sistema infravermelho não dispersivo (NDIR) e sensores eletroquímicos, sendo as especificações apresentadas na Tabela 4.3.



Figura 4.5. Sonda e suporte da sonda do analisador de gases TESTO, modelo 350.



Figura 4.6. Central de controle do analisador de gases TESTO, modelo 350.

De acordo com as especificações do equipamento, a sonda responsável pela aquisição dos gases emitidos deve ser posicionada na região central da tubulação por onde fluem os gases (escapamento), perpendicularmente ao fluxo. Os gases absorvidos pela sonda são enviados à central de controle do analisador de gases responsável pelas análises quantitativas dos diferentes gases por uma mangueira específica, sendo os dados apresentados em tempo real e armazenados em um arquivo \*.dat, que pode ser exportado para aplicativos de planilhas eletrônicas.

Tabela 4.3. Características técnicas do analisador de gases TESTO, modelo 350 (TESTO, 2013).

Parâmetro de medição	Faixa de medição	Resolução
O <sub>2</sub>	0...25 vol.%	0,01 vol.%
CO, H <sub>2</sub> - comp.	0...10000 ppm	1 ppm
CO low, H <sub>2</sub> -comp.	0...500 ppm	0,01 ppm
NO	0...4000 ppm	1 ppm
NO low	0...300 ppm	0,01 ppm
NO <sub>2</sub>	0...500 ppm	0,1 ppm

SO <sub>2</sub>	0...5000 ppm	1 ppm
CO <sub>2</sub> -(IR)	0...50 vol.%	0,01 vol.% (0...25 vol.%) 0,1 vol.% (25 vol.%)
HC 1,2	Gás Natural 100...40000 ppm Propano:100...21000 ppm Butano: 100...18000 ppm	10 ppm 10ppm 10ppm
Pressão Diferencial 1	- 40...40 hPa	0,01 hPa
Pressão Diferencial 2	- 200...200 hPa	0,1 hPa
NTC (permanente)	- 20 a 50°C	0,1°C
Pressão Absoluta	600...1150 hPa	1 hPa
Velocidade do Fluxo	0...40 m/s	0,1 m/s
Tipo K (NiCr-Ni)	-200 a 1370°C	0,1°C

#### 4.1.8. Opacímetro

O opacímetro utilizado neste trabalho é do fabricante NAPRO, modelo NA 9000, mostrado na Figura 4.7. O analisador de opacidade é aprovado pelo INMETRO e regulamentado para o uso no programa de inspeções veiculares em São Paulo, e as suas características técnicas estão apresentadas na Tabela 4.4. O equipamento dispõe de uma sonda que deve ser acoplada diretamente na saída do escapamento, na posição paralela em relação à direção do fluxo de gases, contando com um sistema de fixação específico para tubulações automotivas.



Figura 4.7. Opacímetro NAPRO, modelo NA 9000.

Tabela 4.4. Características técnicas do opacímetro NAPRO, modelo NA 9000 (NAPRO, 2013).

Parâmetro	Valor
Faixa de medição de opacidade	0 - 99%
Faixa de medição do coeficiente de absorção de luz	0 - 9,99 1/m
Precisão	$\pm 2\%$
Resolução	0,1
Temperatura da câmara	75°C
Comprimento do feixe	430 mm
Tempo de resposta	0,9 - 1,1s
Temperatura Ambiente	5 - 40°C
Umidade ambiente de funcionamento	0 - 95%
Potência	400 W

## 4.2. Instrumentação do Motor

Para o monitoramento do funcionamento do motor utilizou-se alguns parâmetros de controle tais como rpm, temperatura do ar, temperatura do líquido de arrefecimento, temperatura do ar admitido, pressão de sobre alimentação e temperatura dos gases de escape. Para tanto, foram utilizados os sensores e equipamentos descritos a seguir.

### 4.2.1. Sensor de Rotação

Foi utilizado um medidor de rotação universal da marca NAPRO, modelo Pro 8500. Este medidor possui um sensor piezoelétrico montado sobre o cabeçote do motor, o qual gera sinais elétricos conforme a vibração no momento da combustão, sendo apresentado nas Figuras 4.8 e 4.9, e sua especificação técnica apresentada na Tabela 4.5.



Figura 4.8. Sensor piezoelétrico posicionado sobre o cabeçote do motor.



Figura 4.9. Medidor de rotação do analisador NAPRO, modelo Pro 8500.

Tabela 4.5. Características técnicas do medidor de rotação do motor NAPRO, modelo Pro 8500 (NAPRO, 2013).

Parâmetro	Valor
Faixa de medição	400 - 9999 rpm
Erro máximo até 2.000 rpm	15 rpm
Erro máximo acima de 2.000 rpm	menor que 2%

#### 4.2.2. Medição de Temperatura

Utilizou-se os próprios sensores de temperatura originais do motor para possibilitar o controle da temperatura de alguns pontos do motor, os quais são termistores do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*).

✓ Temperatura do ar admitido: o sensor está instalado no duto de admissão do motor em conjunto com o sensor de pressão. São originais do veículo, mas ligados em paralelo ao canal analógico de número 6 do datalogger FUEL TECH, modelo Pro, 24 canais. Para que o valor de temperatura ficasse correto, fez-se necessário a

configuração do canal utilizado no datalogger para o sensor do tipo customizado, pois os valores de resposta do sensor original não são compatíveis ao padrão do equipamento, conforme Figura 4.10.

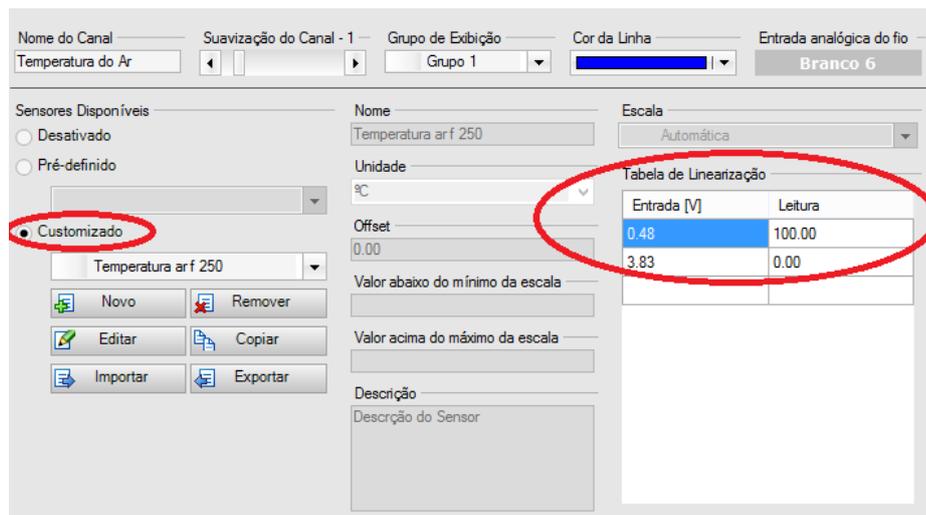


Figura 4.10. Configuração do canal 6 do datalogger FUEL TECH, modelo Pro, 24 canais.

✓ Temperatura do líquido de arrefecimento do motor: o sensor está instalado no cabeçote do motor, próximo a mangueira superior do radiador, no fluxo de saída do líquido de arrefecimento. Também utilizou-se o sensor original do veículo, ligado em paralelo ao canal analógico de número 5 do datalogger FUEL TECH, modelo Pro, 24 canais, e realizado a configuração do sensor para customizado conforme Figura 4.11, observando a temperatura apresentada no datalogger e a temperatura do líquido de arrefecimento com o auxílio de um termômetro digital Minípa, modelo MT-320, com resolução de 0,1°C.

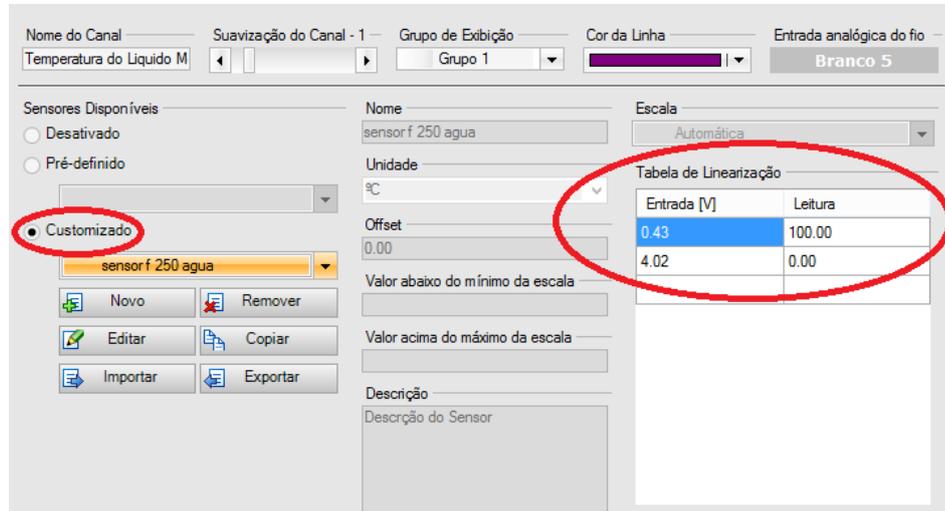


Figura 4.11. Configuração do canal 5 do datalogger FUEL TECH, modelo Pro, 24 canais.

#### 4.2.3. Temperatura dos Gases do Escapamento

Foram utilizados sensores de temperatura termopares tipo K instalados individualmente no coletor de escape. Para o processo de instalação dos termopares fez-se necessário à remoção do conjunto coletor de escape e turbina. Com o coletor removido foi possível à realização dos furos e roscas para a instalação dos sensores conforme mostra a Figura 4.12. A Tabela 4.6 apresenta as características elétricas e mecânicas dos sensores.



Figura 4.12. Sensores termopares tipo K instalados no coletor de escape.

Tabela 4.6. Características técnicas do termopar tipo K (KZ ELETRONICS, 2014).

Parâmetro	Valor
Termopar	tipo K (sem terra)
Temperatura de operação	0 - 1200 °C
Diâmetro da sonda	5 mm
Comprimento da sonda	85 mm
Comprimento do cabo	2 m
Isolamento interno do cabo	fibra de vidro
Rosca da conexão	1/8" NPT

#### 4.2.4. Condicionador de Sinais de Temperatura

Para ser possível realizar a leitura dos sensores termopares fez-se necessário a utilização de um condicionador de sinais para cada termopar do tipo K usados no coletor de escape do motor, o condicionador de sinais de temperatura

utilizado foi da marca FUEL TECH modelo ETM-1 montados em uma base de fixação conforme mostra a Figura 4.13. A Tabela 4.7 apresenta as características elétricas do condicionador ETM-1.

