

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Cap CLAUDIO VIDAL TEIXEIRA**

**ANÁLISE DE EMISSÕES E DESEMPENHO DE MOTORES DIESEL UTILIZANDO  
ÓLEO DIESEL COMERCIAL, BIODIESEL DE PALMA (B100) E MISTURAS (BX)**

**Rio de Janeiro**

**2010**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**Cap CLAUDIO VIDAL TEIXEIRA**

**ANÁLISE DE EMISSÕES E DESEMPENHO DE MOTORES  
DIESEL UTILIZANDO ÓLEO DIESEL COMERCIAL,  
BIODIESEL DE PALMA (B100) E MISTURAS (BX)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Marcelo José Colaço – D.C. e Aldélio Bueno Caldeira – D,C.

Rio de Janeiro

2010

c2010

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

São permitidas a menção, a reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e dos orientador(es).

620.1 Teixeira, Claudio Vidal.

T2 66a Análise de Emissões e Desempenho de Motores Diesel Utilizando Óleo Diesel Comercial, Biodiesel de Palma (B100) e Misturas (BX) / Claudio Vidal Teixeira – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2010.

88 p. : Il.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2010.

1. Motores estacionários – óleo diesel. 2. Motores do ciclo diesel. 3. Biodiesel de Palma. 3. Misturas (BX). I. Instituto Militar de Engenharia. II Título

CDD 620.1

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**Cap CLAUDIO VIDAL TEIXEIRA**

**ANÁLISE DE EMISSÕES E DESEMPENHO DE MOTORES DIESEL  
UTILIZANDO ÓLEO DIESEL COMERCIAL, BIODIESEL DE PALMA  
(B100) E MISTURAS (BX)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Marcelo José Colaço –D.C. e Aldélio Bueno Caldeira – D. C.

Aprovada em 10 de fevereiro de 2010 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Aldélio Bueno Caldeira – CAP QEM D. C. do IME (Presidente)

---

Marcelo José Colaço, D. C. da COPPE/UFRJ (Membro)

---

Prof. Leonardo Santos de Brito Alves, Ph.D. do IME (Membro)

---

Albino José Kalab Leiroz Ph.D. da COPPE/UFRJ (Membro)

À minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me acompanha desde que nasci.

Aos meus pais que não mediram esforços para que eu tivesse acesso às melhores escolas.

À minha esposa pela paciência a mim dispensada.

À minha filha que me inspira todos os dias.

À FAPERJ, ao CNPq, à CAPES e ao Exército Brasileiro, que tornou possível a realização deste estudo.

Ao INT que permitiu o acompanhamento, em suas instalações, dos ensaios de características físico-química dos combustíveis.

Aos Professores Carlos R. P. Belchior e Albino J. K. Leiroz, por ter permitido a utilização de instalações na COPPE / UFRJ para realizar os experimentos.

Ao Sr. Ivanildo M. Souza, Sr. Itamar R. Rangel, Sr. Pedro P. Pereira e Sr. Nauberto R. Pinto pela cooperação e apoio técnico.

Ao Departamento de Química do Instituto Militar de Engenharia (IME) pelo apoio despendido pelos Professores Wilma A. Gonzalez, e Eduardo Luiz P. Borges e pela dedicação da Sra. Claudia R. Machado.

Aos meus orientadores Marcelo José Colaço, Aldélio Bueno Caldeira e Leonardo Santos de Brito Alves que colaboraram com seus inestimáveis conhecimentos e dedicaram parte do precioso tempo que dispõem para me orientar.

Aos meus colegas Fabrício Santos Velozo, Luís Anselmo de Andrade Filho, Renan de Souza Teixeira e Luciana de Moraes Dutra que conviveram e dividiram momentos de alegria, de perplexidade e de extremo desespero; sentimentos típicos de alunos de pós-graduação.

A todos, muito obrigado.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	09
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	13
LISTA DE SIGLAS.....	15
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1 Biocombustível no mundo.....	20
1.2 Biocombustível no Brasil.....	21
1.3 Fontes de energia.....	23
1.3.1 Óleo diesel.....	23
1.3.2 Biocombustível.....	24
1.3.3 Biodiesel.....	24
1.3.4 Biodiesel de palma.....	25
1.4 Revisão bibliográfica.....	26
1.4.1 Propriedades físico-químicas do combustível.....	29
1.4.2 Massa específica.....	29
1.4.3 Viscosidade cinemática.....	30
1.4.4 Teor de enxofre.....	30
1.4.5 Teor de carbono, de hidrogênio e de nitrogênio.....	31
1.4.6 Poder calorífico.....	31
1.4.7 Número de cetano.....	32
1.5 Motivação.....	33
1.6 Objetivo do trabalho.....	34
1.7 Organização do trabalho.....	34
<b>2 ANÁLISE DE EMISSÕES E O DESEMPENHO DO MOTOR MWM D229/3... 36</b>	<b>36</b>
2.1 Óleo diesel comercial (B3).....	36
2.2 Biodiesel de palma (B100-E).....	36

2.3	Instrumentos de medida.....	37
2.4	Características técnicas dos equipamentos.....	37
2.4.1	Motor e bomba injetora.....	37
2.4.2	Dinamômetro.....	38
2.4.3	Analizador de gases.....	39
2.5	Metodologia aplicada na execução dos ensaios.....	40
2.5.1	Local de execução dos testes.....	40
2.5.2	Medidas preliminares.....	40
2.5.3	Medidas preventivas.....	41
2.5.4	Teste de desempenho.....	41
2.6	Resultados.....	42
2.6.1	Emissões de O <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> .....	43
2.6.2	Emissões de NO <sub>x</sub> .....	45
2.6.3	Consumo específico de combustível.....	47
2.7	Conclusão.....	49
<b>3</b>	<b>PRIMEIRA ANALISÉ DE EMISSÕES E O DESEMPENHO DO MOTOR</b>	
	<b>AGRALE M95.....</b>	<b>50</b>
3.1	Instrumentos de medida e equipamentos.....	51
3.1.1	Balança de precisão.....	51
3.1.2	Dinamômetro e motor.....	52
3.1.3	Opacímetro.....	53
3.2	Metodologia aplicada na execução dos ensaios.....	54
3.2.1	Local de execução dos testes.....	55
3.2.3	Teste de desempenho.....	55
3.3	Resultados.....	55
3.3.1	Emissões de O <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> .....	55
3.3.2	Emissão de NO <sub>x</sub> .....	58
3.3.3	Opacidade.....	59
3.3.4	Consumo específico de combustível.....	61
3.4	Conclusão.....	62



<b>4</b>	<b>SEGUNDA ANALISÉ DE EMISSÕES E O DESEMPENHO DO MOTOR AGRALE M95.....</b>	<b>64</b>
4.1	Instrumentos de medida e equipamentos.....	65
4.2	Teste de desempenho.....	65
4.3	Resultados.....	66
4.3.1	Emissões de CO <sub>2</sub> .....	66
4.3.2	Emissão de NO <sub>x</sub> .....	68
4.3.3	Consumo específico de combustível.....	69
4.3.4	Influência do número de cetano no atraso da ignição.....	72
4.4	Conclusão.....	73
<b>5</b>	<b>ANALISÉ DE EMISSÕES E O DESEMPENHO DO MOTOR AGRALE M90..</b>	<b>74</b>
5.1	Características técnicas dos equipamentos.....	75
5.2	Metodologia aplicada na execução dos ensaios.....	76
5.2.1	Medidas preliminares.....	76
5.2.3	Medidas preventivas.....	77
5.3	Teste de desempenho.....	77
5.4	Resultados.....	77
5.4.1	Emissão de NO <sub>x</sub> .....	77
5.4.3	Consumo específico de combustível.....	78
5.4.5	Viscosidade cinemática.....	80
5.5	Conclusão.....	81
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>82</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1.1	Fruto da palmeira.....	26
FIG. 2.1	Esquema representativo do banco dinamométrico.....	42
FIG. 2.2	Composição média dos gases de exaustão do motor diesel sem catalisador.....	43
FIG. 2.3	Emissão de O <sub>2</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1200 rpm .....	43
FIG. 2.4	Emissão de O <sub>2</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1600 rpm .....	44
FIG. 2.5	Emissão de CO <sub>2</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1200 rpm .....	44
FIG. 2.6	Emissão de CO <sub>2</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1600 rpm.....	45
FIG. 2.7	Emissão de NO <sub>x</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1200 rpm.....	46
FIG. 2.8	Emissão de NO <sub>x</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1600 rpm.....	46
FIG. 2.9	Consumo específico do motor MWM 295 com velocidade angular de 1200 rpm.....	48

FIG. 2.10	Consumo específico do motor MWM 295 com velocidade angular de 1600 rpm.....	48
FIG. 3.1	Esquema representativo do banco dinamométrico.....	51
FIG. 3.2	Emissão de O <sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 50 % de carga..	56
FIG. 3.3	Emissão de O <sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 75 % de carga..	56
FIG. 3.4	Emissão de O <sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com carga plena.....	56
FIG. 3.5	Emissão de CO <sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 50 % de carga.....	57
FIG. 3.6	Emissão de CO <sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 75 % de carga.....	57
FIG. 3.7	Emissão de CO <sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com carga plena...	57
FIG. 3.8	Emissão de NO <sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com 50 % de carga.....	58
FIG. 3.9	Emissão de NO <sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com 75 % de carga.....	58
FIG. 3.10	Emissão de NO <sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com carga plena..	59
FIG. 3.11	Opacidade do motor AGRALE M95 com 50 % de carga.....	60
FIG. 3.12	Opacidade do motor AGRALE M95 com 75 % de carga.....	60

FIG. 3.13	Opacidade do motor AGRALE M95 com carga plena.....	60
FIG. 3.14	Consumo específico do motor AGRALE M95 com 50 % de carga.....	61
FIG. 3.15	Consumo específico do motor AGRALE M95 com 75 % de carga.....	61
FIG 3.16	Consumo específico do motor AGRALE M95 com carga plena.....	62
FIG. 4.1	Esquema representativo do banco dinamométrico.....	66
FIG. 4.2	Emissão de CO <sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 50 % de carga.....	67
FIG. 4.3	Emissão de CO <sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 75 % de carga.....	67
FIG. 4.4	Emissão de CO <sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com plena carga...	67
FIG. 4.5	Emissão de NO <sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com 50 % de carga.....	68
FIG. 4.6	Emissão de NO <sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com 75 % de carga.....	69
FIG. 4.7	Emissão de NO <sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com plena carga..	69
FIG. 4.8	Consumo específico do motor AGRALE M95 com 50 % de carga.....	70

FIG. 4.9	Consumo específico do motor AGRALE M95 com 75 % de carga.....	70
FIG. 4.10	Consumo específico do motor AGRALE M95 com plena carga.....	70
FIG. 4.11	Influência do número de cetano no atraso da ignição.....	72
FIG. 4.12	Influência do número de cetano no atraso da ignição.....	72
FIG. 5.1	Esquema representativo dos equipamentos.....	74
FIG. 5.2	Emissão de NOx do motor AGRALE M90.....	78
FIG. 5.3	Consumo Específico do motor AGRALE M90.....	80
FIG. 5.4	Viscosidade Cinemática a 40 °C ( cSt).....	81

## LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1	Especificação do Motor.....	38
TAB.2.2	Especificação da Bomba Injetora.....	38
TAB. 2.3	Especificação do Dinamômetro.....	39
TAB. 2. 4	Especificação do analisador de gases MODAL 2010-AO.....	39
TAB. 3.1	Especificação dos Combustíveis.....	50
TAB. 3.2	Especificação da Balança OHAUS.....	52
TAB. 3.3	Especificação do Dinamômetro DYNAM.....	52
TAB. 3.4	Especificação do motor diesel AGRALE M95.....	53
TAB. 3. 5	Especificação do Opacímetro.....	54
TAB. 4.1	Especificação dos Combustíveis.....	65
TAB. 4.2	Rendimento dos Combustíveis.....	71
TAB. 5.1	Especificação do Motor.....	75
TAB. 5.2	Especificação do Gerador.....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

- B3 - Óleo diesel comercial com adição de 3% de biodiesel
- B4 - Óleo diesel comercial com adição de 4% de biodiesel
- B20-E - Mistura do biodiesel de palma obtido através do processo de esterificação com óleo diesel comercial (B3), totalizando 20% de biodiesel na mistura.
- B50-E - Mistura do biodiesel de palma obtido através do processo de esterificação com óleo diesel comercial (B3), totalizando 50% de biodiesel na mistura.
- B100-E - Biodiesel de palma obtido através do processo de esterificação
- B20-T - Mistura do biodiesel de palma obtido através do processo de transesterificação com óleo diesel comercial (B3), totalizando 20% de biodiesel na mistura.
- B50-T - Mistura do biodiesel de palma obtido através do processo de transesterificação com óleo diesel comercial (B3), totalizando 50% de biodiesel na mistura.
- B100-T - Biodiesel de palma obtido através do processo de transesterificação
- BX - Combustível composto de (100-X)% em volume de óleo diesel

B100	- Combustível composto de 100% em volume de biodiesel
CEC	- Consumo específico de combustível
HMN	- Heptametilnonano
$\dot{m}$	- Fluxo de massa
NC	- Número de cetano
NO <sub>x</sub>	- Óxido de nitrogênio
rpm	- Rotação por minuto
SO <sub>x</sub>	- Óxido de enxofre
t	- Tempo
$\dot{V}$	- Vazão volumétrica
v	- Volume

## **SÍMBOLO**

$\rho$	- Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
--------	---



## LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFR	Cooperative Fuel Research
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
DOU	Diário Oficial da União
GTI	Grupo de Trabalho Interministerial
IME	Instituto Militar de Engenharia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MCT	Ministério da Ciência e da Tecnologia
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
OVEG	Programa de Óleos Vegetais
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
PROBIODIESEL	Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel
UFC	Universidade Federal do Ceará

UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro

## RESUMO

A substituição dos combustíveis de origem fóssil, considerados fontes não renováveis, por combustíveis de fontes renováveis, tornou-se um objetivo global, destacando-se em três áreas primordiais: a econômica, a política e a social.

Entretanto, para que a inserção de biodiesel no mercado se torne uma realidade é necessário transpor alguns obstáculos. Estudos mostram que motores de ciclo diesel só estão aptos a trabalhar, sem modificação, com misturas contendo até 20 % de biodiesel. Acima deste percentual há entaves técnicos que necessitam de avaliações mais elaboradas quanto ao desempenho, ao consumo específico de combustível e às emissões do motor.

A finalidade deste trabalho é analisar o desempenho e as emissões de motores estacionários do ciclo diesel abastecidos com óleo diesel, biodiesel de palma e percentuais de misturas entre o biodiesel de palma e o óleo diesel. Levantar algumas propriedades físico-químicas dos diversos tipos de combustíveis empregados e avaliar a influência de cada uma delas.

## **ABSTRACT**

The substitution of fossil fuels, considered non-renewable energy resources, by renewable fuels, has become a global objective which has relevant features in three major areas: economic, political and social. However, in order to introduce biodiesel in the market it is necessary to overcome some obstacles.

Studies show that diesel engines are only able to work, without modifications, with blends containing up to 20% biodiesel. There are technical constraints for percentages above 20% that need to be studied in detail such as: performance, specific fuel consumption and exhaust gas emissions.

The purpose of this study is to analyze the performance and exhaust gas emissions of stationary diesel engine fueled with diesel, palm oil biodiesel and its blends with diesel. The main goal is to characterize them through their physical properties and evaluate the influence of each one on engine operation.

# 1- INTRODUÇÃO

## 1.1 BIOCOMBUSTÍVEL NO MUNDO

As primeiras notícias de utilização de óleos vegetais como combustível datam do século XIX, em decorrência da criação do motor à combustão interna feita pelo engenheiro Rudolph Christian Carl Diesel (SEBASTIAN, 2001). A invenção teve repercussão extraordinária quando foi apresentado, oficialmente, na Feira Mundial de Paris em 1898. Neste evento, o óleo de amendoim foi o combustível utilizado para abastecer o motor (MARCOVITCH, 2006).

Com o advento dos motores de injeção direta sem pré-câmara, os óleos vegetais foram substituídos por um resíduo de petróleo que, em homenagem a Rudolph Diesel, foi denominado de óleo diesel. Este combustível passou a ser largamente utilizado porque, naquela ocasião, havia petróleo em abundância e os preços de seus derivados eram acessíveis. Além da prerrogativa econômica, o óleo diesel apresentava vantagens técnicas relevantes se comparado aos demais combustíveis de origem vegetal, pois não provocava acúmulo de resíduos gordurosos nem depósitos de carbono.

Como o impacto ambiental deste novo produto era desconhecido, os benefícios econômicos e técnicos que o óleo diesel possuía foram suficientes para que a substituição do combustível de origem vegetal ocorresse sem entraves. Desde então, o óleo mineral supriu parte relevante da demanda mundial de energia por quase oito décadas.

A primeira crise do petróleo, que eclodiu em 1973, foi deflagrada devida à elevada demanda deste produto, aliada à possibilidade de esgotamento das reservas fósseis. Entretanto, segundo alguns historiadores, a crise foi fomentada pela articulação política dos países membros da OPEP, que controlava a maior fatia da produção mundial de petróleo (HOLLANDER,2004). Qualquer que tenha sido o motivo que suscitou tal crise, as implicações econômicas foram catastróficas, pois o episódio provocou aumento considerável nos preços dos produtos derivados do

petróleo. A elevada cotação do barril induziu à racionalização do consumo e, conseqüentemente, a queda mundial na fabricação de produtos industrializados, devido à grande dependência ao petróleo a que os países estavam submetidos. O saldo positivo desta década, que ficou marcada pela instabilidade econômica, foi o desencadeamento de pesquisas científicas e tecnológicas em busca de fontes de energia alternativas e renováveis.

## 1.2 BIOCOMBUSTÍVEL NO BRASIL

No Brasil, as investigações relativas à utilização de óleos vegetais, como combustível alternativo, ocorreram bem antes da crise do petróleo. As primeiras pesquisas foram desenvolvidas pelo Instituto Nacional de Tecnologia nos anos de 1920. Em decorrência da experiência adquirida ao longo dos anos, foi possível viabilizar o lançamento do primeiro carro a álcool na década de 1970 (ZOUAIN,2001). No ano de 1950, o Instituto de Tecnologia Industrial de Minas Gerais realizou ensaios em motores diesel de 6 cilindros, utilizando como combustível óleos provenientes do ouricuri, da mamona e do algodão. Entretanto, foi nos anos 70 que as pesquisas sobre a utilização de combustível de origem vegetal ganharam impulso. O objetivo principal era reduzir a dependência da energia de origem mineral, cujo preço e fornecimento estavam desestabilizados devido às crises energéticas que assolaram o mundo naquela década (OSAKI, 2008). Esta conjuntura deu origem, em 1975, ao Plano de Produção de Óleos Vegetais para fins Energéticos - Pró-óleo, que pretendia gerar um excedente de óleo vegetal capaz de tornar seus custos de produção competitivos com os do petróleo (ELIMAR, 2007).

O ano de 1980 ficou marcado por uma descoberta importante: o Probiodiesel. Este combustível de origem vegetal, que tinha como objetivo substituir o óleo diesel, originou-se dos diversos estudos realizados por Exedito José de Sá Parente na UFC. O pesquisador utilizou óleos vegetais derivados da soja, do babaçu, do amendoim, do caroço de algodão, da colza, do girassol e do dendê para desenvolver o combustível. Na mesma década, foi criado o querosene vegetal de aviação que recebeu o nome de Prosene e tinha como finalidade substituir o querosene de

aviação Estas duas descobertas deram origem ao registro, pelo INPI, da primeira patente mundial do biodiesel e do querosene vegetal de aviação que, com tempo, passou a ser de domínio público (PARENTE, 2003).

Em 1982, o Governo Federal lançou o Programa de Óleos Vegetais (OVEG), em parceria com a indústria automobilística. O projeto estava voltado, especificamente, para a comprovação técnica da utilização do biodiesel em motores diesel. Mais uma vez, a motivação foi gerada pela alta nos preços do petróleo, reflexo da segunda crise que ocorreu em 1979. O OVEG contou com a participação de diversos institutos de pesquisa como IME, IPT e UFC, além do apoio das indústrias automobilísticas, dos fabricantes de peças e dos produtores de lubrificantes. Entretanto, em 1985, o declínio do preço do petróleo no mercado mundial fez com que os investimentos em estudos sobre combustíveis derivados de óleos vegetais desvanecessem, impedindo o desenvolvimento do programa (HINRICHS, 2003). Contudo, os estudos com biodiesel continuaram sendo realizados por pesquisadores brasileiros. Este esforço resultou no patenteamento do processo de produção de biodiesel a partir da semente de mamona, em 2001.

A valorização dos aspectos ambientais, aliada a sustentabilidade dos sistemas energéticos e ao receio da notória instabilidade no preço do petróleo, trouxe de volta o interesse no combustível proveniente de óleos vegetais. Com isso, diversas instituições passaram a desenvolver atividades neste campo e algumas ações governamentais foram tomadas para impulsionar as pesquisas científicas.

No ano de 2000, as universidades, centros de pesquisa e empresas brasileiras, foram incentivadas a realizar projetos de desenvolvimento de tecnologia e de produção de biodiesel. Mais tarde, através da Portaria MCT 702, de 30 de outubro de 2002, o Governo Federal lançou o Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel – PROBIODIESEL.

Essas ações estavam focadas em três frentes principais: i) promover o desenvolvimento científico e tecnológico do biodiesel; ii) substituir o diesel de petróleo por óleos vegetais, diminuindo a dependência do combustível fóssil; e, iii) contribuir com a inclusão social e com o desenvolvimento regional. A previsão do governo brasileiro era gerar mais de 200.000 postos de trabalho por meio destas medidas (UNEP, 2007).

Em 2004, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) foi instituído, fruto de estudos realizados pelo Grupo de Trabalho Interministerial (GTI), que abordavam a viabilidade de utilização de biodiesel como fonte alternativa de energia.

Finalmente, em 2005, o biodiesel foi introduzido na matriz energética brasileira, por força de lei. A mesma lei ampliou as funções da ANP, que desde então assumiu a atribuição de regular e fiscalizar as atividades relativas à produção, ao controle de qualidade, à distribuição, à revenda e à comercialização do biodiesel e da mistura óleo diesel-biodiesel.

O Marco Regulatório foi editado neste mesmo ano, o que tornou possível organizar a cadeia produtiva, definir as linhas de financiamento e estruturar a base tecnológica do biodiesel. Além disso, estabeleceu as condições legais para a introdução do biodiesel no óleo diesel comercializado no Brasil na proporção de 2%, em 2008, e de 5%, até 2013.

Entretanto, a Resolução nº 2 do CNPE publicada em março de 2008, alterou de 2% para 3% o percentual obrigatório de biodiesel ao óleo diesel, a partir de 1º de julho de 2008. Esta medida comprova que o Brasil pretende acelerar o processo de utilização de biodiesel, como fonte alternativa de energia. Motivos não faltam, uma vez que o consumo brasileiro de óleo diesel é da ordem de 36 bilhões de litros, dos quais cerca de 20% são obtidos por meio de importação de petróleo. A produção de biocombustível abre, portanto, possibilidades de modificar este cenário conferindo independência econômica e uma posição estratégica em relação ao combustível fóssil.

## 1.3 FONTES DE ENERGIA

### 1.3.1 ÓLEO DIESEL

O óleo diesel é um derivado da destilação do petróleo bruto constituído basicamente por hidrocarbonetos. É um composto formado principalmente por



átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio. O diesel é selecionado de acordo com suas características de ignição e de escoamento, adequadas ao funcionamento dos motores ciclo diesel. É um produto pouco inflamável, medianamente tóxico, pouco volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico.

### 1.3.2 BIOCOMBUSTÍVEL

Os Biocombustíveis são fontes de energia renováveis origem biológica não fóssil fabricado em escala comercial a partir de matérias orgânicas vegetais com potencial econômico aproveitável plantas oleaginosas, biomassa florestal, cana-de-açúcar, mamona, soja, canola, babaçu, mandioca, milho, beterraba. Os principais tipos de biocombustíveis são: bioetanol, biogás, biomassa e biodiesel.

### 1.3.3 BIODIESEL

O biodiesel é um éster de ácido graxo, obtido a partir da transesterificação, que é uma reação química de óleos ou gorduras de origem animal ou vegetal, com um álcool na presença de um catalisador (MEIRELLES FILHO, 2003). Há várias espécies de vegetais no Brasil que podem ser utilizadas como matéria-prima do biodiesel: mamona, dendê (palma), girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso e soja. O biodiesel pode também ser obtido por outros processos tais como o craqueamento e a esterificação.

A Resolução NR 7 de 19 de Março de 2008 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, publicada no DOU de 20 de março de 2008, estabeleceu a definição de biodiesel para todos os efeitos legais e de controle de qualidade: Biodiesel – B100: combustível composto de alqui-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais, conforme a especificação contida no Regulamento Técnico nº 1/2008.

A mesma resolução também estabeleceu a definição de misturas entre diesel e biodiesel: Mistura óleo diesel/biodiesel – BX – combustível comercial composto de (100-X)% em volume de óleo diesel, conforme especificação da ANP, e X% em volume do biodiesel.

O biodiesel apresenta uma série de características que o coloca em vantagem em relação ao combustível de origem fóssil. A principal delas consiste no fato de ser fonte de energia renovável em curto prazo ao contrário dos combustíveis fósseis que levam milhões de anos para se formarem. Além disso, tem alto ponto de fulgor e, portanto, baixo risco de explosão, facilitando assim o transporte e o armazenamento. Em relação ao efeito estufa, a queima de biodiesel gera índices de poluição menores se comparada a queima de óleo diesel, proporcionando ganho ambiental para todo o planeta. A produção de plantas que originam o biodiesel gera emprego e renda no campo, contribuindo para diminuição do êxodo rural, pois no Brasil há muitas terras cultiváveis que podem produzir uma enorme variedade de oleaginosas com um baixo custo de produção, até mesmo nos solos menos produtivos.

Apesar dos aspectos positivos, o biodiesel apresenta algumas desvantagens que podem comprometer a utilização dessa fonte de energia de maneira sustentável. Para suprir uma demanda mundial serão necessárias plantações em grandes áreas agrícolas. Isto pode ocasionar desmatamento indiscriminado de florestas em países que não fiscalizam adequadamente sua flora. Além disso, o uso de grãos para a produção do biodiesel pode acarretar aumento nos preços dos produtos derivados deste tipo de matéria-prima ou que os utilizam em alguma fase de produção.

#### 1.3.4 BIODIESEL DE PALMA

O dendezeiro ou palma (*Elaeis guineensis*), palmeira originária da Costa Ocidental da África (Golfo da Guiné), tem grande potencial para produção de energia renovável devido à grande produtividade de óleo por hectare e ao custo de produção mais atraente se comparado com outras oleaginosas. Portanto, o dendezeiro disposta como uma das culturas mais promissoras para produção de óleo e sua

conversão em biocombustível. Dos frutos do dendezeiro, podem ser extraídos dois tipos de óleos: óleo de palma, extraído da polpa do fruto e óleo de palmiste, extraído da amêndoa do fruto, conforme mostra a FIG. 1.1.