Tabela 4.7. Características elétricas do condicionador ETM-1 (FUEL TECH, 2017).

Parâmetro	Valor
Tensão nominal de alimentação	12 VDC
Escala da temperatura de operação	0 - 1000 °C
Tensão de saída	0 a 5 VDC
Sensor compatível	termopares tipo K



Figura 4.13. Condicionador de sinais de temperatura.

#### 4.2.5. Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados utilizado foi da marca FUEL TECH, modelo Pro, 24 canais, com software específico do fabricante, A Figura 4.14 mostra a central de controle do sistema de aquisição de dados (datalogger), com os cabos de

alimentação das informações obtidas pelos sensores, bem como o cabo USB para conexão direta a computador e ao software de tratamento de dados. Conforme mencionado, o datalogger possui 24 canais independentes, e frequência de aquisição de dados de 50 Hz.



Figura 4.14. Datalogger FUEL TECH, modelo Pro, 24 canais.

Após o veículo entrar na rotação e carga determinada na sequência de teste, o datalogger foi acionado manualmente gerando uma sessão para cada rpm e % de biodiesel acrescido ao B7. Logo depois do tempo do ensaio, o datalogger era desacionado e a sessão salva automaticamente em um arquivo. Todas as sessões foram renomeadas conforme o percentual de biodiesel e a rotação em que o motor foi testado, a Figura 4.15 mostra o gráfico da sessão do combustível B 55 no regime de marcha lenta e a Figura 4.15 mostra os valores mínimos e máximos de cada uma das variáveis do motor da sessão do B 55.

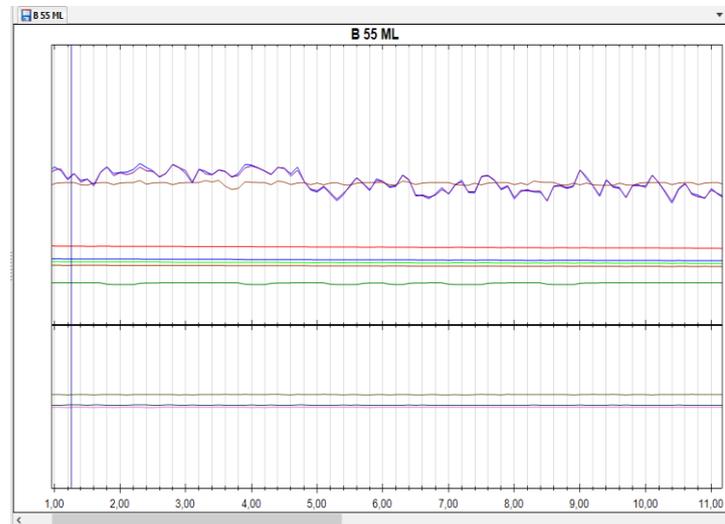


Figura 4.15. Exemplo do gráfico gerado pelo Datalogger com o motor em ML abastecido com B55.

Sessões		
Valores do Gráfico		
Detalhes do Gráfico		
Mínimos e Máximos		
<b>Rotação do motor</b>	↑ 750 RPM	↓ 720 RPM
<b>Temperatura cilindro 1</b>	↑ 164,06 °C	↓ 151,37 °C
<b>Temp cilindro 2</b>	↑ 176,76 °C	↓ 163,10 °C
<b>Temp cilindro 3</b>	↑ 189,45 °C	↓ 173,83 °C
<b>Temp cil 4</b>	↑ 244,14 °C	↓ 222,67 °C
<b>Temperatura do Líquido Motor</b>	↑ 81,85 °C	↓ 80,07 °C
<b>Temperatura do Ar</b>	↑ 45,95 °C	↓ 44,01 °C
<b>Tensão Bateria</b>	↑ 14,31 V	↓ 14,24 V
<b>Acelerômetro (x)</b>	↑ 0,93 g	↓ 0,86 g
<b>Acelerômetro (y)</b>	↑ 0,00 g	↓ -0,05 g
<b>Acelerômetro (z)</b>	↑ 0,15 g	↓ 0,10 g

Figura 4.16. Valores Mínimos e Máximos no Datalogger com o motor em ML abastecido com B55.

### 4.3. Métodos

#### 4.3.1. Preparação das Misturas dos Combustíveis

O propósito deste trabalho foi testar combustíveis de B7 a B100. Os métodos utilizados para os ensaios foram baseados na norma Europeia ESC (*European Stationary Cycle*) com algumas alterações no tempo de aquisição dos gases pelo analisador, pois o motor e o dinamômetro com cargas elevadas estariam suscetíveis à superaquecimento.

Para a realização dos ensaios, utilizou-se como base de cálculo os valores de rotação calculados pela norma ESC, que é utilizada para caracterizar o torque, potência e emissões de poluentes. Normalmente, o teste seria realizado em 28 minutos para cada combustível, conforme mostra a Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Passos de operação do ciclo ESC (ESC, 2015).

Passo	Rotação	Carga (%)	% de tempo do teste	Duração (min.)
1	Lenta	0	15	4
2	A	100	8	2
3	B	50	10	2
4	B	75	10	2
5	A	50	5	2
6	A	75	5	2
7	A	25	5	2
8	B	100	9	2
9	B	25	10	2
10	C	100	8	2

11	C	25	5	2
12	C	75	5	2
13	C	100	5	2

As rotações A, B e C são calculadas através da norma, sendo que A é a rotação de 25% de rotação em máxima potência, B é a rotação de 50% de rotação em máxima potência, e C a rotação de 75% de rotação em máxima potência.

Porém, devido à disponibilidade dos equipamentos e atraso na entrega do combustível (biodiesel), o teste teve de ser alterado para as condições impostas, o que resultou em um cronograma de uma semana de teste, do dia 16/11/2015 a 20/11/2015. Procurou-se então, utilizar uma metodologia similar, porém com menos pontos de coleta de dados, mas abrangendo o espectro da curva de torque e potência do motor com plena carga na rotação determinada. A sequência de passos utilizados durante os testes, já com os valores de rotação calculados, está ilustrada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Passos de operação do ciclo utilizado (adaptado da ESC pelo autor).

Passo	Rotação (rpm)	Carga %	% de tempo do Teste	Duração (min.)
1	750	0	40	4
2	1450	100	20	2
3	2000	100	20	2
4	2600	100	20	2
Total	-	-	100	10

Após definida a metodologia de ensaio, procurou-se antes da execução dos testes realizar uma revisão criteriosa no veículo, para evitar problemas durante os

testes, sendo substituídos os seguintes itens:

- Óleo lubrificante do motor e elemento filtrante;
- Óleo da transmissão e diferencial;
- Fluido de arrefecimento;
- Fluido de freio;
- Fluido da direção hidráulica;
- Correia de acessórios;
- Filtro de Ar;
- Filtro de combustível.

Além dos componentes substituídos, foi realizada a manutenção preventiva conforme orientação do fabricante. Com relação ao dinamômetro, foram revisados os rolamentos de apoio, cabeamento de comunicação e célula de carga, quanto a possíveis danos ou problemas quaisquer.

Após a etapa da revisão, foram feitos testes preliminares para verificar o comportamento do veículo com relação ao dinamômetro e a medições dos gases com o analisador TESTO 350, opacímetro NAPRO e parâmetros do datalogger FUEL TECH. Esses testes iniciais foram feitos com diesel S10 (B7), apenas para verificação do comportamento. A Figura 4.17 apresenta um esquemático da montagem dos instrumentos e componentes utilizados.

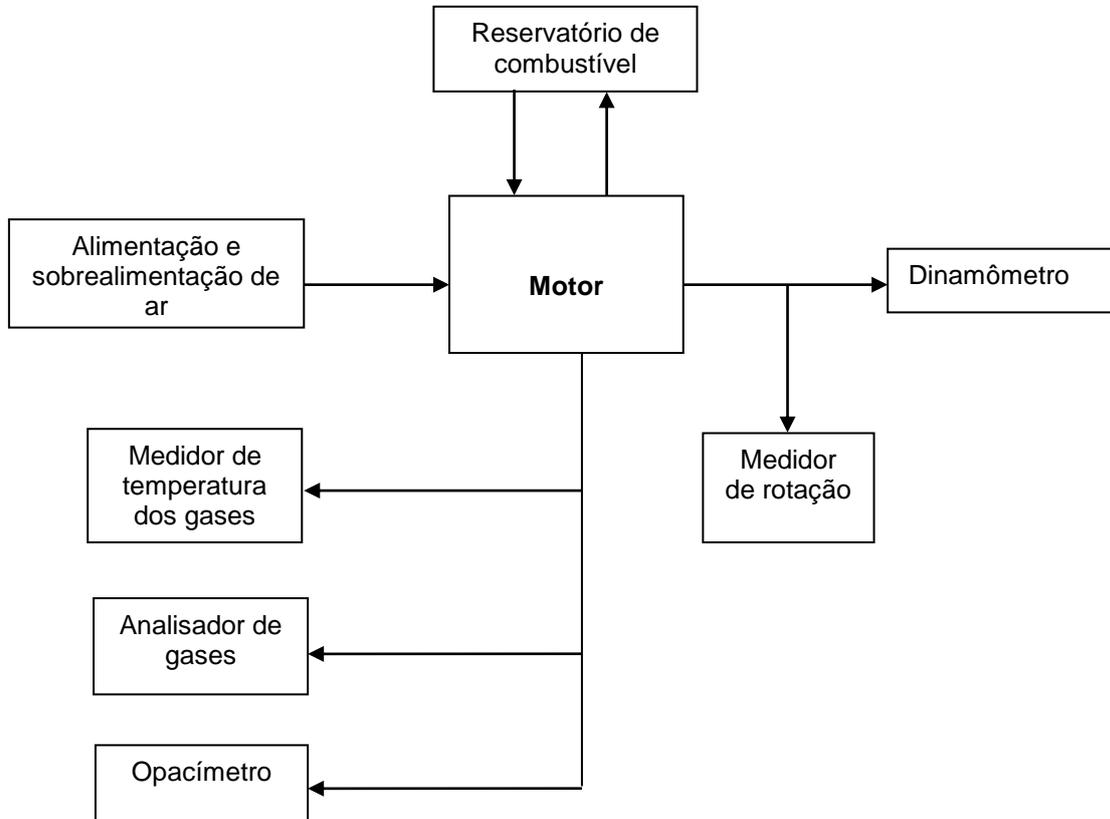


Figura 4.17. Fluxograma esquemático da montagem dos testes.

### 4.3.2. Protocolos de Ensaio

Todos os ensaios foram realizados seguindo o procedimento a seguir:

- Inicialmente o veículo foi colocado nos rolos e realizado o ancoramento do mesmo com o solo, através de cintas catraca como procedimento de segurança, devido aos riscos de saída de cima do rolo, conforme pode ser visto na Figura 4.18.



Figura 4.18. Ancoramento do veículo no dinamômetro através de cinta de fixação.

- O aquecimento do motor foi realizado sempre em torno de 10 min, até o motor atingir a temperatura normal de trabalho, em torno de 80°C, com o veículo apenas rodando sobre os rolos, pois o manual do equipamento recomenda que o atrito de aquecimento da interface pneu-rolô é importante para as medições de potência;
- Os tempos de ensaio, excetuando-se as coletas dos gases, temperatura do motor, temperatura do ar admitido e opacidade, foram definidos em 10 min para cada combustível, conforme a metodologia de ensaio. Porém, o tempo total de preparação, teste e finalização ficavam próximo de 40 min. As medições das temperaturas, gases e opacidade foram tomadas quando o veículo entrava na rotação especificada e esperava-se um minuto de estabilização da rotação e da carga do dinamômetro, para então cronometrar o tempo de 2 min, com o auxílio de um cronômetro, conforme preconizado nos ensaios e salvamento dos parâmetros no analisador TESTO 350, Opacímetro NAPRO NA 9000 e variáveis do motor no datalogger FUEL TECH PRO 24;

- As trocas dos combustíveis foram realizadas após os mesmos serem consumidos até o final do volume do tanque. Após isso, com o auxílio de provetas graduadas, as misturas entre B7 e B100 eram produzidas. O primeiro combustível utilizado foi o diesel S10 (B7), onde a partir desta mistura-base foram sendo adicionados percentuais de 3% para a formulação do B10 e após, de 5 em 5% de volume até o biodiesel puro (B100). Após a inserção da nova mistura, deixava-se o veículo funcionando por 1 min, até que toda a mistura nova entrasse na linha de combustível, para evitar erros devido a contaminação do combustível anterior.

A Figura 4.19 ilustra as provetas utilizadas na formulação das misturas, bem como o aparato medidor de consumo durante uma troca de combustível.

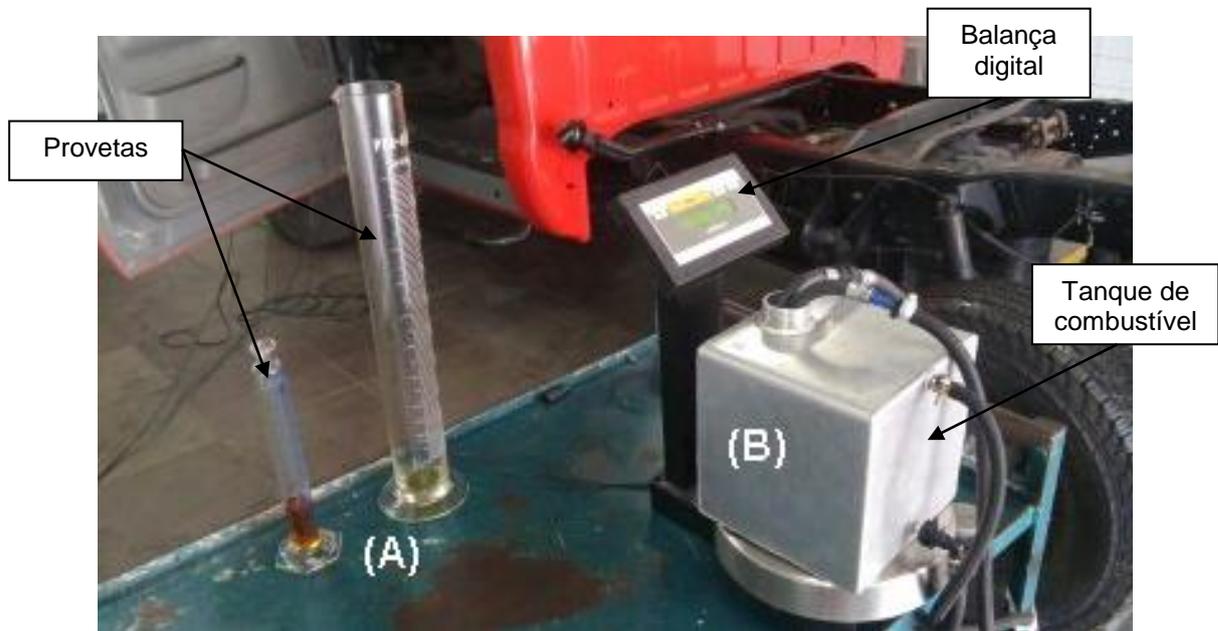


Figura 4.19. Formulação das misturas: (A) provetas graduadas, (B) aparato medidor de consumo de combustível.

Após o combustível ser completado no tanque, bem como decorrido o tempo de aquecimento, os ventiladores eram acionados para resfriamento do motor, bem como do freio dinamométrico, o veículo era mantido em marcha lenta por 4 min, sendo após isso colocado em plena carga, por 2 min, onde eram salvos os valores das emissões, temperaturas e opacidades, passando pelas rotações de 2600, 1450 e 2000 rpm.

O ensaio foi interrompido, todos os dados descartados e o teste reiniciado nos casos de pane no grupo de equipamentos, o que aconteceu por duas vezes, onde ocorreu o travamento do *software* do dinamômetro durante os testes com mistura diesel S10 + 35% de biodiesel e S10 + 40% de biodiesel, no dia 17/11/2015.

Todos os ensaios foram verificados com o motor a plena carga, ou seja, com o pedal do acelerador completamente acionado, para verificar a performance ambiental de cada combustível (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e opacidade). Os combustíveis estiveram sempre em condições similares a rodagem original do veículo, tendo apenas a modificação para instalação do aparato medidor de consumo, sem quaisquer outras modificações.

Durante todos os ensaios, foram sempre verificados conforme o painel do veículo, anteriormente testado e verificado, a pressão de óleo e temperatura do líquido de arrefecimento do motor, pois como o veículo está sobre carga do dinamômetro e está em uma condição sem corrente de ar para resfriamento, esses dados são cruciais para o bom funcionamento do motor. Em nenhum teste foi necessário a parada total devido a superaquecimento do motor ou queda na pressão de óleo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os dados das emissões dos gases de escapamento, potência e torque do motor em função da variação das rotações do motor para as diferentes misturas de combustíveis.

### 5.1. Emissões dos Gases de Exaustão

#### 5.1.1. Monóxido de Carbono (CO)

A Figura 5.1 apresenta o gráfico das emissões de CO em função do teor de biodiesel da blenda nas rotações de 750 rpm (marcha lenta), 1450, 2000 e 2600 rpm utilizando B7 ao B100. Os resultados em percentual de redução de CO para as rotações estão apresentados no Apêndice C que demonstra a redução de 80% para o B100. Observa-se que em todas as rotações o monóxido de carbono reduziu seus valores com o acréscimo de biodiesel, conforme relata-se na literatura (YUAN, 2005, BARI *et al.*, 2014). Para a rotação em marcha lenta (750 rpm), os valores das emissões situaram-se na média de 1300 ppm para o B7, diminuindo gradualmente a medida que o teor de biodiesel foi aumentado até B50, e mantendo-se quase constante até o valor médio de 780 ppm para o B100. Quando a rotação foi aumentada, de 1450 até 2600 rpm, os valores médios das emissões foram menores quando comparados a rotação de marcha lenta (750 rpm), onde a medida que a

rotação aumenta, as emissões diminuem gradativamente devido melhor eficiência volumétrica do motor, isso ocorre com o aumento da massa de ar admitido e a pressão positiva no coletor de admissão, fazendo a melhor atomização da mistura ar/combustível e conseqüentemente uma combustão mais completa, comparando com a rotação de marcha lenta. Com a adição de biodiesel ao B7 fica evidente a redução do CO, sua redução é devido ao fato que o biodiesel possui uma estequiometria de 12,5:1 e o diesel fóssil 14,5:1 fazendo com que a mistura fique pobre possibilitando a oxidação da massa de combustível com melhor eficiência.

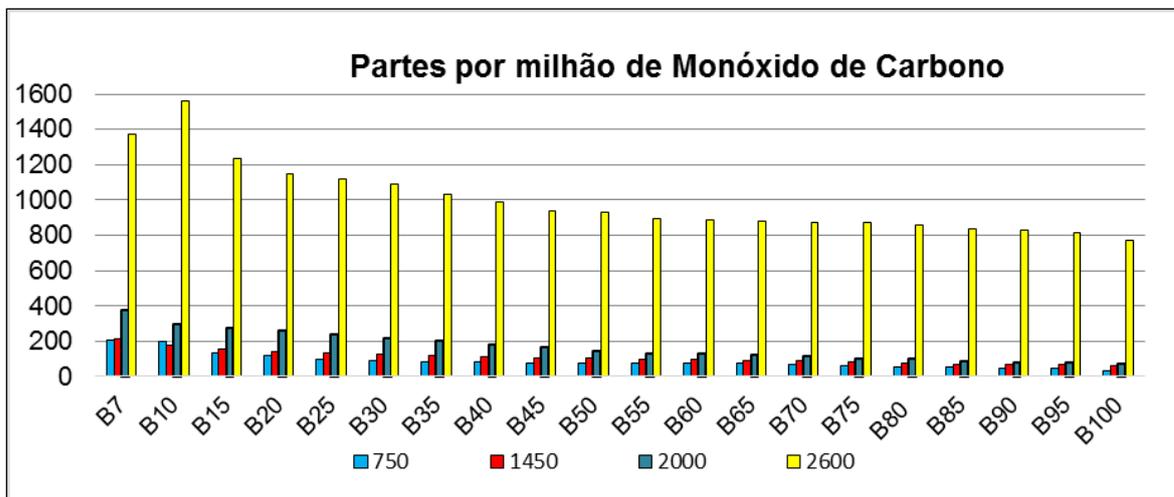


Figura 5.1. Emissões de monóxido de carbono (CO) para os diferentes combustíveis no regime de 750, 1450, 2000 e 2600 rpm.

### 5.1.2. Óxido de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)

O comportamento das emissões de NO<sub>x</sub> com o motor no regime de 750, 1450, 2000 e 2600 rpm utilizando B7 ao B100, está representado na Figura 5.2, sendo que neste gráfico o motor está no regime de plena carga. Observa-se que o

NO<sub>x</sub> teve um aumento em seus valores com o acréscimo de biodiesel e com a variação de rotações conforme relata-se na literatura (LAPUERTA, 2007).