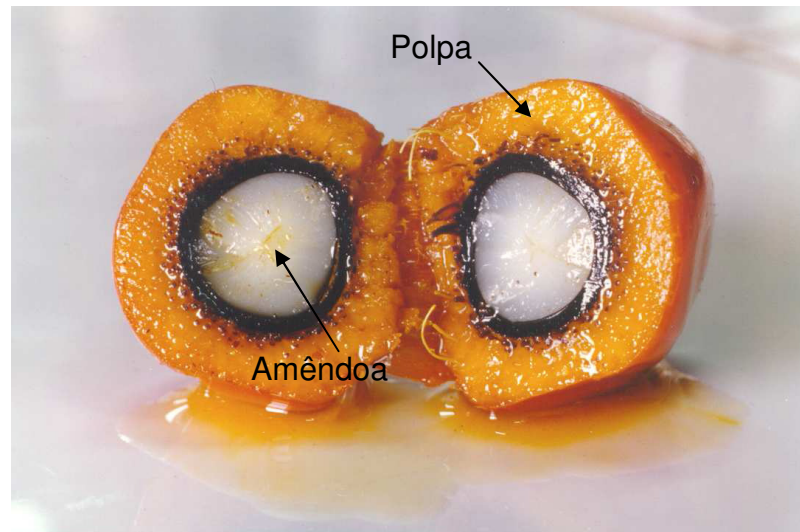


FIG. 1.1 - Fruto da palmeira

Atualmente, a produção desta oleaginosa no Brasil é modesta se comparada à países como a Malásia e Indonésia, mas possui amplo potencial para a produção do óleo de dendê, dado milhões de hectares de terras aptas à cultura do dendezeiro.

O cultivo desta planta seria uma solução apropriada para biodiesel no Brasil se for levado em conta os impactos sociais e ambientais, uma vez que pode ocupar terras degradadas pela pecuária bovina e começa a produzir com menos de 3 anos, sendo produtivo por mais de 20 anos.

#### 1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

KALAM e MASJUKI (2002) examinaram o desempenho e as emissões dos gases em um motor de 4 cilindros Isuzu 4FB1 e, para coletar os dados, empregaram um dinamômetro e um analisador de gases Bosch ETT 008.36. No estudo foram utilizados três combustíveis diferentes, cujas características estão expostas a seguir:

(OD) óleo diesel comum; (A) 50 ppm aditivo + 7.5% biodiesel de palma (POD) + 92.5% OD; e (B) 50 ppm aditivo + 15% biodiesel de palma (POD) + 85% OD. Em relação à potência, os resultados mostram que, quanto maior a concentração de biodiesel de palma, melhor o desempenho do motor. Isto ocorreu devido ao aditivo IRGANOR NPA que influenciou a transformação de energia térmica em energia mecânica aumentando a eficiência no momento da combustão. Quanto às emissões de gases, foi observado que um aumento na concentração de biodiesel de palma no combustível utilizado acarretou diminuição de NOx, de CO e de HC, sendo que o óleo diesel apresentou os maiores índices desses produtos nas amostras de emissões coletadas.

ALMEIDA et al. (2002) utilizaram um motor diesel MWM - 229 de 70 kW de potência abastecido com óleo de palma in natura e com óleo diesel. O estudo foi realizado a fim de verificar a concentração das emissões dos gases de escape e o consumo específico dos combustíveis utilizados. Os resultados mostraram que o consumo específico do óleo de palma é, aproximadamente, 10% maior do que o do óleo diesel. Isto ocorre devido ao poder calorífico do óleo de palma ser menor, requerendo maior quantidade de massa de combustível para realizar a mesma tarefa. O diesel apresentou menor concentração em relação ao CO. Quanto ao HC, ambos combustíveis apresentam baixas quantidades em cargas parciais, mas tendências de aumento em solicitações de carga alta. Já as emissões de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> permaneceram, praticamente, a mesma. O NOx também aumentou com o aumento de carga, fato associado ao aumento a temperatura na câmara de combustão.

KANOK-ON e CHINDA (2004) utilizaram um motor diesel monocilíndrico Yanmar – TF 85 LM para verificar seu desempenho, utilizando como combustível o óleo diesel comum; misturas B10, B50, B90 e B100 de biodiesel de palma e misturas B10, B50, B90 e B100 de óleo vegetal de côco in natura. Após vários experimentos, constataram que a potência diminuiu quando o motor foi abastecido com as misturas de biodiesel de palma e misturas de óleo vegetal de côco in natura. Em contrapartida, o consumo específico aumentou à medida que a porcentagem de óleo diesel na mistura diminuiu.

RAKOPOULOS et al. (2006) conduziram um estudo experimental para avaliar o desempenho e a emissão de gases provenientes de um motor abastecido com vários combustíveis: misturas B10 e B20 de biodiesel de algodão, de soja, de

girassol, de colza e de palma); (misturas B10 e B20 de óleos vegetais in natura de soja, de girassol de milho e de semente de azeitona); (óleo diesel convencional). Os testes foram executados utilizando um motor diesel monocilíndrico, trabalhando em velocidade angular de 2000 rpm e submetido a cargas média e alta. Os resultados mostram que as emissões de NO<sub>x</sub> tiveram suave redução utilizando misturas B10 e B20 de óleo vegetal e misturas B10 e B20 de biodiesel, se comparadas as emissões oriundas do diesel convencional. Quanto ao CO, foi observado o mesmo comportamento em relação às misturas B10 e B20 de biodiesel, mas exatamente o contrário utilizando misturas B10 e B20 de óleos de origem vegetal. Já as emissões de HC não apresentaram mudanças relevantes. Em relação ao consumo específico, os testes apontam um leve aumento tanto ao abastecer o motor com misturas B10 e B20 óleos de origem vegetal quanto com misturas B10 e B20 de biodiesel.

WANDER et al. (2007) analisaram, numa bancada dinamométrica, o desempenho e as emissões de dois motores estacionários: um monocilíndrico e o outro com dois cilindros, ambos fabricados pela Agrale. Utilizaram como combustível o diesel tipo B e misturas B5, B30, B50, B75 e B100 de diesel e biodiesel proveniente da soja, da mamona e da palma. Em relação ao desempenho, os resultados médios encontrados foram: redução de 2,5% na potência, decréscimo de 2,0% no torque e aumento de 7,6% no consumo específico nas misturas acima de B50. Concernente às emissões, foi observado que, em relação ao óleo diesel puro, o biodiesel (B100) apresenta: diminuição de 4,3 para 3,0 no índice de fumaça (Escala Bosch); redução 45,0% de CO e, aproximadamente, 8,7% de decréscimo de CO<sub>2</sub>.

JOVÍLSON et al. (2007) analisaram a concentração de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> existente nos gases de exaustão provenientes de um motor diesel estacionário Agrale-M85. O motor, conectado a um gerador Kohlbach de 4 kVA, foi abastecido por quatro combustíveis diferentes: óleo diesel e misturas com concentração de 2%, 5% e 10% de biodiesel de palma. Foi observado que, em todos os combustíveis utilizados, as emissões de CO<sub>2</sub> aumentam a partir do momento em que é exigido 80% da plena carga do gerador. O mesmo acontece com as emissões do SO<sub>2</sub> e do CO, com a diferença que o fenômeno ocorre a partir de 90% de plena carga. Em relação ao NO<sub>x</sub> e ao consumo específico, acontece exatamente o contrário. A partir

de 50% de plena carga a emissão NO<sub>x</sub> e o consumo específico diminuem à medida que a carga aumenta.

KALAM e MASJUKI (2008) estudaram o comportamento do motor de 4 cilindros Isuzu 4FB1, utilizando três combustíveis diferentes: 100% óleo diesel (B0); 20% biodiesel de palma e 80% diesel B0 (B20); e B20 com X% de aditivo (B20X), onde X é a porcentagem do aditivo 4-Nonyl phenoxy acetic acid (NPAA) no combustível B20. Os resultados mostram que o B20X apresentou potência maior que o B20 e o B0, o que pode ser atribuído à influência do aditivo. Em relação ao consumo específico, o comportamento do B20 e do B20X foram similares ao do B0 até atingir a velocidade angular de 2250 rpm, após este patamar, o consumo de combustível do B20 aumenta. O consumo do B20X continua semelhante ao do B0 até atingir a velocidade angular de 3500 rpm e depois aumenta. Quanto às emissões, a concentração de NO<sub>x</sub>, CO e de HC são menores no combustível B20X, seguida do B20 e, por último do B0.

#### 1.4.1 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS COMBUSTÍVEIS

##### 1.4.1.1 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica de um combustível é definida como a massa por unidade de volume, medida a uma determinada temperatura e pressão. Esta propriedade é importante nos motores que operam segundo o ciclo diesel porque, nestes casos, a injeção de combustível na câmara de combustão é feita em um sistema de medida volumétrica.

O acréscimo na massa específica de um combustível pode causar tanto aumento de potência quanto de emissão de fumaça. Para evitar o avanço nas emissões de poluentes e padronizar as características dos combustíveis existem limites que estabelecem os intervalos em que a massa específica de determinados combustíveis deve se enquadrar. De acordo com o regulamento técnico da ANP NR 4/2009, o óleo diesel deve ter massa específica no intervalo de 820 e 850 kg/m<sup>3</sup>, já

de acordo com o regulamento técnico da ANP NR 47/2010 o biodiesel deve ter massa específica entre 850 e 900 kg/m<sup>3</sup>.

#### 1.4.1.2 VISCOSIDADE CINEMÁTICA

A viscosidade descreve a resistência de um fluido ao escoamento. Costuma ser medida e apresentada como viscosidade dinâmica ou como viscosidade cinemática. A viscosidade dinâmica, expressa normalmente em unidades centiPoise (cP), representa a resistência ao cisalhamento de um fluido quando este é sujeito, sob certas condições, a um movimento forçado. A viscosidade cinemática, expressa normalmente em unidades centiStoke (cSt) corresponde viscosidade dinâmica dividida pela massa específica do fluido (KENKEL, 2003).

A viscosidade exerce uma forte influência sobre a forma que o combustível assume quando é pulverizado na câmara de combustão. Viscosidade alta pode provocar a atomização pobre, gotas grandes e alta penetração do jato de combustível na câmara de combustão. Como resultado, o combustível não é bem misturado com o ar acarretando em combustão pobre, acompanhada de perda de potência e desperdício de combustível. Por outro lado, quando o combustível apresenta baixa viscosidade a pulverização é prejudicada, fazendo com que o jato de combustível não penetre o suficiente na câmara de combustão. Este fato reduz a potência e a eficiência do motor. Além disso, o desgaste dos componentes do sistema de combustível pode aumentar porque as propriedades lubrificantes de combustível tende a diminuir (TOTTEN, 2003)

#### 1.4.1.3 TEOR DE ENXOFRE

Os combustíveis fósseis são formados principalmente por carbono e hidrogênio. O Enxofre, o Nitrogênio e o Oxigênio apesar de serem encontrados em baixas concentrações, também fazem parte dos combustíveis fósseis.

O enxofre é um elemento indesejável em qualquer combustível devido à ação corrosiva de seus compostos e à formação de gases tóxicos como  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre) e  $\text{SO}_3$  (trióxido de enxofre), que ocorre durante a combustão do produto. Além disso, na presença de água, o trióxido de enxofre forma ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), que é altamente corrosivo para as partes metálicas dos equipamentos e também extremamente danoso ao meio ambiente.

O enxofre tem baixo poder calorífico e pequena porcentagem presente nos combustíveis líquidos se comparado ao carbono e ao hidrogênio (KREITH, 2005). Fazendo uma comparação entre os danos que o enxofre pode trazer ao meio ambiente e a contribuição na composição do poder calorífico dos combustíveis, conclui-se que a redução do o enxofre nos combustíveis pode é benéfica.

#### 1.4.1.4 TEOR DE CARBONO, DE HIDROGÊNIO E DE NITROGÊNIO

Combustíveis líquidos, independentemente de serem de origem fóssil ou biológica, apresentam em sua composição química o hidrogênio e o carbono. Estes elementos são os que mais contribuem para o poder calorífico do combustível. O percentual de carbono presente nos combustíveis líquidos é da ordem de 80 a 85% e o poder calorífico é de 8140 kcal/kg. O hidrogênio tem um poder calorífico de 28700 kcal/kg, com um percentual da ordem de 10 a 15 %.

#### 1.4.1.5 PODER CALORÍFICO

A quantidade de calor liberado durante a combustão de uma unidade de massa ou volume de um combustível é denominada Poder Calorífico. Há dois tipos de poder calorífico: poder calorífico superior e poder calorífico inferior.

O primeiro é dado pela soma da energia libertada na forma de calor e a energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de oxidação. O segundo somente leva em consideração a energia liberada na forma de calor.



O poder calorífico é uma informação importante na caracterização do combustível, pois para liberar a mesma quantidade energia um combustível com menor poder calorífico terá um consumo maior (SOUZA SANTOS, 2004)

#### 1.4.1.6 NÚMERO DE CETANO

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

Quanto menor for o atraso para realizar estas etapas melhor será a qualidade de ignição do combustível. Um atraso longo provoca um acúmulo de combustível sem queimar na câmara. Isto acarreta no mau funcionamento do motor, pois a auto-ignição, fora do ponto ideal, aumenta a pressão bruscamente causando esforços anormais sobre o pistão, um forte ruído característico, danos mecânicos e perda de potência.

A qualidade de ignição do diesel pode ser medida pelo seu número de cetano (NC) que é obtido através de um ensaio padronizado do combustível em um motor (CFR) mono-cilíndrico, operando sob condições também padronizadas onde se compara o seu atraso de ignição em relação a um combustível padrão com número de cetano conhecido.

Combustíveis com alto teor de parafinas apresentam alto número de cetano, enquanto produtos ricos em hidrocarbonetos aromáticos apresentam baixo número de cetano. Na determinação do número de cetano o desempenho do combustível é comparado com o desempenho do n-hexadecano, produto parafínico comercializado como cetano, o qual é atribuído um número de cetano igual a 100 (NC=100). A um

produto aromático (alfa mentil-naftaleno) é atribuído um número de cetano igual a zero (NC=0). Portanto um combustível com NC = 45 tem a mesma qualidade de ignição que uma mistura dos padrões acima contendo 45% de cetano. Contudo, o heptametilnonano (HMN), com NC = 15, foi adotado como o limite inferior da escala, em substituição ao alfa-metilnaftaleno do procedimento original, por ser um produto mais estável (ONURSAL et al., 1997).

O número de cetano dos combustíveis especificados nas tabelas 3.1 e 4.1 foram obtidos no Laboratório de Máquinas Térmicas/COPPE/UFRJ, de acordo com a norma técnica ASTM D613-01. Nos testes para obtenção do número de cetano foi utilizado um motor CFR com as seguintes características: injeção indireta, monocilíndrico, quatro tempos, e compressão variável.

## 1.5 MOTIVAÇÃO

Há três aspectos relevantes que devem ser considerados em relação à substituição do óleo diesel pelo biodiesel: o econômico, o político e o social.

No Brasil o escoamento de mercadorias e produtos é feito, principalmente, através de rodovias. Como os veículos empregados nos transportes utilizam óleo diesel, a demanda por este combustível é alta.

Além disso, o país ainda não alcançou a auto-suficiência em relação a este combustível, sendo obrigado a importar óleo diesel. Portanto, a utilização do biodiesel no abastecimento da frota de veículos movido a óleo diesel traria grandes benefícios para a economia brasileira. Este fato, aliado à possibilidade da comercialização do biodiesel no mercado externo, produziria reflexos positivos para constituição de uma balança comercial favorável. A independência em relação ao combustível fóssil fortaleceria o país no campo político, pois evitaria que este fique suscetível a instabilidades no preço do barril de petróleo, que sofre alterações a cada ameaça de guerra, crise internacional ou especulações de mercado.

O biocombustível, por ser uma fonte de energia renovável, favoreceria a agricultura familiar e, em última instância, evitaria o êxodo rural, porque através do

cultivo de oleaginosas, matérias-primas para a produção do biodiesel, seria possível gerar empregos diretos e indiretos no setor primário.

Entretanto, para que a inserção de biodiesel no mercado nacional se torne uma realidade é necessário transpor alguns obstáculos. Os motores de ciclo diesel só estão aptos a trabalhar, sem modificação, com misturas contendo até 20% de biodiesel (B20). Percentuais acima de 20% encontram entraves técnicos e requerem avaliações mais elaboradas quanto ao desempenho, ao consumo específico e às emissões do motor.

Portanto, se forem considerados os aspectos mencionados acima, um estudo do desempenho e das emissões de motores de ciclo diesel, submetidos a diversas solicitações de carga e operando com várias misturas de diesel e biodiesel, é justificável e necessário. Isto porque os resultados experimentais servirão de dados para consulta, tomada de decisão e para inspiração de propostas de otimização ou modificação do sistema de funcionamento dos motores.

## 1.6 OBJETIVO DO TRABALHO

A finalidade deste trabalho é analisar o desempenho e as emissões de motores estacionários do ciclo diesel abastecidos com óleo diesel, biodiesel de palma e percentuais de misturas entre o biodiesel palma e o diesel, levantar propriedades físico-químicas e comparar os resultados obtidos.

## 1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro apresentou uma introdução sobre o surgimento e a utilização do biocombustível no Brasil e no mundo. Além de mostrar definições relativas às fontes de energia de origem fóssil e de origem vegetal. Por fim uma exposição da motivação que originou o trabalho e os estudos registrados na literatura.

Os capítulos subseqüentes se destinam a apresentar a análise dos resultados dos quatro experimentos realizados.

No capítulo 2 são analisadas as emissões e o desempenho de um motor MWM D229/3 de 3 cilindros acoplado a um banco dinamométrico. O motor foi abastecido com óleo diesel comercial (B3), biodiesel de palma (B100-E) e mistura (B20-E). O teste foi executado com velocidade angular de 1200 e 1600 rpm e o motor submetido a cinco cargas diferentes, todas com valores percentuais tomados a partir da carga plena: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.

No capítulo 3 são analisadas as emissões e o desempenho de um motor AGRALE M95 monocilíndrico acoplado a um banco dinamométrico. O motor foi abastecido com óleo diesel comercial (B3), biodiesel de palma obtido por meio do processo de esterificação (B100-E) e misturas (B20-E) e (B50-E). O teste foi executado para cinco valores distintos de velocidade angular: 1500, 2000, 2500, 2600 rpm. Para cada uma delas, o motor foi submetido a cinco cargas diferentes, todas com valores percentuais tomados a partir da carga plena: 50%, 75% e 100%.

No capítulo 4 são comparadas as emissões e o desempenho de um motor AGRALE M95 monocilíndrico acoplado a um banco dinamométrico, abastecido com óleo diesel comercial (B3); biodiesel de palma obtido por meio do processo de esterificação (B100-E) e misturas (B20-E) e (B50-E); biodiesel de palma obtido através do processo de transesterificação (B100-T) e misturas (B20-T) e (B50-T). O teste foi executado para cinco valores distintos de velocidade angular: 1500, 2000, 2500, 2600 rpm. Para cada uma delas, o motor foi submetido a cinco cargas diferentes, todas com valores percentuais tomados a partir da carga plena: 50%, 75% e 100%.

No capítulo 5 são investigadas as emissões e o desempenho de um motor AGRALE M90 monocilíndrico acoplado a um banco gerador, abastecido com óleo diesel comercial (B4); biodiesel de palma obtido através do processo de esterificação (B100-E) e misturas (B10-E), (B20-E), (B30-E), (B40-E), (B50-E), (B60-E), (B70-E), (B80-E) e (B90-E). O teste foi executado com velocidade angular de 1800 rpm. Para cada uma delas, o motor foi submetido a três cargas diferentes.

As considerações finais e as propostas de trabalhos futuros são discutidas no capítulo 6. E, finalmente, no capítulo 7, é apresentada a bibliografia utilizada nesta dissertação.

## **2- ANALISÉ DE EMISSÕES E O DESEMPENHO DO MOTOR MWM D229/3**

Este capítulo apresenta os resultados relativos às emissões e ao desempenho do motor MWM D229/3 acoplado a um banco dinamométrico. Nos ensaios o motor foi mantido com velocidade angular de 1200 e 1600 rpm e submetido a cinco cargas diferentes, todas com valores percentuais tomados a partir da carga plena: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Foram utilizados três tipos de combustíveis: óleo diesel comercial (B3), biodiesel de palma (B100-E) e mistura (B20-E).

### **2.1. ÓLEO DIESEL COMERCIAL (B3)**

A Resolução NR 2 de 13 de março de 2008 do CNPE (Conselho Nacional de Política Energética) estabelece que, a partir 1 de julho de 2008, biodiesel deverá ser adicionado ao óleo diesel na proporção de 3%, em volume. O óleo diesel denominado neste trabalho de diesel comercial (B3) foi adquirido em posto de combustível na cidade do Rio de Janeiro em julho de 2008, deste modo contém 3% de biodiesel. A mistura B20 foi produzida considerando os 3% (em volume) de biodiesel existente no óleo diesel comercial (B3).

### **2.2 BIODIESEL DE PALMA ESTERIFICADO (B100-E)**

O biodiesel utilizado neste experimento foi adquirido da empresa Agropalma S/A. Proveniente da polpa do fruto da palma, o biocombustível foi produzido a partir do resíduo de destilação/desodorização do óleo de palma por meio do processo de esterificação. O palmdiesel, como foi batizado o biodiesel da Agropalma S/A, foi desenvolvido em parceria com a Escola de Química da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Patenteado pela UFRJ e com direito exclusivo de utilização da

Agropalma S/A, o processo de produção do palmdiesel não gera glicerina ou sabão. Isto ocorre porque ao invés de empregar KOH e NaOH para catalisar a reação, é utilizado catalisador heterogêneo. Além disso, o Palmdiesel apresenta maior índice de cetano, em comparação com todos os outros tipos de biodiesel derivados de óleos vegetais. Sua estabilidade oxidativa é quatro vezes maior do que o biodiesel de soja e também tem maior lubricidade que o diesel.

## 2.3 INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Nos testes realizados foram utilizados vários instrumentos de medida cuja descrição é apresentada a seguir.

A temperatura foi medida empregando o indicador digital da marca Alfa, com campo de medição de -50 a 1800 °C. Para medir o consumo de combustível foram utilizados uma bureta de vidro com calibração de 50, 100 e 300 cm<sup>3</sup> e um cronômetro com leitura digital da marca Orient. As condições atmosféricas foram medidas por meio de um termômetro de marca Hurger, com campo de medição de 0 a 55 °C e precisão de 1 °C; um manômetro da marca Hurger, com precisão de 1mm Hg e um psicômetro da marca Hurger, com precisão 1%.

As emissões foram medidas utilizando dois instrumentos distintos: um opacímetro e um analisador de gás modelo MODAL 2010-AO, ambos fabricados pela NAPRO Eletrônica Ltda. Industrial.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS

### 2.4.1 MOTOR E BOMBA INJETORA

As características técnicas do motor e da bomba injetora, utilizados nos testes de desempenho, estão dispostas nas tabelas 2.1 e 2.2, respectivamente.

TAB. 2.1 - Especificação do Motor

MOTOR	MWM
Modelo	D229/3 (Aplicação Industrial)
Série	0229.03.08183
Número de cilindros	3
Cilindrada	0,980 dm <sup>3</sup> /cil
Curso	120 mm
Taxa de compressão	16,6:1
Diâmetro do cilindro	102 to 102,022 mm
Válvulas por cilindro	2
Sistema de injeção	Injeção direta

TAB.2.2 - Especificação da Bomba Injetora

BOMBA INJETORA	BOSCH 908
Modelo	3464465
Nº de Série	PES3A80D320/3RS1261
APMS	23°
Bico injector	Bosch
Regulador de velocidade	Bosch(908) EP/RSV 350

#### 2.4.2 DINAMÔMETRO

Este equipamento tem a capacidade de medir a potência e o trabalho executado na unidade de tempo de um motor. Os dados técnicos do dinamômetro de indução utilizado nos testes estão especificados na TAB. 2.3.

TAB. 2.3 - Especificação do Dinamômetro

DINAMÔMETRO	HOFFMAN
Modelo	I2D
Capacidade	220 cv a 9500 rpm
Medição de Força	0 a 60 kgf
Velocidade Angular	0 a 10.000 rpm

#### 2.4.3 ANALISADOR DE GASES

O analisador de gases MODAL 2010-AO mede a concentração CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> em porcentagem volumétrica e a concentração de HC e NO<sub>x</sub> em partes por milhão (ppm). O equipamento utiliza o sistema infravermelho não dispersivo para determinar a concentração de CO, CO<sub>2</sub> e HC e, realiza a medição de O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> por meio de células eletro-químicas. Além disso, é capaz de medir a velocidade angular, a temperatura do óleo lubrificante do motor e controlar a operação do desumidificador. As características técnicas do analisador de gases MODAL 2010-AO estão na TAB. 2.4.

TAB 2.4 - Especificação do analisador de gases MODAL 2010-AO

Tipo	Resolução	Precisão	Escala
HC	1 ppm	12 ppm absoluto ou 5% da leitura <sub>(1)</sub>	0 - 2000 ppm
CO <sub>2</sub>	0,01%	0,06% CO absoluto ou 5% da leitura <sub>(1)</sub>	0 - 20 %
CO	0,1%	0,5% CO <sub>2</sub> absoluto ou 5% da leitura <sub>(1)</sub>	0 - 15 %
O <sub>2</sub>	0,01%	0,1% O <sub>2</sub> absoluto ou 5% da leitura <sub>(1)</sub>	0 - 25 %
		32 ppm NO <sub>x</sub> absoluto na faixa de 0 a 1000 ppm	
NO <sub>x</sub>	1 ppm	60 ppm NO <sub>x</sub> absoluto na faixa de 1001 a 2000 ppm 120 ppm NO <sub>x</sub> absoluto na faixa de 2001 a 5000 ppm	0 - 5000 ppm

(1) O maior valor



## 2. 5 METODOLOGIA APLICADA NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

### 2.5.1 LOCAL DE EXECUÇÃO DOS TESTES

A área de execução dos testes está dividida em três compartimentos: sala de controle, sala de equipamentos e sala de bombas.

Na sala de controle estão localizados o tanque de combustível, a bureta de medição, o sistema de ignição e de parada do motor, o manômetro do compressor de ar, além de três computadores conectados ao dinamômetro, ao analisador de gases e ao opacímetro, executando as seguintes funções:

- Computador 1: controla a aceleração, a velocidade angular e a carga imposta ao motor.
- Computador 2: recebe os dados transmitidos pelo opacímetro NA-9000, relativos a opacidade dos gases de escape.
- Computador 3: capturar os dados enviados pelo analisador de gases MODAL 2010-AO, concernentes às emissões geradas pelo motor.

Na sala de equipamentos estão situados o motor, o dinamômetro, o tanque de água, o compressor de ar, os instrumentos descritos na seção 2.3. O sistema de insuflamento de ar e exaustão de gases de escape, existente neste recinto, mantém as condições atmosféricas propícias para a realização dos testes.

Na sala de bombas, encontram-se o analisador de gases MODAL 2010-AO, o desumidificador, o filtro do analisador de gases e a bomba de sucção.

### 2.5.2 MEDIDAS PRELIMINARES

Para que houvesse regularidade nos resultados dos testes, alguns procedimentos foram padronizados. Os dados de cada conjunto de teste foram levantados depois da estabilização das curvas de emissões, de torque e de potência.

### 2.5.3 MEDIDAS PREVENTIVAS

Três procedimentos foram adotados para evitar desvios nos resultados causados por pane no equipamento ou falha humana.

- O consumo de combustível foi medido duas vezes em cada etapa e a aferição foi repetida nos casos em que a diferença de tempo entre as duas medidas for superior a um segundo.
- O ensaio foi interrompido, os dados descartados e o teste reiniciado nos casos de pane no grupo de equipamentos.

### 2.5.4 TESTE DE DESEMPENHO

As análises de desempenho do motor foram realizadas em banco dinamométrico, empregando os instrumentos de medida e equipamentos cujo acondicionamento está representado esquematicamente na FIG. 2.1.