Para a rotação em marcha lenta (750 rpm), o valor do NO<sub>x</sub> teve um aumento de 62,04% com o motor abastecido com B100 comparado com o B7. Quando a rotação foi aumentada para 1450 rpm, observou-se que entre B15 e B30 o NO<sub>x</sub> apresentou um aumento entre 50,11% a 65,55%, respectivamente, sendo o pior resultado encontrado nos ensaios no regime de 2600 rpm com o motor abastecido com B100, onde teve-se um aumento de 117,06% comparado com B7. As emissões aumentam gradativamente devido ao aumento da pressão de combustível e volume injetado, bem como o aumento da pressão de sobre alimentação que manteve-se em 1,7 bar, sendo que esses fatores influenciam no aumento da temperatura dos gases e, conseqüentemente, o aumento da emissão de NO<sub>x</sub>.

Com o acréscimo de biodiesel, observou-se que o NO<sub>x</sub> teve um aumento, e o motivo para esse comportamento é que o biodiesel possui um teor maior de oxigênio, segundo M Shahabuddin (2013). Alguns autores relatam que o número de cetano do biodiesel está relacionado diretamente com aumento do NO<sub>x</sub>, pois faz com que ocorra uma diminuição do atraso da ignição comparado com o diesel fóssil, este fator influencia na temperatura dos gases no interior da câmara de combustão devido ao tempo de exposição da chama, provocado pelo empobrecimento da mistura com a adição do biodiesel, assim pode observar o aumento da temperatura dos gases da exaustão e conseqüentemente o aumento do NO<sub>x</sub> em todas as faixas de rpm do motor.

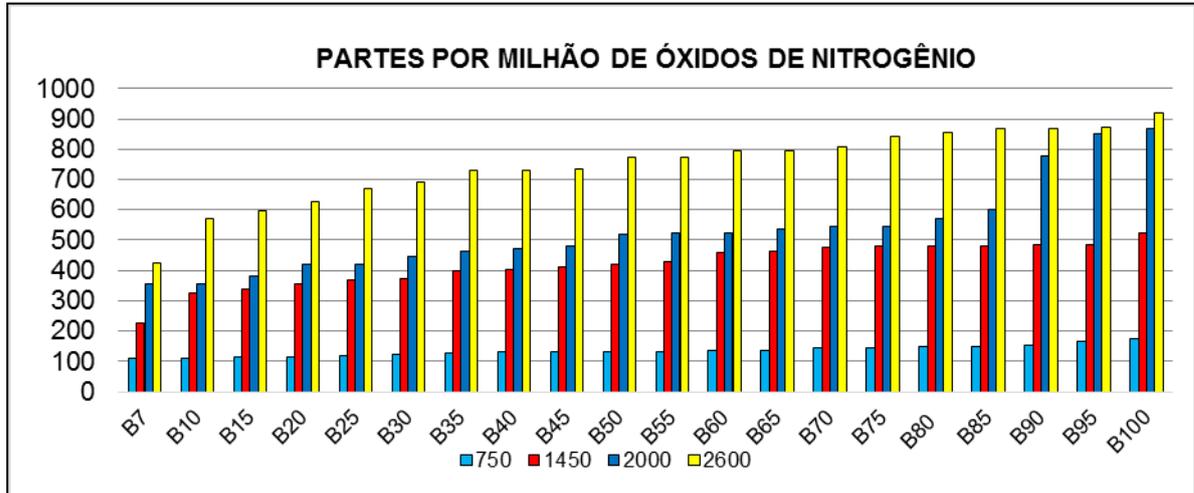


Figura 5.2. Emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) para os diferentes combustíveis em regime de 750, 1450, 2000 e 2600 rpm.

### 5.1.3. Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)

O valor máximo de dióxido de enxofre encontrado nos testes foi de 5,5 ppm na rotação de 2600 rpm no regime de plena carga, quando o motor estava abastecido com o combustível B7. Esse resultado demonstra que o teor de enxofre encontrado no B7 é menor que o definido pela legislação, isso garante melhor qualidade na emissão de poluentes em particular do dióxido de enxofre assim reduzindo os riscos a saúde conforme mencionado anteriormente. A medida que o teor de biodiesel foi aumentado em relação ao diesel, a quantidade de dióxido de enxofre tentou a 0 ppm.

#### 5.1.4. Material Particulado (MP)

Para verificar a intensidade de material particulado presente na fumaça, utiliza-se o método chamado de opacidade da fumaça, que indica a impenetrabilidade da luz, sendo quanto mais escura for a fumaça, maior será a opacidade e a quantidade de material particulado. O opacímetro determina a opacidade da fumaça do gás expelido. Este aparelho coleta somente parte do fluxo de gás, através da sonda e do tubo de captação acoplados no cano de escape do veículo, conforme apresentado na Figura 4.7 do Item 4.1.6.

A Figura 5.3. apresenta o percentual de opacidade comparando primeiramente o combustível B7 nas faixas de rotação e carga determinadas no método de ensaio. Observa-se que quando o motor está no regime de marcha lenta a (750 rpm), este apresenta 0,6% de opacidade e, quando submetido a 100% de carga a 2600 rpm de rotação, apresenta um valor de 5,7%, pois o volume de combustível injetado é maior para suprir a demanda de 90% da potência máxima do motor. Os valores de opacidade para as rotações de 1450 rpm e 2000 rpm não tiveram muitas variações, pois neste regime o motor apresenta a pressão de sobrealimentação máxima de 1.7 bar no coletor de admissão e volume de injeção de combustível semelhante. Com a adição do biodiesel, observa-se na Figura 5.4. que o motor a 2600 rpm operando com B50 apresenta 0,6% de opacidade. Com percentuais de biodiesel acima de B50, a opacidade ficou em 0% estes valores apresentam coerência conforme Lapuerta (2002).

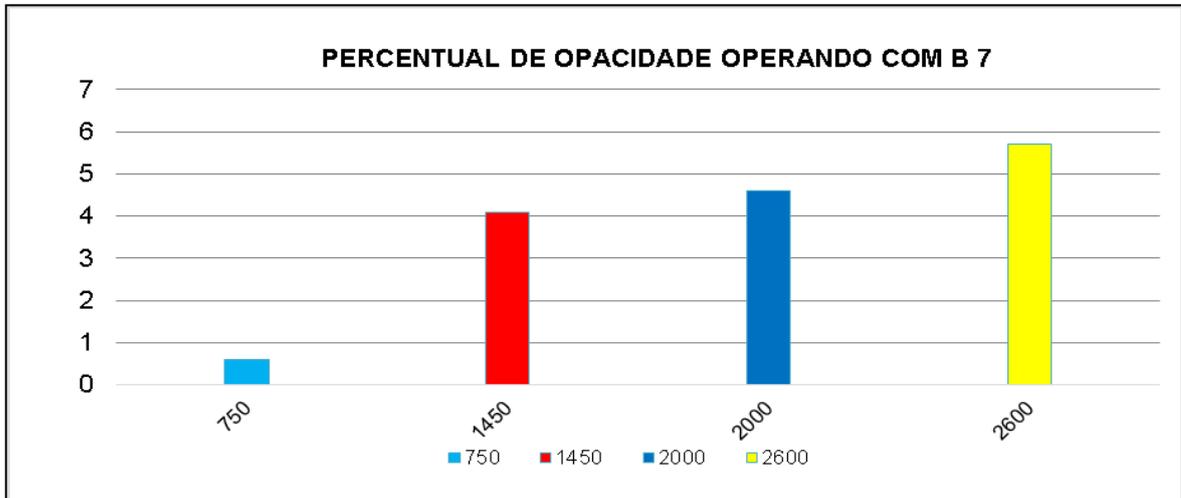


Figura 5.3. Opacidade em regime de plena carga nas diferentes rotações para o B7.

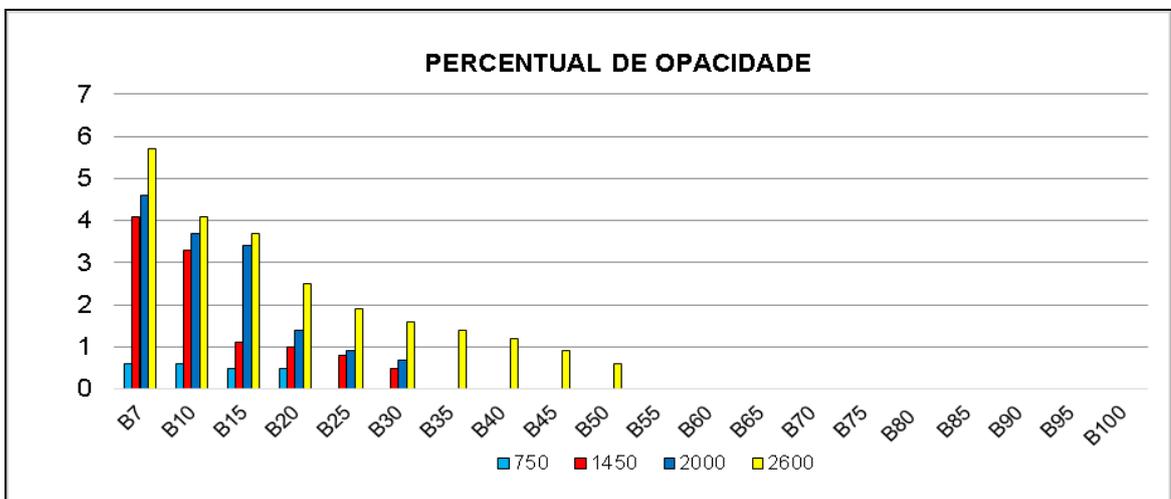


Figura 5.4. Opacidade em regime de plena carga nas diferentes rotações e % de biodiesel.

### 5.1.5. Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

O dióxido de carbono apresentou um comportamento que, conforme o aumento do percentual de biodiesel, os valores encontrados para o B100 apresentaram reduções de 10,85% comparado com B7 na rotação de marcha lenta (750 rpm), de 8,44% quando operando a 1450 rpm, de 16,16% a 2000 rpm e de 28,41% a 2600 rpm, conforme Figura 5.5. Alguns autores relatam que o CO<sub>2</sub> pode reduzir em até 30% em relação ao diesel fóssil em qualquer faixa de rotação e carga aplicada sobre o motor, Lapuerta (2007) e Armas *et al.*(2004).