Após terem sido executadas as medidas preliminares descritas na seção 2.5.2, os testes seguiram o seguinte roteiro:

- A carga e a velocidade angular a ser aplicada no motor foi estipulada no computador 1, por meio do programa Logs Din Mon. Esta ação deu origem a dados relativos ao torque e à potência que foram registrados no computador.
- As emissões de CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> geradas pelo funcionamento do motor foram captadas pelo analisador de gás modelo MODAL 2010-AO. Os dados relativos a cada uma delas foram enviados ao computador 3 que processou e registrou os dados.
- Simultaneamente foi avaliada a opacidade dos gases de escape pelo computador 2 .

O processo, descrito anteriormente, foi realizado com o motor funcionando a uma velocidade angular de 1200 e 1600 rpm e submetido a cinco cargas diferentes, todas com valores percentuais tomados a partir da carga plena: 20%, 40%, 60%,

80% e 100%. Os testes foram conduzidos com óleo diesel comercial (B3), e com a mistura (B20-E) de biodiesel de palma (B100-E) e óleo diesel comercial (B3).

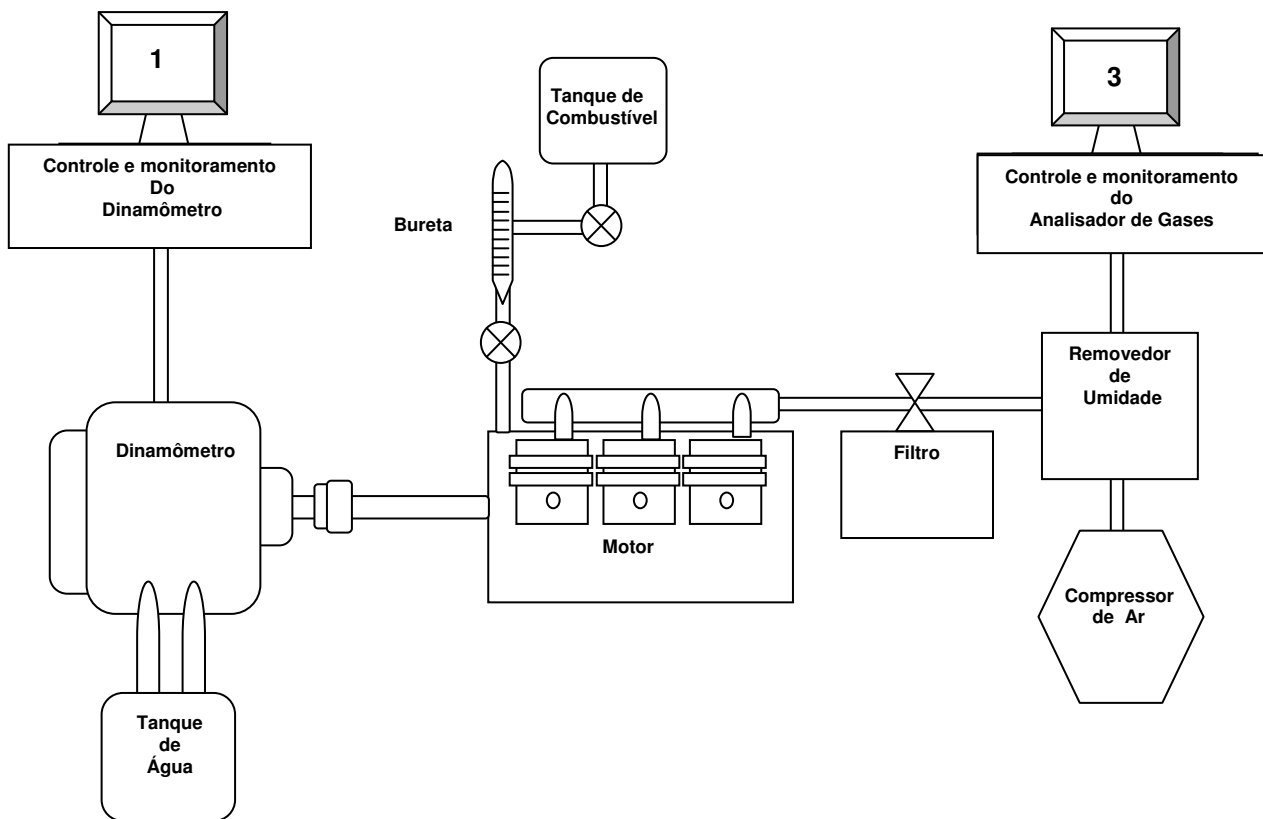


FIG. 2.1 - Esquema representativo do banco dinamométrico

## 2.6 RESULTADOS

Em um motor do ciclo diesel, os gases de exaustão resultantes da combustão ideal seriam compostos por nitrogênio ( $N_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e água ( $H_2O$ ).

Entretanto, isto apenas seria possível em condições de controle rígido dos agentes que influenciam a queima, como por exemplo: temperatura local e quantidade de cada substância presente na reação. Portanto, se não houver o controle anteriormente citado, outros componentes como hidrocarbonetos não queimados (HC), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio ( $NO_x$ ), óxido de enxofre ( $SO_x$ ) e particulados, estarão presentes nos gases de exaustão.

A maior parte dos gases provenientes da combustão em motores diesel não é prejudicial à saúde. Entretanto, alguns componentes, apesar de existirem em quantidade relativamente menor, são nocivos ao meio ambiente e podem causar graves doenças nos seres humanos. A FIG 2.2 mostra a composição média dos gases de exaustão provenientes de um motor diesel.

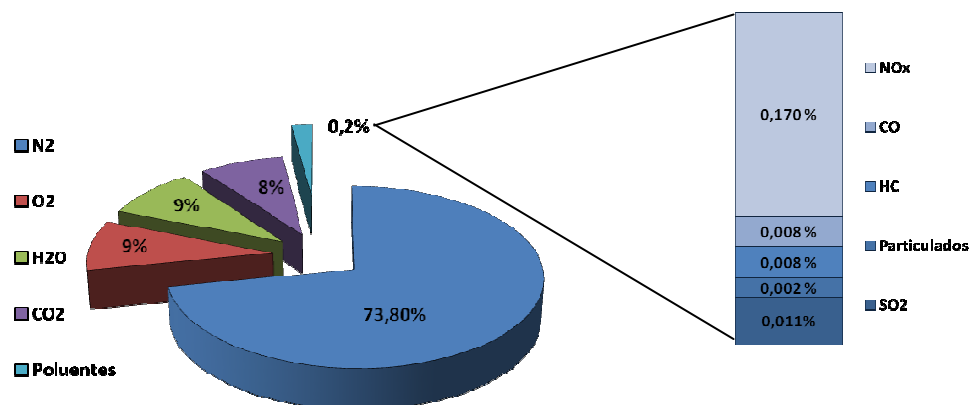


FIG 2.2- Composição média dos gases de exaustão do motor diesel sem catalisador (STIESCH, 2003).

### 2.6.1 EMISSÕES DE O<sub>2</sub> E CO<sub>2</sub>

As FIGS. 2.3 e 2.4 mostram que, independentemente da carga solicitada, as emissões de O<sub>2</sub>, provenientes da mistura (B20-E), são praticamente as mesmas do óleo diesel comercial.

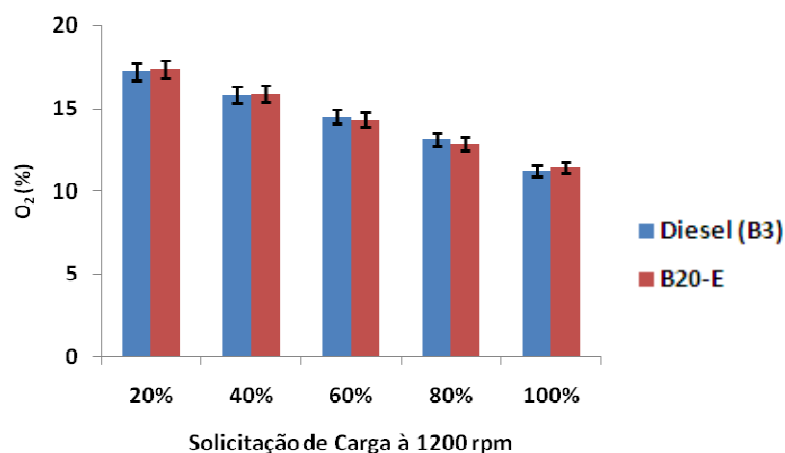


FIG. 2.3 - Emissão de O<sub>2</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1200 rpm

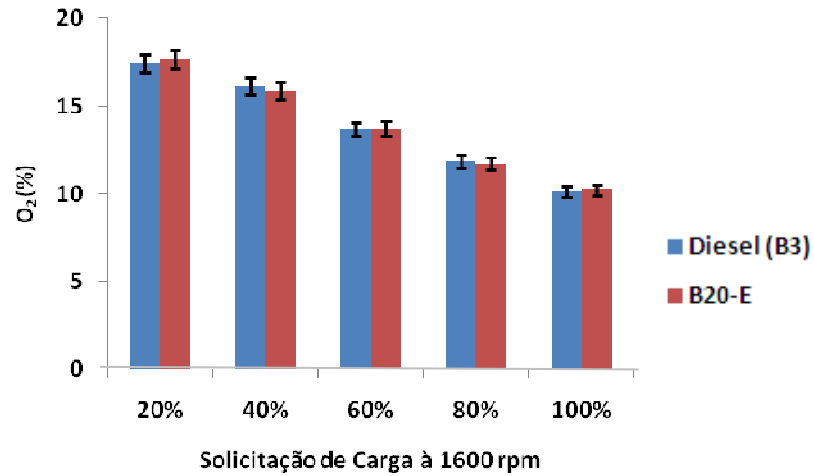


FIG. 2.4 - Emissão de O<sub>2</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1600 rpm

As FIGS. 2.5 e 2.6 mostram que as emissões de CO<sub>2</sub>, oriundas da combustível (B20-E) são praticamente as mesmas comparadas às emissões provenientes do óleo diesel comercial (B3).

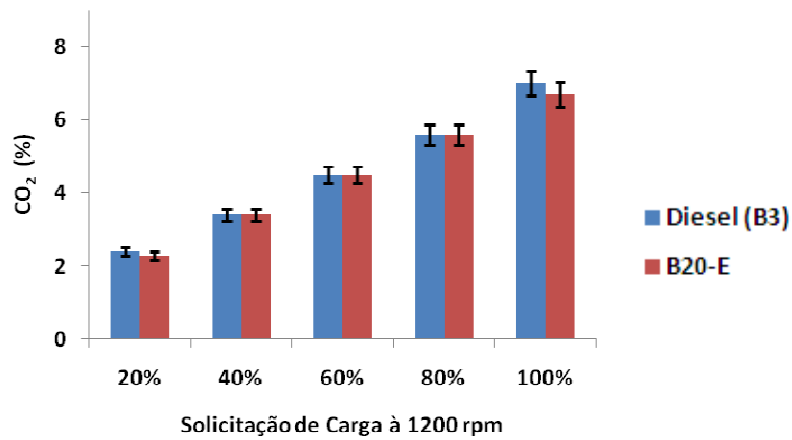


FIG. 2.5 - Emissão de CO<sub>2</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1200 rpm

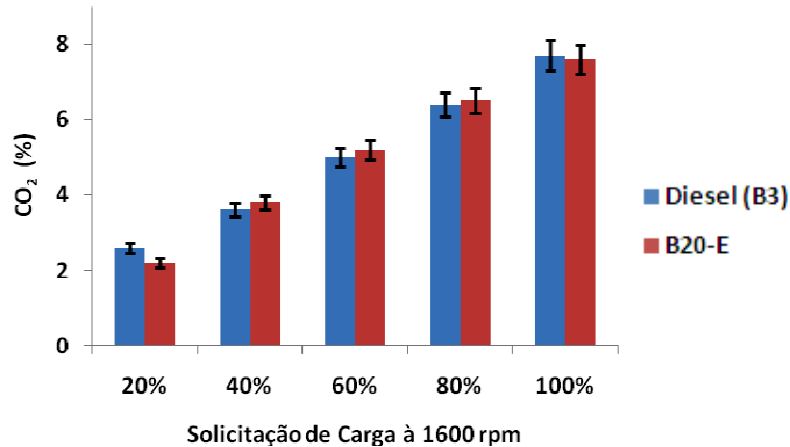


FIG. 2.6 - Emissão de CO<sub>2</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1600 rpm

### 2.6.2 EMISSÕES DE NO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub> é o termo genérico para um grupo de gases altamente reativos, os quais contêm nitrogênio e oxigênio em quantidades variadas, como por exemplo NO e NO<sub>2</sub> (HEYWOOD, 1998). Nas emissões de NO<sub>x</sub> (NO+NO<sub>2</sub>), originárias dos motores diesel, o gás mais predominante é o óxido nítrico.

A formação de NO<sub>x</sub> pode estar associada ao nitrogênio (N<sub>2</sub>) presente no ar da mistura ar-combustível no momento da combustão, ou ao nitrogênio presente na composição do próprio combustível, sendo que a maioria das emissões de NO<sub>x</sub> está associada ao primeiro caso.

A formação de NO<sub>x</sub> associada ao nitrogênio (N<sub>2</sub>) presente no ar da mistura ar-combustível, denominada de formação térmica de NO<sub>x</sub>, é diretamente proporcional a quatro fatores:

- Concentração de nitrogênio (N<sub>2</sub>);
- Tempo de exposição do combustível do pico de temperatura no interior do cilindro no momento da combustão;
- Concentração de oxigênio (O<sub>2</sub>);
- Temperatura no interior do cilindro no momento da combustão.

Estes fatores são relacionados da seguinte forma (IH-FEI, 2005):

$$[NO] \sim [N_2] \cdot t \cdot [O_2]^{\frac{1}{2}} \cdot \exp(-1/T) \quad (2.1)$$

A FIG. 2.7 mostra que, para as solicitações de carga de 20%, 40%, 60% e 80%, considerando as barras de erro, as emissões de NO<sub>x</sub> são equivalente em ambos os combustíveis. Entretanto, para as solicitações de carga de 100%, o combustível (B20-E) apresenta índice de NO<sub>x</sub> menor se comparado ao diesel comercial (B3).