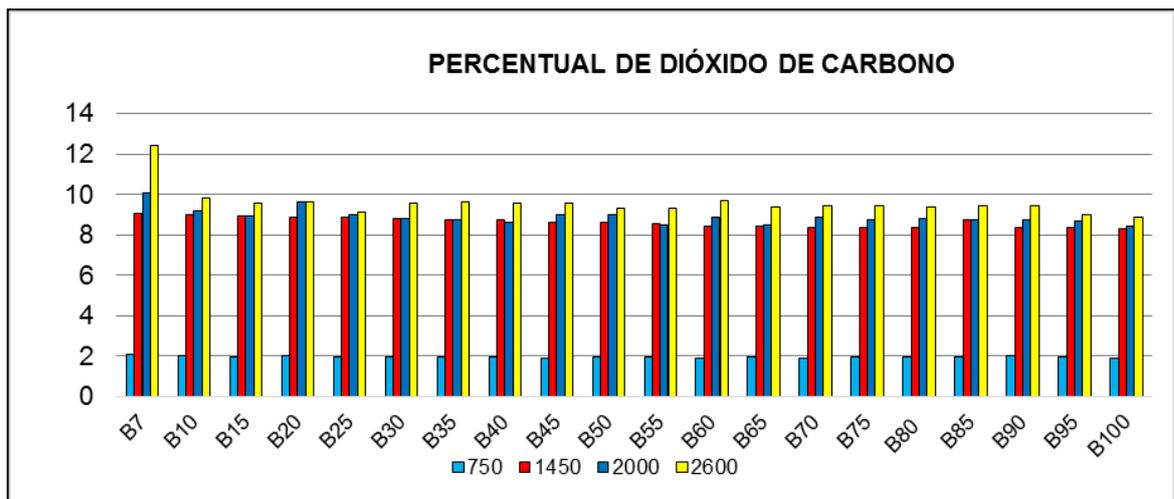


Figura 5.5. Emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para os diferentes combustíveis no regime de 750, 1450, 2000 e 2600 rpm.

## 5.2. Desempenho do Motor

### 5.2.1. Potência do Motor

A potência máxima do motor esta apresentada na Figura 5.6. onde a mesma reduz com a adição de biodiesel no B7, As medições para comparação da potência foram realizadas também a plena carga e a rotação de aproximadamente 2600 rpm, conforme os parâmetros do fabricante, apresentando o comportamento mostrado na Figura 5.7. onde é analisada neste gráfico as suas variações entre B7 e B100.

O aumento de potência para as misturas entre B10 e B20, pode ser justificado pelo fato de que as moléculas dos ésteres graxos que compõem o biodiesel possuem oxigênio na sua composição química, o que melhora a queima durante a combustão, já que existe maior disponibilidade deste elemento químico para o processo de oxidação dentro da câmara de combustão do motor (SERRANO *et al.* (2012).

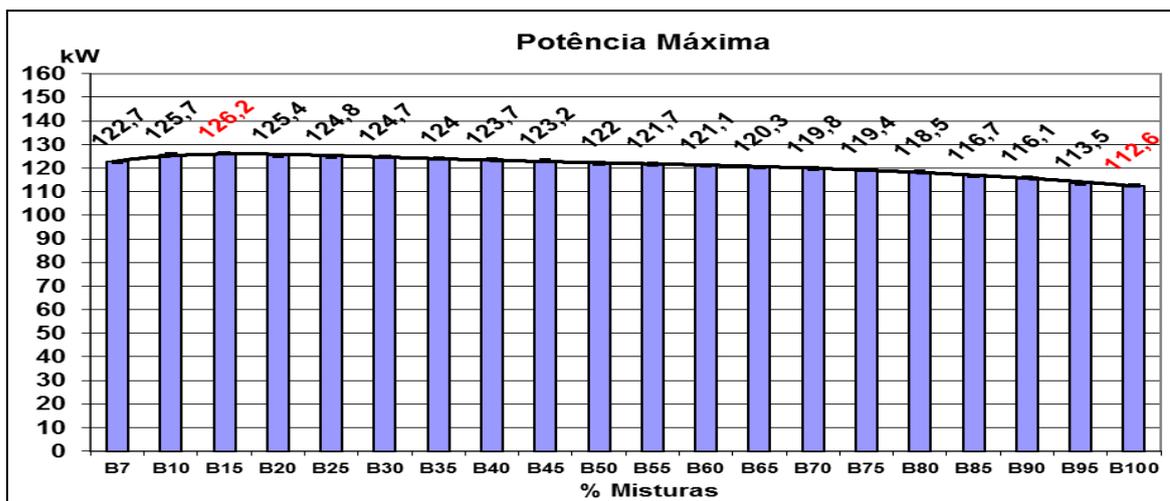


Figura 5.6. Potência máxima do motor para os diferentes combustíveis (Podorodeczki 2016).

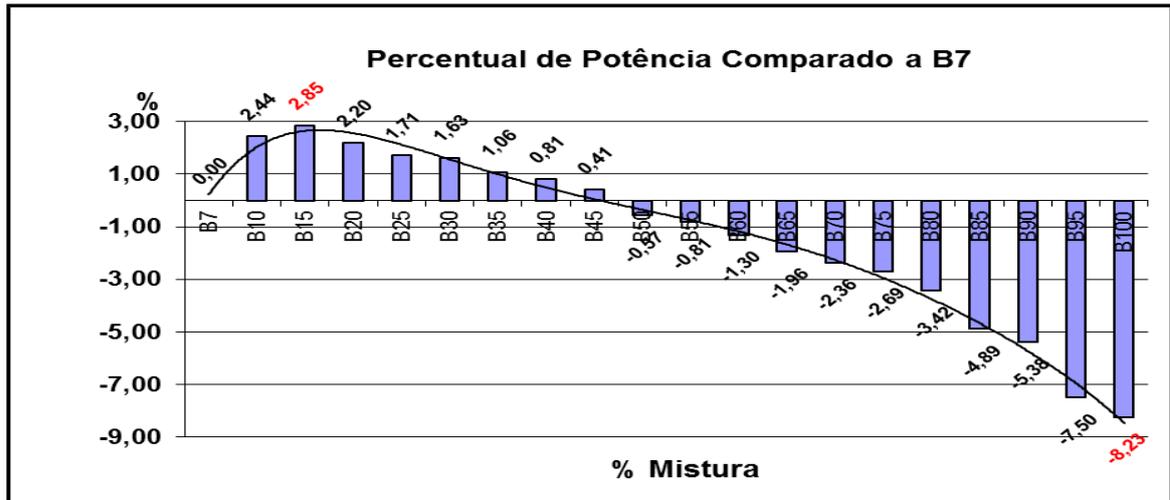


Figura 5.7. Percentual de potência do motor para os diferentes combustíveis (Podorodeczki 2016).

### 5.2.2. Torque do Motor

O motor apresentou um torque 526,2 Nm quando foi abastecido com a mistura B15 comparado com o diesel B7 e com o aumento do percentual de biodiesel na mistura nota-se que o torque vai diminuindo até chegar ao B100 onde apresenta 451 Nm, conforme apresentado na Figura 5.8. segundo Podorodeczki 2016.

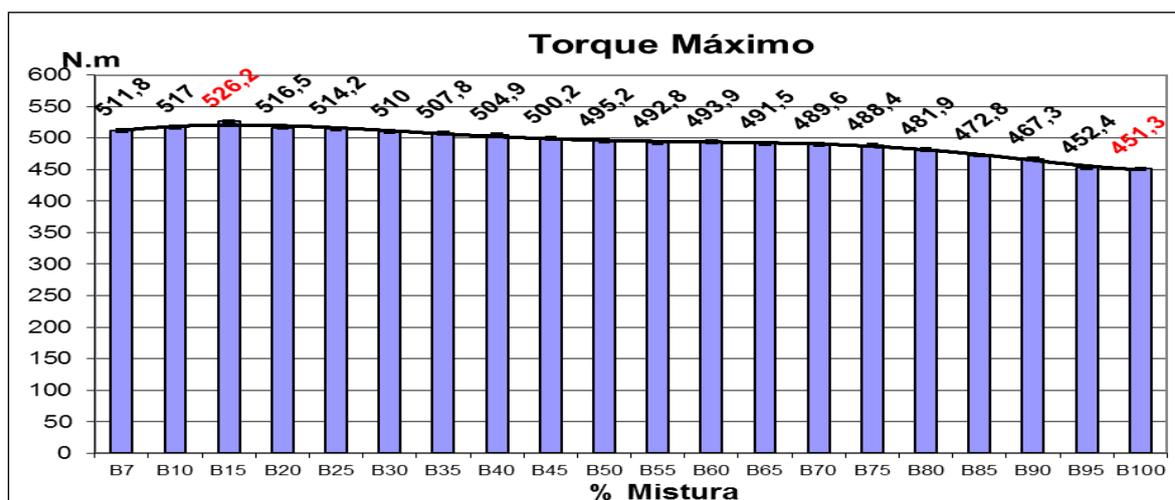


Figura 5.8. Percentual de torque do motor para os diferentes combustíveis (Podorodeczki 2016).

A Figura 5.9. faz a comparação com a mistura B7, onde a mistura B15 conseguiu uma performance superior (2,6% maior que o B7), e a mistura B100 com a pior performance (11,6% abaixo do torque obtido com a mistura B7), confirmando os dados apresentados da literatura (BARBOSA, 2008).

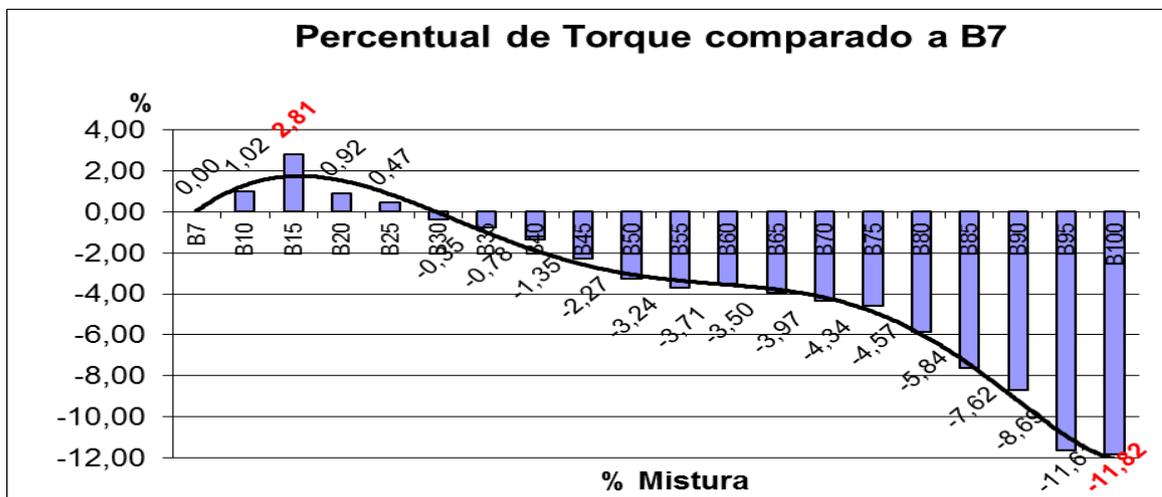


Figura 5.9. Percentual de torque do motor para os diferentes combustíveis (Podorodeczki 2016).

### 5.3. Considerações Finais

Com os valores médios das emissões dos gases de exaustão para cada condição analisada, regressão linear multivariável foi utilizada para obter expressões que correlacionem os gases emitidos com as diferentes misturas de diesel-biodiesel, as rotações do motor e opacidade conforme Figura 5.10. Em todos os casos, foi

adotado um intervalo de confiança de 95%, sendo que os coeficientes  $R^2$  ajustados ficaram acima de 0,70, e os fatores F de significância obtidos pela análise ANOVA apresentaram valores menores que 0,05, o que demonstra a correlação entre os parâmetros analisados.

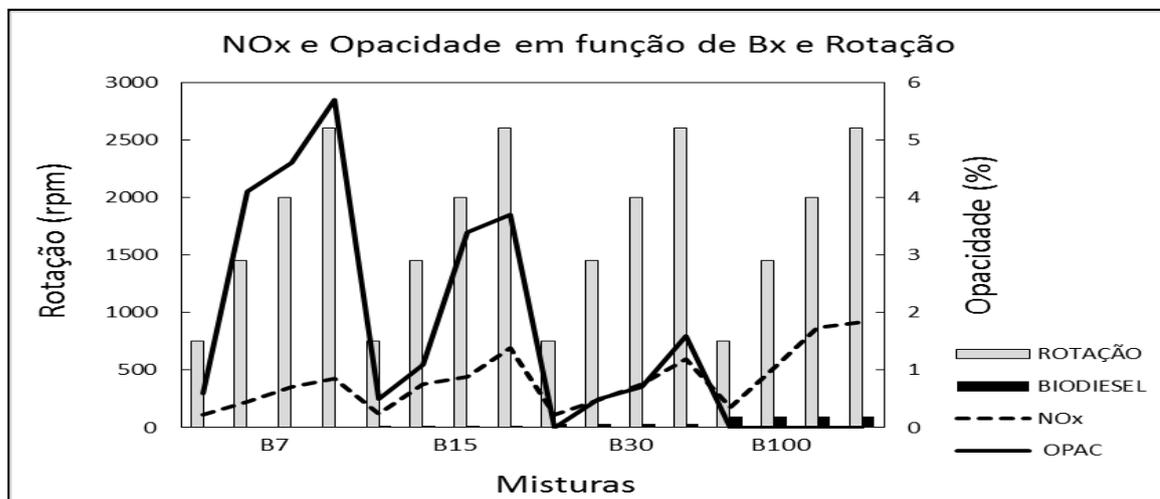


Figura 5.10. Regressão linear multivariável entre NO<sub>x</sub> e opacidade em função de biodiesel e rpm do motor.

$$\text{NOx} = -190,16611 + (0,32343951 \cdot \text{ROT}) + (2,47128429 \cdot \text{Bx}) - (26,166705 \cdot \text{OPAC})$$

Coeficientes		Estatística de regressão	
Interseção	-190,1661089	R múltiplo	0,940906669
ROTAÇÃO	0,323439506	R-Quadrado	0,88530536
BIODIESEL	2,471284295	R-quadrado ajustado	0,856631699
OPAC	-26,16670474	Erro padrão	96,9289605
		Observações	16

## ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	132,5721	44,19070578	12,69893341	0,000493749
Resíduo	12	41,7585	3,479875384		
Total	15	174,3306			

Conforme observa-se, à medida que se aumenta a rotação, as quantidades de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> aumentam para uma mesma mistura. Aumentando-se a quantidade de biodiesel no diesel, CO<sub>2</sub> diminui e o NO<sub>x</sub> aumenta quando comparado para as mesmas rotações conforme apresentado na Figura 5.11.

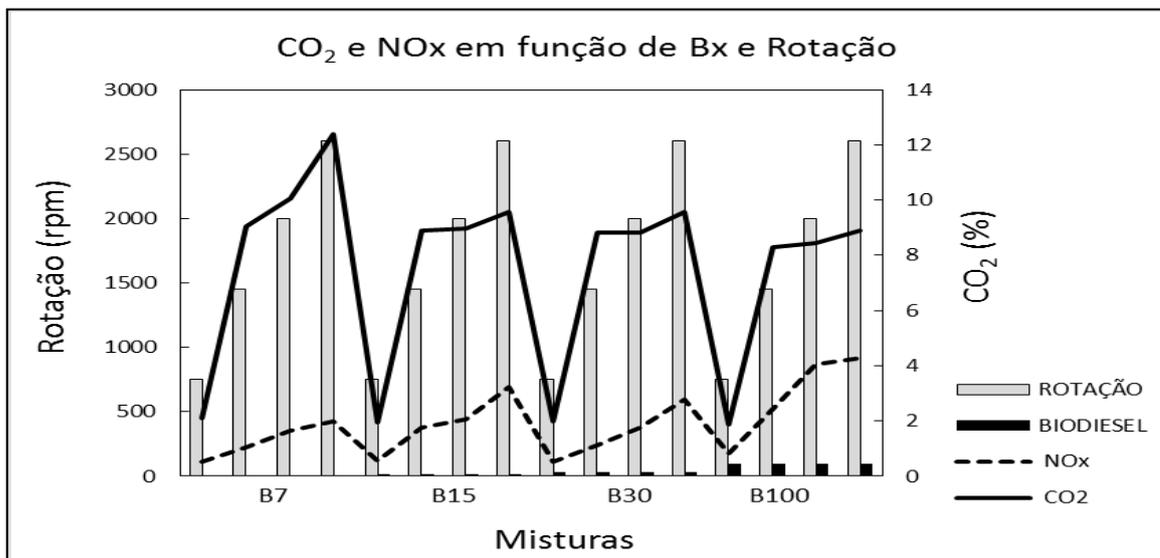


Figura 5.11. Regressão linear multivariável entre CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em função de biodiesel e rpm do motor.

$$\text{CO}_2 (\%) = 0,26469136 + (0,004988299 * \text{ROT}) - (0,0019916 * \text{Bx}) - (0,0028803 * \text{NOx})$$

<i>Coeficientes</i>		<i>Estatística de regressão</i>	
Interseção	0,264691358	R múltiplo	0,872045723
ROTAÇÃO	0,004982988	R-Quadrado	0,760463743
BIODIESEL	-0,001991615	R-quadrado ajustado	0,700579679
NOx	-0,002880312	Erro padrão	1,86544241
		Observações	16

## ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	870238,6	290079,5219	30,87521286	6,33913E-06
Resíduo	12	112742,7	9395,223384		
Total	15	982981,2			

Para as emissões de NO<sub>x</sub>, à medida que se aumenta a rotação e o teor de biodiesel ao diesel, as quantidades aumentam, enquanto que as opacidades diminuem com o aumento de biodiesel.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos nos ensaios, e análises realizadas, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- para as emissões de monóxido de carbono (CO), reduções de aproximadamente 80% foram observadas com o motor operando com B100 na rotação de 2600 rpm, quando comparado com B7;
- os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) tiveram aumentos próximos de 117% quando operando com B100 na rotação de 2600 rpm em comparação às emissões de B7 na mesma rotação;
- a opacidade devido ao material particulado (MP) teve uma diferença de 5,7% quando comparada ao combustível B7 em 2600 rpm, sendo que o B100 apresentou valor de 0%;
- o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) apresentou uma redução de 28,41% com o veículo abastecido com B100 na rotação de 2600 rpm;
- os resultados das análises de potência e torque obtidos com os testes realizados no veículo em dinamômetro de chassi, mostraram que quando o veículo abastecido com a mistura entre B15 e B20, apresenta um aumento de 2,85% na potência e 2,81% no torque produzido pelo motor comparando com o combustível B7 e para misturas acima de 20%, houve uma diminuição gradativa até 100% de Biodiesel, havendo variações em torno de 11,82% no torque e 8,2% na potência comparados

ao óleo de referência (B7).

- Conclui-se que o motor testado durante a execução do presente trabalho apresenta a possibilidade mecânica de operar com percentuais elevados de biodiesel sem comprometer seu funcionamento em qualquer uma das faixas que foi submetido ao teste, e em contrapartida, a emissão de NO<sub>x</sub> apresenta valores elevados comparado com o B7. Este item faz com que a mistura de biodiesel ao diesel fóssil tenha a melhor eficiência ambiental, valores próximos aos 15% para manter operando com a potência equivalente ao diesel fóssil sem comprometer o meio ambiente com a emissão do óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).

## 7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros, destacam-se:

- realização de testes de longa duração para realizar uma análise criteriosa do motor para que sejam avaliadas as condições de desgaste e geração de borras e depósitos no óleo lubrificante, assim como a análise química do lubrificante;
- análises com biodieseis obtidos de diferentes matérias primas com potencial de produção no Brasil, como palma, dendê e óleo de fritura usado, devido às diferentes propriedades físico-químicas do biocombustível obtido;
- adequação dos ensaios a norma ESC para comparação dos resultados entre si, e também com dados relatados na literatura especializada;
- realização de ensaios com o veículo em rota, permitindo a obtenção de dados reais durante operação cotidiana.
- realização de ensaios com veículos equipados com sistema de despoluição como recirculação dos gases de escape, filtro de material particulado e controle de malha fechada para o NO<sub>x</sub>.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil).  
**Resolução ANP 07/2008**. 2008. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 15 janeiro 2017.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil).  
**Resolução ANP 30/2016**. 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 15 janeiro 2017.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil).  
**Resolução ANP 45/2014**. 2014. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 20 agosto 2016.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil).  
**Resolução ANP 50/2013**. 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 03 abril 2016.

ALFUSO, S.; Auriemma, M.; Police, G.; and Prati, M.. "**The Effect of Methyl-Ester of Rapeseed Oil on Combustion and Emissions of DI Diesel Engines**," SAE , 1993.

ÁLVARES JUNIOR, O.M.; Lacava, C.I.V.; Fernandes, P.S. **Emissões Atmosféricas**. Brasília, SENAI/DN, 373 p. 2002.