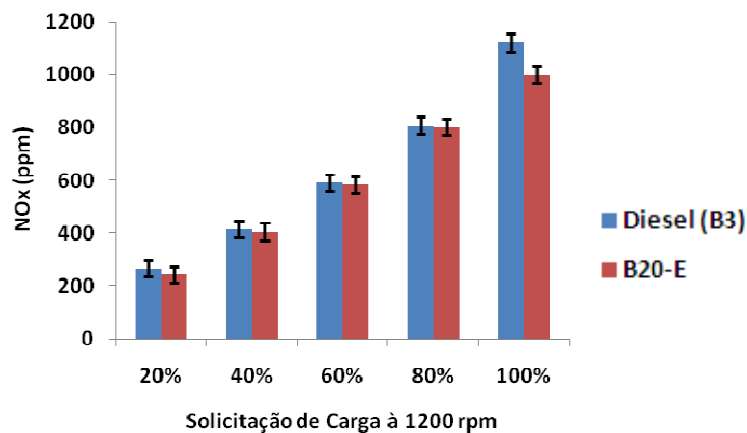


FIG 2.7 - Emissão de NO<sub>x</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1200 rpm

A FIG. 2.8 mostra que, para todas as solicitações de carga, considerando as barras de erro, as emissões de NO<sub>x</sub> são equivalente em ambos os combustíveis.

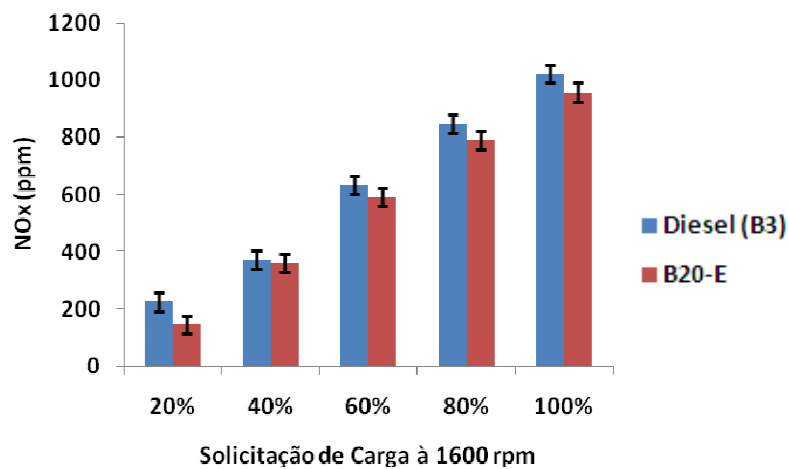


FIG 2.8 - Emissão de NO<sub>x</sub> do motor MWM 295 com velocidade angular de 1600 rpm

O menor índice de emissão de  $\text{NO}_x$  proveniente do (B20-E) comparado ao diesel comercial (B3), foi observado quando o motor estava operando com velocidade angular de 1200 rpm, solicitação de carga de 100% e abastecido com (B20-E). Este fato pode estar relacionado à temperatura no interior do cilindro no momento da combustão que é um fator que contribui para a formação do  $\text{NO}_x$ . Isto porque, neste caso específico, a temperatura dos gases de escape provenientes do (B20-E) registrada no teste foi menor do que a temperatura dos gases de escape provenientes do diesel comercial (B3).

### 2.6.3 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL

Consumo específico é definido como a taxa de fluxo de combustível, em massa, por unidade de energia produzida (JOHNSTON et al., 1992). Portanto, o consumo específico de combustível ( $CEC$ ) é calculado dividindo o fluxo de massa ( $\dot{m}$ ) pela potência ( $P$ ) produzida pelo motor (EHSANI, et al., 2009).

$$CEC = \frac{\dot{m}}{P} \quad (2.2)$$

O fluxo de massa do combustível ( $\dot{m}$ ) é obtido multiplicando a vazão volumétrica ( $\dot{V}$ ) de combustível pela massa específica ( $\rho$ ) deste.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (2.3)$$

Para calcular a vazão volumétrica do combustível foi utilizada uma bureta de 100 ml de volume ( $\Delta v$ ) e observado o tempo ( $t$ ) que o combustível contido neste recipiente levava para ser consumido.

$$\dot{V} = \frac{\Delta v}{t} \quad (2.4)$$



As FIGS 2.9 e 2.10 esboçam o comportamento do motor em relação ao consumo específico. Os testes apontam que o consumo específico de combustível é cerca de 4,1% maior quando o motor foi abastecido com a mistura (B20-E), submetido a carga de 100% e operando com velocidade angular de 1200 rpm se comparado ao diesel comercial (B3). Entretanto, quando o motor estava operando com velocidade angular de 1600 rpm e sendo submetido a uma carga de 100% o aumento do consumo específico de combustível relativo ao (B20-E) foi de 4,5%, comparado ao diesel comercial (B3).

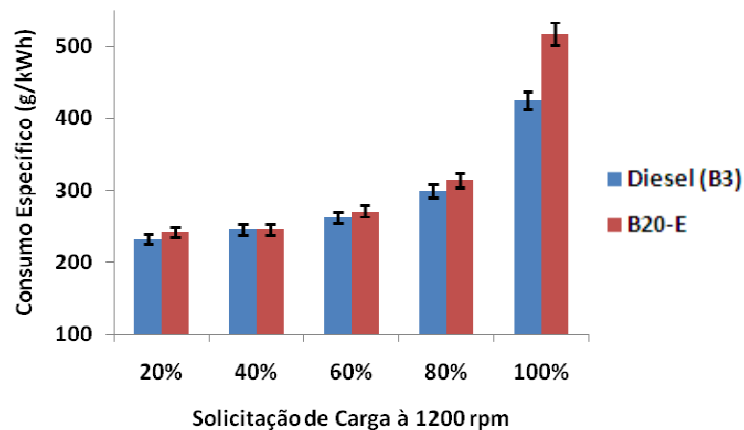


FIG 2.9 - Consumo específico do motor MWM 295 com velocidade angular de 1200 rpm

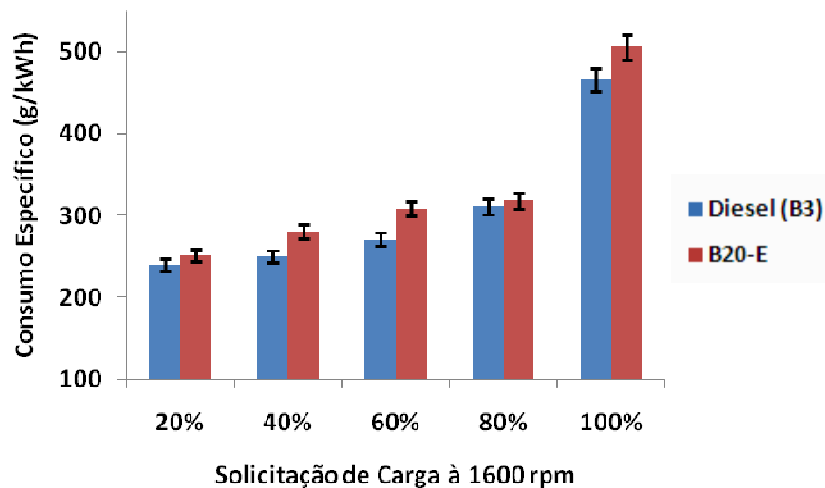


FIG 2.10 - Consumo específico do motor MWM 295 com velocidade angular de 1600 rpm

Os outros resultados obtidos demonstram que o consumo específico de combustível relativo aos dois tipos de combustível testados são praticamente os mesmos se for levada em consideração as barras de erro.

## 2.7 CONCLUSÃO

A literatura pesquisada aponta que, em cerca de 85% dos testes relacionado à emissões, o NO<sub>x</sub> aumenta quando se utiliza combustível de origem vegetal (LAPUERTA et al., 2008). Entretanto há estudos com biodiesel de palma que apontam uma diminuição nas emissões de NO<sub>x</sub> (MASJUKI e KALAM, 2002).

Comparando os dois combustíveis testados, os resultados apresentados neste capítulo mostram uma suave redução nas emissões de NO<sub>x</sub> com o motor operando com velocidade angular de 1200 rpm, solicitação de carga de 100% e abastecido com (B20-E). Já para os demais casos as emissões podem ser consideradas equivalentes.

Este fato pode estar relacionado à temperatura no interior do cilindro no momento da combustão. Isto porque, neste caso específico, a temperatura dos gases de escape proveniente do (B20-E)  $T_{(B20-E)}=346$  °C é menor do que a temperatura dos gases de escape provenientes do diesel comercial (B3)  $T_{(B3)}=352$  °C. Estas temperaturas foram medidas por meio de um termômetro fixado no cano de descarga do motor MWM D229/3.

O consumo específico de combustível é maior se o motor for abastecido com a mistura (B20-E). Isto ocorre porque o consumo específico de combustível está diretamente relacionado ao poder calorífico do combustível. Como pode ser observado na TAB. 3.1, o poder calorífico do biodiesel de palma é menor que o do óleo diesel comercial, a mistura (B20-E) também tem menor poder calorífico do que o óleo diesel comercial (B3). Portanto, para que o motor funcione nas mesmas condições exigidas a mistura (B20-E) necessita de maior quantidade de massa de combustível do que o óleo diesel comercial (B3) e conseqüentemente, a mistura (B20-E) apresenta consumo específico de combustível maior.

### 3- PRIMEIRA ANÁLISE DE EMISSÕES E O DESEMPENHO DO MOTOR AGRALE M95

Este capítulo apresenta o estudo do impacto ambiental do motor diesel AGRALE M95 a partir da medição da concentração de NO<sub>x</sub>, de CO e de CO<sub>2</sub> nos gases de escape. As análises das emissões e do desempenho do motor foram realizadas em banco dinamométrico, empregando quatro tipos de combustíveis: óleo diesel comercial (B3), biodiesel de palma (B100-E), especificados nas seções 2.3 e 2.4, e misturas (B20-E) e (B50-E) de óleo diesel comercial com biodiesel de palma (B100-E). As propriedades físico-químicas destes combustíveis foram medidas no Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e estão apresentadas na TAB 3.1.

Os testes foram realizados no Laboratório de Máquinas Térmicas/COPPE/UFRJ utilizando os instrumentos de medida e os equipamentos que estão caracterizados na seção 3.1 e cujo acondicionamento está representado esquematicamente na FIG. 3.1.

TAB. 3.1 - Especificação dos Combustíveis

CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS				MÉTODO
	B3*	B20-E	B50-E	B100-E	
Massa Específica a 20 °C (kg/m <sup>3</sup> )	842.7	847.8	856.3	871.9	ASTM D 4052
Viscosidade Cinemática 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	3.294	3.644	3.830	4.381	ASTM D 445
Enxofre (mg/Kg)	412.23	340.63	226.24	6.48	ASTM D 5453
Carbono (% m/m)	85.84 ± 0.13	83.80 ± 0.20	81.45 ± 0.30	76.98 ± 0.31	ASTM D 5291
Hidrogênio (% m/m)	13.54 ± 0.11	13.80 ± 0.01	13.52 ± 0.06	13.13 ± 0.18	ASTM D 5291
Nitrogênio (% m/m)	0.09	0.04	0.07	0.07	ASTM D 5291
Poder Calorífico Superior (Kcal/kg)	10765 ± 23	10536 ± 1	10144.5 ± 18.5	9460.2 ± 5.0	ASTM D 4809
Poder Calorífico Inferior (Kcal/kg)	10068 ± 23	9819,6 ± 0.7	9448.5 ± 18.7	8784.0 ± 5.0	ASTM D 4809
Número de Cetano (NC)	48.8	49.7	56.1	59.3	ASTM D 613-01
Acidez	-	-	-	1.5	-

B3\* Óleo diesel comercial

Os resultados obtidos nos ensaios seguiram os procedimentos destacados na seção 3.3.2, sendo que para cada tipo de combustível o motor foi submetido a três velocidades angulares diferentes: 1500, 2000 e 2500 rpm. E, para cada velocidade

angular foram empregadas cargas parciais de 50 e 75%. Além disso, o motor foi testado com carga máxima a uma velocidade angular de 2600 rpm.