ASAD, M.H.H.B.; Murtaza, G.; Siraj, S.; Khan S.A.; Azhar, S.; Hussain, M.S.; Ismail, T.. **Enlisting the scientifically unnoticed medicinal plants of Pakistan as a**

**source of novel therapeutic agents showing anti-venom activity.** Afr. J. Pharm. Pharmacol.; v. 5, p. 2292–2305, 2011.

NBR 14065: 2013. **Destilados de Petróleo e Óleos Viscosos - Determinação da Massa Específica e da Densidade Relativa pelo Densímetro Digital.** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2013.

BARBOSA, R. L.; Silva, F.M.; Salvador, N.; Volpato, C.E.S. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de Biodiesel.** Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set./out., 2008.

BARI S. Y.U.; C, Lim, T.. **Effect of fuel injection timing with waste cooking oil as a fuel in direct injection diesel engine.** Proc. Inst. Mech. Eng, Part D: J Automobile Eng, v. 218, p. 93, 2004.

BOSCH, R. **Test Bench for Function and Power Analysis – FLA 203.** Manual do Usuário, Alemanha, 2001.

BOSCH,R. **Manual de Tecnologia Automotiva.** 25<sup>a</sup> ed. São Paulo: E. Blucher. 2005. 1232p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. **Boletim Mensal dos combustíveis Renováveis – Julho 2016.** Brasília, Edição N<sup>o</sup>101, 26 p. . Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/publicacoes/boletim-mensal-de-combustiveis-renovaveis>>. Acesso em: 21 setembro 2016.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Edgard Blucher, 2012.

BUYUKKAYA, E. **Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics**. Fuel, v. 89, p. 3099-3105, 2010.

CANAKCI, M.; e Van Gerpen, J.. **Biodiesel Production via Acid Catalysis**. Trans. ASAE 42, v. 5, p.1203-1210, 1999.

CARVALHO JÚNIOR, J.A.; Lacava, P.T. **Emissões em Processos de Combustão**. São Paulo: UNESP, 137 p, 2003.

CHAVANNE, C.G.. **Procédé de Transformation d'huiles Végétales em Vue de Leur Utilisation Comme Carburants**, Patente Belga nº.422,877(31 de agosto de 1937).Chem. Abstr. 32:43132 (1938).

CHEVRON U.S.A. Inc. **Diesel Fuel Technical Review**. (FTR-2). San Fransisco, CA, 1998.

CNT - CONSOLIDAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte – Principais Dados**, 2016. Disponível em: <http://www.http://anuariodotransporte.cnt.org.br/>. Acesso em 25 outubro 2016.

CUNHA, M.E. **Caracterização de Biodiesel Produzido com Misturas Binárias de Sebo Bovino, Óleo de Frango e Óleo de Soja**. 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Porto Alegre, 2008.

DABDOUB, M.J.; Bronzel, J.L.; Rampin, M.A. **Biodiesel: Visão Crítica do Status Atual e Perspectivas na Academia e na Indústria.** Química Nova, v. 32, n.3, p. 776-792, 2009.

DORADO, MP.; Ballesteros, E.; Arnal, JM.; Gomez, J.; López, F.. **Exhaust emissions form a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil.** Fuel, v. 82, p. 1311-1315. 2003.

ESC. **European Stationary Cycle.** Disponível em: <<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.php>>. Acesso em: 22 maio 2015.

FENGER, J. **Air pollution in the last 50 year** – from local to global. Atmospheric. Karen Sturges, 2009.

FORD. **Manual de Serviços Ford F-250.** 2006.

FORD. **Apostila de Apresentação Técnica F- 250 4x4 Max Power.** Versão 1.0. 2006.

HABMIGERN. **Sensores Eletroquímicos.** Disponível em:<<http://www.habmigern.com>>. Acesso em 23 junho 2016.

HEYWOOD, J.B. **Internal combustion engine fundamentals;** McGraw-Hill Education, 1988.

INPI - INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (Brasil). **Mapeamento tecnológico do Biodiesel e tecnologias correlatas sob o enfoque dos pedidos de Patentes**, 2008. Disponível em:<<http://www.inpi.gov.br>>. Acesso em: 22 abril 2016.

KADO, N.Y, Kuzmicky, P.A. **Bioassay analyses of particulate matter from a diesel bus engine using various biodiesel feedstock fuels**. National Renewable Energy Laboratory U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, Oak Ridge, TN USA. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/31463>>. Acesso em: 25 agosto 2017.

KEITH, O., e Conley, T.. **Automotive Fuels Reference Book**. SAE, Inc. Warrendale, PA., 2<sup>nd</sup> edição, p.487-519, 1995.

KINNEY, P.L. **Climate change, air quality, and human health**. American Journal of Preventive Medicine, v. 35, n. 5, 2008..

KNOTHE, G.; Van Gerpen, J.; Krahl, J.; Ramos, L.P. **Manual do Biodiesel**. São Paulo: Edgard-Blücher, 340 p, 2006.

KURZ, H. **The Catalytic Alcoholysis of Fatty oils with Alcoholic Potash**. Fette u. Seifen, v. 44, p.144-145, 1937.

LADOMMATOS, N., M. Parsi e A. Knowles, **The Effect of Fuel Cetane Improver on Diesel Pollutant Emissions**. Fuel, v. 75, p. 8-14, 1996.

LANE, J.C. **Gasoline and Other Motor Fuel**, em *Kirk-Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology*, 3<sup>rd</sup> ed, Vol.11. John Wiley e Sons, NY, 1980.

LEPERA, M. **Low-Sulfur and Diesel Fuel Lubricity – The Continuing Saga.** LePera and Associates. Fuel line Magazine, v. 4, 2000, 19p.

LAPUERTA, M.; Armas, O.; Ballesteros, R. **Diesel particulate emissions from biofuels derived from Spanish vegetable oils.** 2002. Disponível em:<[http://www.acbiodiesel.net/docs/ponencias/2004/ResumMagin\(Ang\).pdf](http://www.acbiodiesel.net/docs/ponencias/2004/ResumMagin(Ang).pdf)>. Acesso em: 10 julho. 2017.

LAPUERTA, M.; Armas, O.; Herreros, J. M. **Emissions from a diesel–bioethanol blend in an automotive diesel engine.** Fuel, v. 87, p. 25–31, 2008.

LAPUERTA, M.; Armas, O.; Rodríguez-Fernández, J. **Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 34, p. 198–223, 2008.

LAPUERTA, M.; Rodríguez-Fernández, J.; Agudelo, J. R. **Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel.** Bioresource Technology, v. 99, p. 731–740, 2008.

LIAQUAT, A. M., Kalam, MA., Masjuki,HH., Jayed, MH. . **Engine performance and emissions analysis using “Envo Diesel” and Coconut biodiesel blended fuel as alternative fuels.**In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY: ICEST, 2011. p.168-172.

MANAHAN, S.E. **Fundamentals of Environmental Chemistry.** 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. Publindústria, Porto, Portugal, 2006.

MENEZES, E. W. **Produção de trabalhos, geração de contaminantes e tratamento póscombustão em motores ciclo diesel**. 2009, 150 f. Dissertação (doutorado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MING-HO, Y. **Environmental Toxicology: biological and health effects of pollutants**. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2005.

MITCHELL, K. **Diesel Fuel Lubricity- Base Fuel Effects**. SAE Techn. Pap. Ser. 2001-01-1928 (2001).

MUNACK, A., O. Schröder, J. Krahl, and J. Bünger. “**Comparison of Relevant Exhaust Gas Emissions from Biodiesel and Fossil Diesel Fuel**”. t Manuscript EE 01 001. V.3, 2001.

NAJJAR, Y.S.H., **Gaseous Polluants Formation and Their Harmful effects on Health and Environment**. Innovative Energy Policies, v. 1, Article IDE101203, 2011.

NAOA. **Carbon-Dioxide-Levels**. Disponível em: <<http://www.noaa.gov/news/carbon-dioxide-levels-rose-at-record-pace-for-2nd-straight-year>>. Acesso em:12 julho 2017.

NAPRO. **Manual de Instruções**, NAPRO PRO 8500. 2016.

ÖZENER, O., Yüksek, L., Özkan, M. **Effects of Soyben Biodiesel on a DI Diesel**

**Engine performance, Emission and Combustion Characteristics.** Fuel, v.115, p. 875-883, 2014.

PETERSON, CL, Reece, DL. **Emissions testing with blends of esters of rapeseed oil fuel with and without a catalytic converter.** SAE 961114; 1996.

PINTO, A.C.; Guarieiro, L.L.N.; Rezende, M.J.C.; Ribeiro, N.M.; Torres, E.A.;Lopes, W.A.; Pereira, P.A.P.; Andrade, J.B. Biodiesel: An Overview. **Journal of de Brazilian Chemical Society**, vol. 16, n. 6B, p. 1313-1330, 2005.

PLINT, M.A., **Engine Testing Theory and Practice**, 3 ed., England, Butterworth-Heinemann, 2007.

PODORODECZKI, PAULO. **Análise de desempenho de motor diesel com injeção eletrônica Common Rail alimentado com misturas diesel - biodiesel em dinamômetro de chassis.** Porto Alegre. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) .Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

PORTAL DO BIODIESEL. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel.** 2010. Disponível em: < <http://www.biodiesel.gov.br/>>. Acesso em: 04 dezembro 2016.

PROCONVE. Ministério do Meio Ambiente. 2011. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_arquivos/proconve\\_163.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf)>. Acesso em:14 junho 2017.

PUCKETT, A.D., B.H Caudle, U.S. Bur. Mines, **Inform Circ. nº. 7474**, 14 p; 1948.

REAY, D.S.; Grace, J. Carbon Dioxide: Importance, Sources and Sinks. In: REAY, D. S.; HEWITT, C.N.; SMITH, K. A.; GRACE, J. **Greenhouse Gas Sinks**. CAB International, 2007.

SCHNELLE JÚNIOR, K.B.; Brown, C.A. **Air Pollution Control Technology**. CRC PRESS, 2001.

SCHWAB, A.W., M.O.Bagby, e B. Freedman; **Preparation and Proprieties of Diesel Fuels from Vegetable Oils**. Fuel, v. 66, p. 1372-1378, 1987.

SERRANO, L. M. V.; Câmara, R. M. O.; Carreira, V. J. R.; Silva, M. C. G. da. **Performance study about Biodiesel impact on buses engines using dynamometer tests and fleet consumption data**. Energy Conversion and Management. Vol. 60, p.2–9, 2012.

SZYBIST JP, Boehman Al. **Behavior of a Diesel Injection System With Biodiesel Fuel**. SAE 2003-01-1039; 2003.