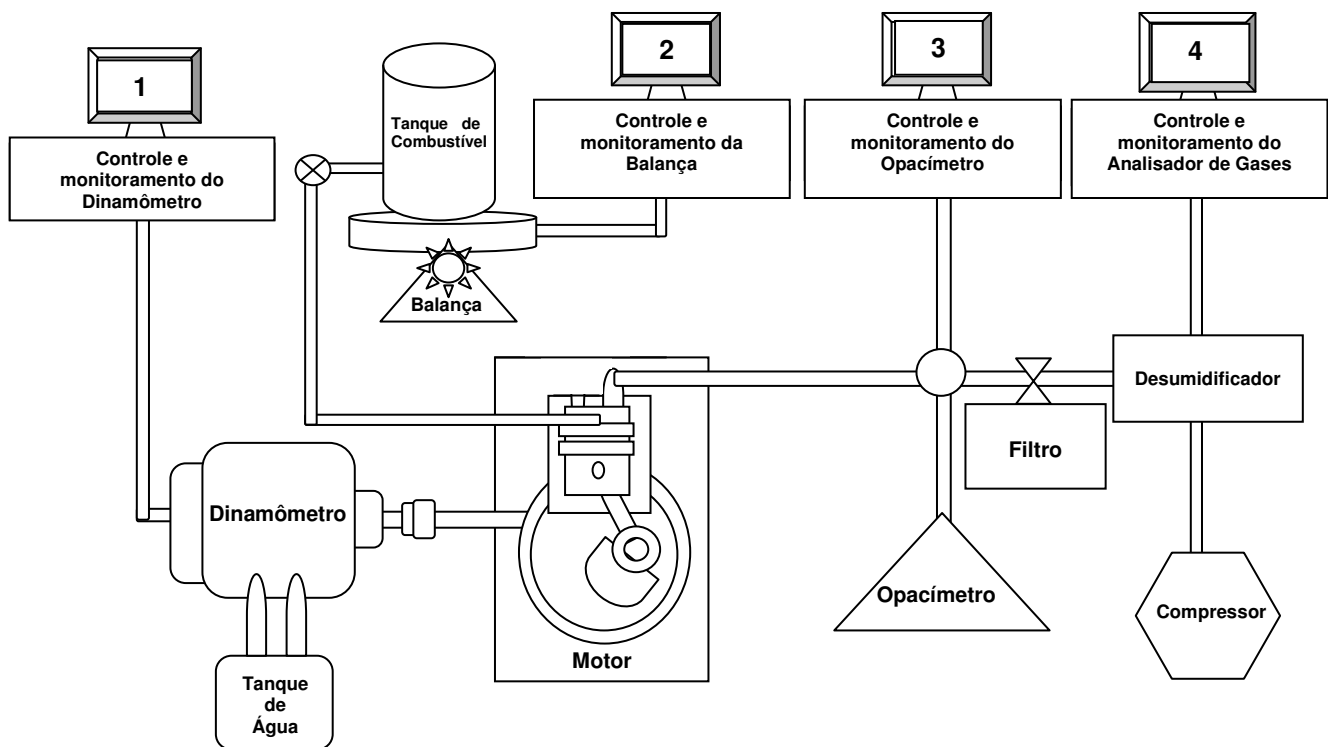


FIG 3.1 - Esquema representativo do banco dinamométrico

### 3.1 INSTRUMENTOS DE MEDIDA E EQUIPAMENTOS

Nos testes realizados foram utilizados instrumentos de medida apresentados nos itens 2.3.3 e 2.3.4 e outros equipamentos cuja descrição é apresentada a seguir.

#### 3.1.1 BALANÇA DE PRECISÃO

O consumo de combustível foi monitorado durante os testes através de um computador acoplado a uma balança de precisão cujas especificações técnicas são apresentadas na TAB. 3.2.

TAB. 3.2 - Especificação da Balança OHAUS

<b>BALANÇA</b>	<b>OHAUS</b>
Modelo	ARD110
Capacidade (Kg) :	4.1 kg
Precisão (mg)	100 mg
Diâmetro da bandeja (mm)	180 mm
Tempo de estabilização (s)	3 s
Dimensão (LxAxP) (mm)	110x217x343 mm

### 3.1.2 DINAMÔMETRO E MOTOR

Os dados técnicos do dinamômetro de indução e do motor utilizados nos testes deste capítulo estão especificados nas TAB. 3.3 e 3.4, respectivamente.

TAB. 3.3 - Especificação do Dinamômetro DYNAM

<b>DINAMÔMETRO</b>	<b>DYNAM</b>
Modelo	66 DG
Número de série	00279-1
Capacidade	30 HP at 2700 rpm to 8000 rpm 3 GPM
Refrigeração a água	35 Psi (min) 100 Psi (max) 45.0 V
Dados elétricos	2.0 A 17 $\Omega$ at 20 °C

TAB. 3.4 - Especificação do motor diesel AGRALE M95

<b>MOTOR</b>	<b>AGRALE</b>
Modelo	M95
Tipo	4 tempos
Dimensão (L x A x P)	683 x 575 x 702 (mm)
Número de cilindros	1
Volume do cilindro	0.744 dm <sup>3</sup>
Razão de compressão	21:1
Válvulas por cilindro	2
Torque máximo (NBR ISO 1585)	4.2 mdaN at 2500 rpm
Bateria	12 V / 45 Ah
Sistema de injeção	Injeção direta
Potência (NBR ISO 1585)	12.9 kW at 3000 rpm 11.4 kW at 2600 rpm

### 3.1.3 OPACÍMETRO

Segunda a norma NR NIE-DIMEL-080, aprovada em abril/08, opacímetro de fluxo parcial é o instrumento utilizado para determinar a opacidade da fumaça gerada por um motor de ignição por compressão, captando parte da fumaça expelida através do cano de descarga.

O opacímetro NA-9000 é o equipamento utilizado nos testes de avaliação do motor. Além de medir a opacidade, também controla o processo de medição e executa diagnósticos do próprio sistema de calibração automática. Os dados técnicos do opacímetro utilizado nos testes estão especificados na TAB. 3.5.

TAB. 3.5 - Especificação do Opacímetro

OPACÍMETRO	NAPRO
Modelo	NA-9000
Opacidade	0 - 100%
Coefficiente de Absorção (K)	0 - 9,99 m (-1)
Precisão	+/- 2 % relativo
Resolução	0,1 %
Temperatura ambiente de funcionamento	5 - 40 °C
Umidade ambiente de funcionamento	0 - 95%

### 3.2 METODOLOGIA APLICADA NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Os procedimentos para realização dos testes no motor, relativos às medidas preliminares e preventivas seguiram as mesmas padronizações especificadas na seção 2.5.

#### 3.2.1 LOCAL DE EXECUÇÃO DOS TESTES

A área de execução dos testes está dividida em dois compartimentos: sala de controle e sala de equipamentos.

Na sala de controle está localizado o sistema de ignição e de parada do motor além de quatro computadores, cada um deles ligado a um dispositivo diferente: dinamômetro, analisador de gases, opacímetro e balança de precisão.

- Computador 1: controla a aceleração, a velocidade angular e a carga imposta ao motor.
- Computador 2: capturar os dados enviados pela balança de precisão OHAUS.

- Computador 3: recebe os dados transmitidos pelo opacímetro NA-9000, relativos a opacidade dos gases de escape.
- Computador 4: capturar os dados enviados pelo analisador de gases MODAL 2010-AO, concernentes às emissões geradas pelo motor.

Na sala de equipamentos estão situados o motor, o dinamômetro, o tanque de combustível e a balança de precisão.

### 3.2.3 TESTE DE DESEMPENHO

As análises das emissões e do desempenho do motor foram realizadas em banco dinamométrico, empregando quatro tipos de combustíveis: óleo diesel comercial (B3), biodiesel de palma (B100-E) e misturas (B20-E) e (B50-E). Para realizar os testes foram utilizados os instrumentos de medida e equipamentos caracterizados na seção 3.2, cujo acondicionamento está representado esquematicamente na figura 3.1.

Os resultados obtidos nos ensaios seguiram os procedimentos destacados na seção 3.3, sendo que para cada tipo de combustível o motor foi submetido a três velocidades angulares diferentes: 1500, 2000 e 2500 rpm. E, para cada velocidade angular foram empregadas cargas parciais de 50 e 75%. Além disso, o motor foi testado com carga máxima a uma velocidade angular de 2600 rpm.

## 3.3 RESULTADOS

### 3.3.1 EMISSÕES DE O<sub>2</sub> E DE CO<sub>2</sub>

As FIGS. 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 mostram a percentagem de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> emitida nos gases de exaustão do motor AGRALE M95, operando com 4 tipos de



combustível: óleo diesel comercial (B3), biodiesel de palma (B100-E) e misturas (B20-E) e (B50-E).

Nas FIGS. 3.2, 3.3 e 3.4 pode ser observado que as emissões de  $O_2$  proveniente do biodiesel e suas misturas são praticamente iguais. Entretanto, se comparadas ao óleo diesel comercial (B3), essas emissões são cerca de 12 % menores.

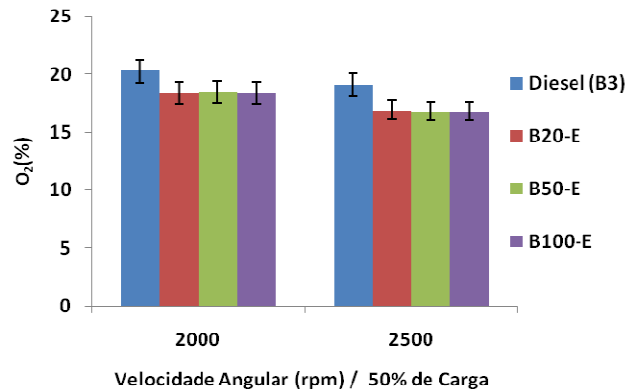


FIG 3.2 - Emissão de  $O_2$  do motor AGRALE M95 com 50 % de carga

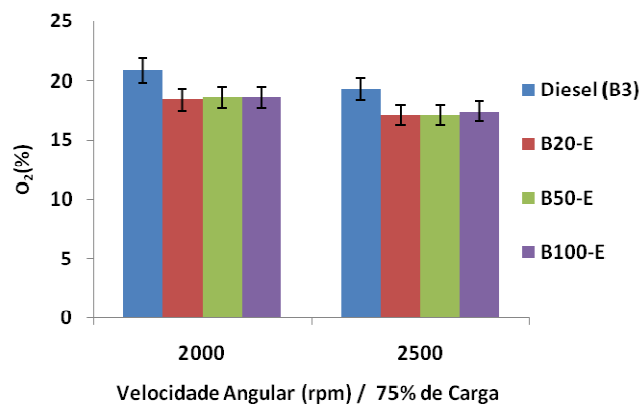


FIG 3.3 - Emissão de  $O_2$  do motor AGRALE M95 com 75 % de carga

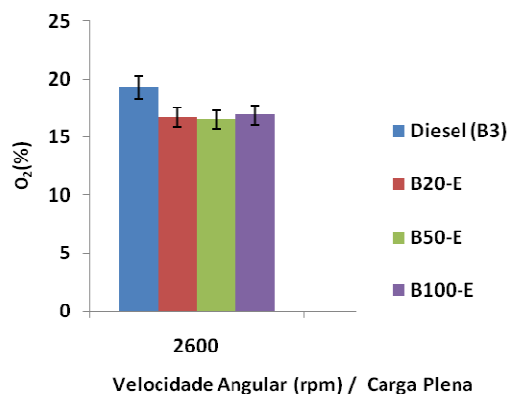


FIG 3.4 - Emissão de  $O_2$  do motor AGRALE M95 com carga plena

Apesar da literatura disponível (TICKELL at al., 2000; TICKELL at al., 2006; FEIGON, 2003) indicar que combustível de origem vegetal emite menos CO<sub>2</sub> se comparado ao combustível de origem mineral, os testes mostram resultados diferentes. As FIGS. 3.5, 3.6 e 3.7 indicam que as emissões de CO<sub>2</sub> são maiores quando o motor opera com biodiesel de palma (B100-E) e suas misturas (B20-E) e (B50-E).

O biodiesel tem oxigênio em sua molécula, deste modo, necessita de uma quantidade menor de oxigênio durante combustão do que o combustível de origem fóssil. Portanto, comparado ao diesel, é esperado que as emissões de oxigênio provenientes do biodiesel sejam maiores e que as emissões de CO<sub>2</sub> sejam menores. No caso específico deste teste, provavelmente, a queima do biodiesel de palma (B100-E) e suas misturas (B20-E) e (B50-E) não esteja ocorrendo de forma devida. Este fato é evidenciado pelas menores emissões de oxigênio provenientes destes combustíveis.

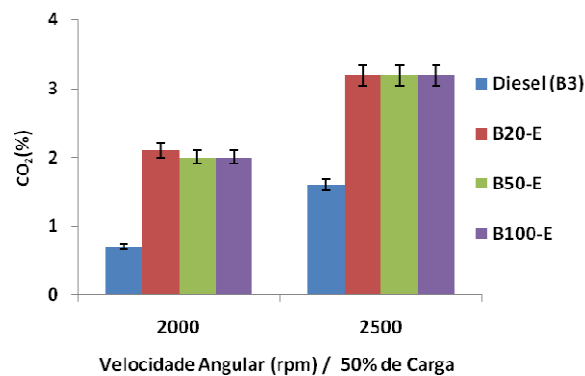


FIG 3.5 - Emissão de CO<sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 50 % de carga

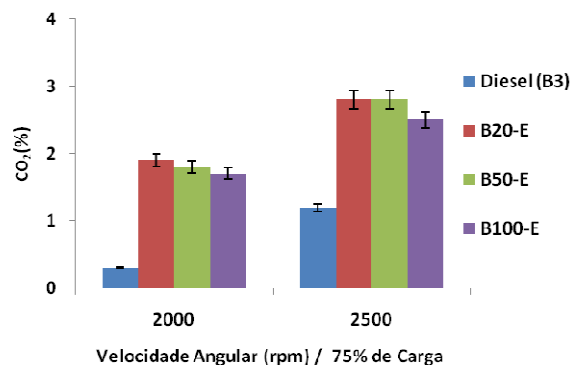


FIG 3.6 - Emissão de CO<sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 75 % de carga

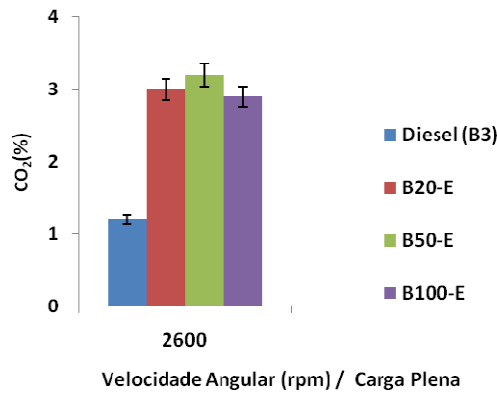


FIG 3.7 - Emissão de CO<sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com carga plena

### 3.3.2 EMISSÃO DE NO<sub>x</sub>

Emissões de NO<sub>x</sub> são geradas quando o nitrogênio é queimado. Como o ar é composto por 78% de nitrogênio, qualquer motor irá produzir algum nível de NO<sub>x</sub>, independentemente do combustível que utiliza.

Além das emissões de NO<sub>x</sub> formadas no início do processo de combustão, existe outro fator que contribui para a formação do NO<sub>x</sub>: a concentração de nitrogênio presente no combustível. (GRUDEN e BERG, 2003; SENGUPTA, 1989; TICKELL et al., 2000).