TZIOURTZIOUMIS, DIMITRIS; Stamatelos, An. **Effects of a 70% Biodiesel blend on the fuel injection system operation during steady-state and transient performance of a common rail diesel engine**. Energy Conversion and Management, v. 60, p.56 -67. 2012.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S. EPA). **Automobiles and Carbon Monoxide**. Fact Sheet OMS – 3. 1993. 4 p.

U.S. EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Nitrogen Dioxide** - Automobiles and Carbon Monoxide. Fact Sheet OMS – 3. 1993. 4 p.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air Quality Guidelines for Particulate.**

## 9. APÊNDICE A

### Características do diesel, conforme ANP 65 (2011).

Característica (1)	Unidade	Limite				Método	
		Tipo A e B				ABNT NBR	ASTM/EN
		S10	S50 (2)	S500	S1800 (3)		
Aspecto	-	Limpido e isento de impurezas				14954	D4716
Cor	-	(4)		(5) (6)			
Cor ASTM, máx.	-	3,0 (7)				14483	D1500 e D6045
Teor de biodiesel (8)	% volume	(9)				15568	EN 14078
Enxofre total, máx.	mg/kg	10	50	-	-	-	D2622, D5453 D7039, D7212 (10) D7220 (10)
Massa específica a 20°C	kg/m³	820 a 850 (11)		820 a 865	820 a 880	7148 e 14065	D1298 e D4052
Ponto de fulgor, mín.	°C	38				7974, 14598	D56, D93, D3828
Viscosidade a 40°C	mm²/s	2,0 a 4,5		2,0 a 5,0		10441	D445
Destilação							
10% vol., recuperados	°C	180,0 (mín.)	Anotar			9619	D86
50% vol., recuperados		245,0 a 295,0	245,0 a 310,0				
85% vol., recuperados, máx.		-	-	360	370		
90% vol., recuperados		-	360,0 (máx.)	Anotar	Anotar		
95% vol., recuperados, máx.		370	-				
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(12)				14747	D6371
Número de cetano ou número de cetano derivado (NCD), mín.	-	48	46	42 (13)		-	D613 D6890 e D7170
Resíduo de carbono Ramsbottom no resíduo dos 10% finais da destilação, máx.	% massa	0,25				14318	D524
Cinzas, máx.	% massa	0,01				9842	D482
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx.	-	1				14359	D130
Água (14)	mg/kg	200 (máx.)	Anotar	-	-	-	D6304 EN ISO 12937
Contaminação total (14)	mg/kg	24 (máx.)	Anotar	-	-	-	EN 12662
Água e sedimentos, máx. (15)	% volume	0,05				-	D2709
Hydrocarbonetos policíclicos aromáticos (16)	% massa	11 (máx.)	Anotar	-	-	-	D5186 e D6591 (17) EN 12916 (17)
Estabilidade à oxidação (16)	mg/100mL	2,5 (máx.)	Anotar	-	-	-	D2274 (18) e D5304
Índice de neutralização	mg KOH/g	Anotar				-	D974
Lubricidade, máx.	µm	(19)				-	D 6079 ISO 12156
Condutividade elétrica, mín (20)	pS/m	25	-	-	-	-	D2624 e D4308

- (1) Poderão ser incluídas nesta especificação outras características, com seus respectivos limites, para o óleo diesel obtido de processos diversos de refino de petróleo e centrais de matérias-primas petroquímicas ou nos termos a que se refere o § 1º do art. 1º desta Resolução.
- (2) A partir de 1º de janeiro de 2013, os óleos diesel A 550 e B 550 deixarão de ser comercializados e serão substituídos integralmente pelos óleos diesel A S10 e B S10, respectivamente.
- (3) A partir de 1º de janeiro de 2014, os óleos diesel A S1800 e B S1800 deixarão de ser comercializados como óleos diesel de uso rodoviário.
- (4) Coloração entre o incolor e o amarelado, podendo o tipo B apresentar-se ligeiramente alterado para as tonalidades marrom e alaranjada.
- (5) Conforme disposto no art. 11, da presente Resolução, deverão ser observados os seguintes limites:
- a) até 30 de junho de 2012, os indicados na nota (4) para o óleo diesel S500 e "vermelho" para o óleo diesel S1800;
- b) a partir de 1º de julho de 2012, "vermelho" para o óleo diesel S500 e, de amarelo a alaranjado, podendo o tipo B apresentar-se ligeiramente alterado para a tonalidade marrom, para o óleo diesel S1800.
- (Nota)
- (6) O corante vermelho deve ser adicionado de forma tal que seu teor na mistura seja de 20 mg/L.
- (7) Limite requerido antes da adição do corante.
- (8) Aplicável apenas para o óleo diesel B.
- (9) No percentual estabelecido pela legislação vigente. Será admitida variação de ± 0,5 % volume.
- (10) Aplicáveis apenas para óleo diesel A.
- (11) Será admitida a faixa de 820 a 853 kg/m³ para o óleo diesel B.
- (12) Limites conforme Tabela II.
- (13) Alternativamente, fica permitida a determinação do índice de cetano calculado pelo método NBR 14759 (ASTM D4737), para os óleos diesel A S500 e A S1800, quando o produto não contiver aditivo melhorador de cetano, com limite mínimo de 45. No caso de não-conformidade, o ensaio de número de cetano deverá ser realizado. O produtor e o importador deverão informar no Certificado de Qualidade a presença de aditivo melhorador de cetano, nos casos em que tal aditivo for utilizado. Ressalta-se que o índice de cetano não traduz a qualidade de ignição do óleo diesel contendo biodiesel e/ou aditivo melhorador de cetano.
- (14) Aplicável na produção e na importação.
- (15) Aplicável na importação, antes da liberação do produto para comercialização.
- (16) Os resultados da estabilidade à oxidação e dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos poderão ser encaminhados ao distribuidor até 48 h após a comercialização do produto de modo a garantir o fluxo adequado do abastecimento.
- (17) O método EN 12916 é aplicável ao óleo diesel B contendo até 5% de biodiesel. Os métodos ASTM D5186 e D6591 não se aplicam ao óleo diesel B.
- (18) O método ASTM D2274 se aplica apenas ao óleo diesel A.
- (19) Poderá ser determinada pelos métodos ISO 12156 ou ASTM D6079, sendo aplicáveis os limites de 460 µm e 520 µm, respectivamente. A medição da lubricidade poderá ser realizada após a adição do biodiesel, no teor estabelecido na legislação vigente.
- (20) Limite requerido no momento e na temperatura do carregamento/bombelo do combustível pelo produtor e distribuidor.

Tabela II - Ponto de Entupimento de Filtro a Frio

Unidades da Federação	Limite Máximo, °C											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
SP - MG - MS	12	12	12	7	3	3	3	3	7	9	9	12
GO/DF - MT - ES - RJ	12	12	12	10	5	5	5	8	8	10	12	12
PR - SC - RS	10	10	7	7	0	0	0	0	0	7	7	10

## 10. APÊNDICE B

### Caracterização da amostra de biodiesel, Oleoplan.

Característica		Unidade	Resultado	Especificações	Métodos
Aspecto/Temperatura	21,9   °C	-	LII	LII	Visual
Massa Específica a 20 °C		kg/m <sup>3</sup>	878,2	850-900	NBR 7148:2013
Viscosidade Cinemática a 40 °C		mm <sup>2</sup> /s	4,3	3,0-6,0	NBR 10441:2014
Teor de água (Procedimento A)		mg/kg	146,7	200,0 (máx.)	ASTM D6304-07
Contaminação Total		mg/kg	21	24 (máx.)	EN 12662:2008
Ponto de Fulgor (Procedimento C)		°C	172,0	100,0 (mín.)	NBR 14598:2012
Teor de éster		% massa	97,2	96,5 (mín.)	EN 14103:2015
Cinzas Sulfatadas		% massa	##	0,020 (máx.)	NBR 6294:2008
Enxofre total		mg/kg	6,7	10 (máx.)	ASTM D5453-12
Sódio + Potássio		mg/kg	2,5	5 (máx.)	NBR 15553:2015
Cálcio + Magnésio		mg/kg	0,23	5 (máx.)	NBR 15553:2015
Fósforo		mg/kg	3,3	10 (máx.)	NBR 15553:2015
Corrosão ao Cobre, 3h a 50 °C		-	##	1 (máx.)	NBR 14359:2013
Ponto de entupimento de filtro a frio(*)		°C	2	3 (máx.)	NBR 14747:2008
Índice de acidez (Método B)		mgKOH/g	0,48	0,50 (máx.)	ASTM D664-11a
Glicerol livre		%massa	0,02	0,02 (máx.)	ASTM D6584-13
Glicerol total		%massa	0,18	0,25 (máx.)	ASTM D6584-13
Metanol ou Etanol		%massa	-	0,20 (máx.)	EN 14110:2003
Estabilidade à oxidação a 110°C		h	10	8 (mín.)	EN 14112:2003
Monoacilglicerol		%massa	0,6	0,7 (máx.)	ASTM D 6584-13
Diacilglicerol		%massa	0,10	0,20 (máx.)	ASTM D 6584-13
Triacilglicerol		%massa	0,004	0,20 (máx.)	ASTM D 6584-13
Índice de Iodo		g/100g	111	ANOTAR	EN 14111:2003

Especificações de acordo com a Resolução ANP N° 45 de 25.08.2014 - DOU 26.08.2014, Regulamento Técnico ANP n° 03/2014.  
 OBS: (L.I.D) limpo e isento de impurezas com anotação da temperatura de ensaio.  
 (\*) Resultado de acordo com contratos referentes aos leilões bimestrais.  
 (##) Ensaio trimestrais.  
 Nota 1: A amostragem é de total responsabilidade do cliente.  
 Nota 2: Os resultados apresentados fazem referência apenas às amostras ensaiadas.  
 Nota 3: Sua reprodução deve ser completa, do contrário, somente com aprovação escrita do laboratório.

Francine Carvalho Mello

Técnico Químico – CRQ 05408362  
 Laboratório de Controle de Qualidade Oleoplan Cadastro nº 048 - CRQ 2304

OLEOPLAN S.A. ÓLEOS VEGETAIS PLANALTO  
 RST 470 – km 109 – Nº. 3482 – CEP: 95330 – 000 – VERANÓPOLIS – RS  
 FONE: (54) 3441 3300 – FAX: (54) 3441 3300  
 E-mail: laboratorio\_biodiesel@oleoplanver.com.br, atendimento@oleoplanver.com.br  
 Site: www.oleoplanver.com.br