As FIGS 3.8, 3.9 e 3.10 mostram que as emissões de NO<sub>x</sub> provenientes de biodiesel de palma (B100-E) e suas misturas (B20-E) e (B50-E) são maiores comparadas às emissões oriundas do óleo diesel comercial (B3). Além disso, verifica-se que os níveis de NO<sub>x</sub> diminuem à medida que a carga a que o motor é submetido aumenta.

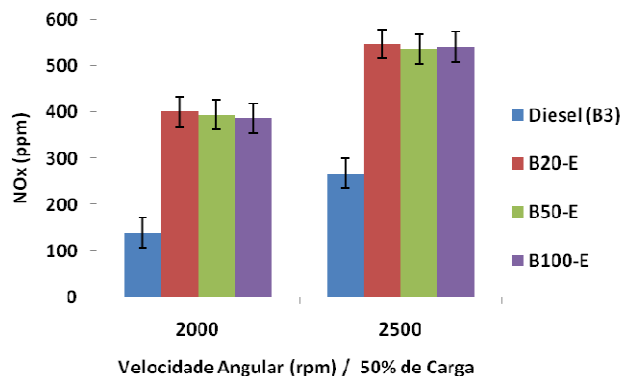


FIG 3.8 - Emissão de NO<sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com 50 % de carga

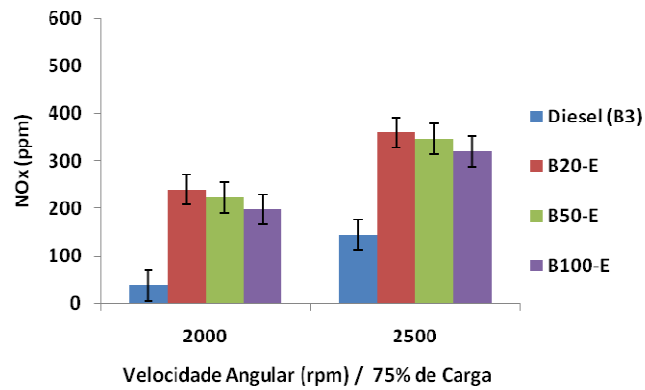


FIG 3.9 - Emissão de NOx do motor AGRALE M95 com 75 % de carga

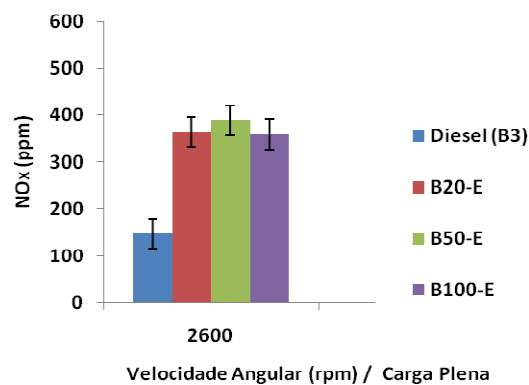


FIG 3.10 - Emissão de NOx do motor AGRALE M95 com carga plena

O aumento nas emissões de NOx proveniente do biodiesel de palma (B100-E) e de suas misturas (B20-E) e (B50-E) em relação ao diesel comercial (B3) pode estar relacionado com o número de cetano maior dos combustíveis de origem vegetal. Isto porque um número de cetano maior acarreta em um atraso da ignição menor. O fato do combustível entrar em ignição em um tempo menor o expõem a picos de temperatura mais elevados por mais tempo. Como a maioria do NOx se forma nesta fase, um maior tempo de exposição à altas temperatura acaba produzindo maior quantidade de NOx.

### 3.3.3 OPACIDADE

Opacidade é a quantidade de fuligem presente nos gases de escape. É calculado a partir da redução da transmissão da luz através desses gases (KEMP, 2006). Assim, pode-se considerar que opacidade é o percentual de luz bloqueada pela quantidade de fumaça existente nos gases de exaustão (ONURSAL e GAUTAM, 1997). As FIGS 3.11, 3.12 e 3.13 mostram que a opacidade aumenta à medida que a carga a que o motor é submetido aumenta. Além disso, é possível observar que a opacidade proveniente de biodiesel de palma (B100-E) e suas misturas (B20-E) e (B50-E) são menores se comparada à opacidade oriunda do óleo diesel comercial (B3).

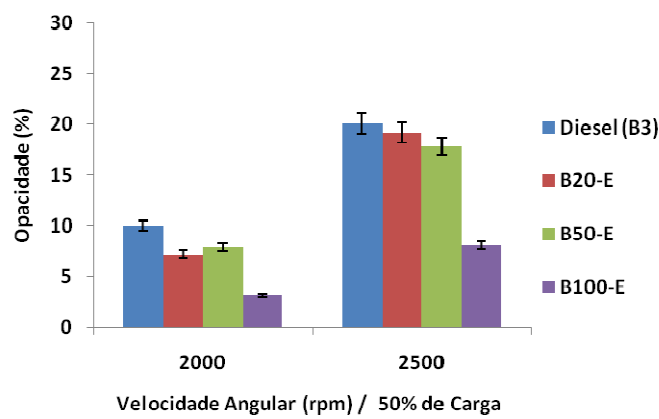


FIG 3.11 - Opacidade do motor AGRALE M95 com 50 % de carga

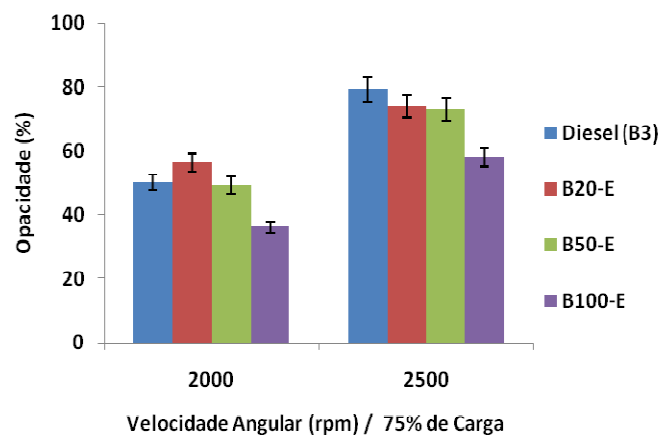


FIG 3.12 - Opacidade do motor AGRALE M95 com 75 % de carga

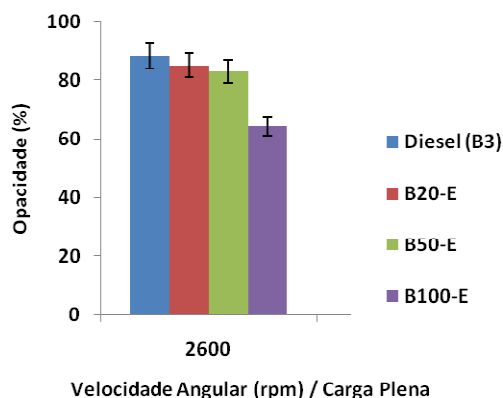


FIG 3.13 - Opacidade do motor AGRALE M95 com carga plena

Os menores índices de opacidade encontrados nos gases de escape provenientes do (B20-E), (B50-E) e (B100-E) se deve ao fato destes combustíveis apresentarem maior concentração de oxigênio em sua estrutura, se comparado ao diesel comercial (B3), favorecendo o processo de oxidação da fuligem e, conseqüentemente, produzindo menor opacidade.

### 3.3.4 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL

As FIGS 3.10, 3.11 e 3.12 mostram que operando com 50% da carga total, o consumo específico de combustível do motor, abastecido com biodiesel de palma (B100-E) e suas misturas, aumenta cerca de 4% em relação ao óleo diesel comercial (B3). Este valor aumenta para 7% quando o motor funciona submetido a 75% da carga total. Quando o motor é submetido à plena carga, o consumo específico do motor abastecido com biodiesel de palma (B100-E) e suas misturas aumenta cerca de 20% em relação ao óleo diesel comercial (B3).

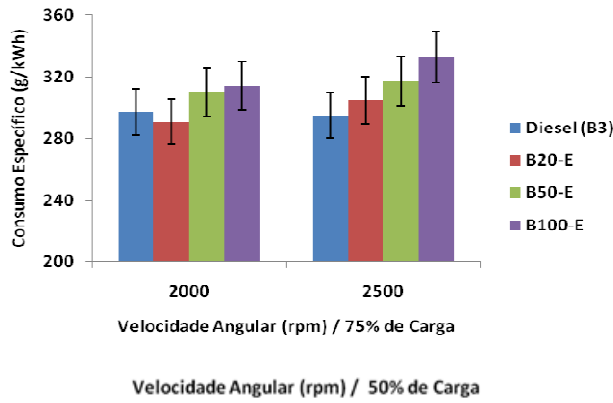


FIG 3.14 - Consumo específico do motor AGRALE M95 com 50 % de carga

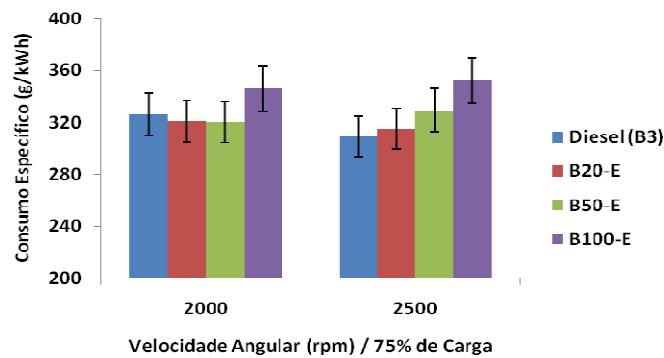


FIG 3.15 - Consumo específico do motor AGRALE M95 com 75 % de carga

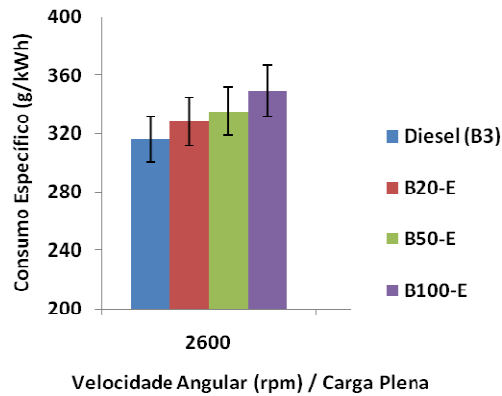


FIG 3.16 - Consumo específico do motor AGRALE M95 com carga plena

O óleo diesel comercial (B3) apresenta o menor consumo específico porque este combustível tem maior poder calorífico se comparado aos demais combustíveis testados. Portanto, como possui maior quantidade de energia por massa de

combustível, o óleo diesel comercial (B3) necessita de uma quantidade menor de combustível.

### 3.4 CONCLUSÃO

Os resultados relativos à velocidade angular de 1500 rpm foram desconsiderados porque o motor apresentou instabilidade nesta rotação.

Os testes indicam que o óleo diesel comercial (B3) apresenta o menor consumo específico de combustível, seguido de misturas (B20-E), (B50-E) e, finalmente, do biodiesel de palma (B100-E). Assim, o aumento do percentual de biodiesel de palma (B100-E) na mistura com o óleo diesel comercial (B3) provoca um aumento do consumo específico. Isso ocorre porque o biodiesel de palma (B100-E) tem poder calorífico inferior ao do óleo diesel comercial (B3). Portanto, para compensar a menor quantidade de energia por massa de combustível, o biodiesel de palma (B100-E) e suas misturas necessitam de uma quantidade maior de combustível para evitar perda de potência no motor.

O aumento nas emissões de NOx proveniente do biodiesel de palma (B100-E) e de suas misturas (B20-E) e (B50-E) pode estar relacionado com o número de cetano maior desses combustíveis. Quanto maior o número de cetano menor o atraso da ignição, o que expõem a mistura ar-combustível a picos de temperatura mais elevados por mais tempo. Como a maioria do NOx se forma nesta fase, um maior tempo de exposição à altas temperatura acaba produzindo maior quantidade de NOx.

Em relação à opacidade, estudos mostram que a opacidade originária dos combustíveis de origem vegetal é geralmente mais baixa em relação óleo diesel. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a opacidade diminui à medida que a quantidade de biodiesel de palma (B100-E) na mistura aumenta. Isto se deve ao fato do combustível de origem vegetal apresentar maior concentração de oxigênio, favorecendo o processo de oxidação da fuligem e, conseqüentemente menor opacidade.



#### **4- SEGUNDA ANÁLISE DE EMISSÕES E O DESEMPENHO DO MOTOR AGRALE M95**

Este capítulo apresenta a análise do desempenho do motor AGRALE M 95; o estudo das emissões dos gases de escape por meio da medição da concentração de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>; e a influência do número de cetano no atraso da ignição. Neste trabalho foram utilizados 7 tipos de combustível que estão caracterizados na TAB. 4.1, a qual apresenta: massa específica, viscosidade cinemática, o poder calorífico, o número de cetano e porcentagens de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. Os métodos utilizados para caracterizar as propriedades dos combustíveis na TAB 4.1 foram os mesmos utilizados na TAB 3.1.

- Óleo diesel comercial (B3);
- Biodiesel de palma obtido através do processo de esterificação (B100-E);
- Mistura do biodiesel de palma obtido através do processo de esterificação com óleo diesel comercial (B3), denominada de (B20-E);
- Mistura do biodiesel de palma obtido através do processo de esterificação com óleo diesel comercial (B3), denominada de (B50-E);
- Biodiesel de palma obtido através do processo de transesterificação (B100-T);
- Mistura do biodiesel de palma obtido através do processo de transesterificação com óleo diesel comercial (B3), denominada de (B20-T);
- Mistura do biodiesel de palma obtido através do processo de transesterificação com óleo diesel comercial (B3), denominada de (B50-T).

A metodologia aplicada na execução dos testes, o local, as medidas preliminares e preventivas apresentadas neste capítulo são as mesmas que foram utilizadas no capítulo 2 e 3 e que estão descritas na seção 2.4.

TAB. 4.1 - Especificação dos Combustíveis

CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS				MÉTODO
	B3*	B20-T	B50-T	B100-T	
Massa Específica a 20 °C (kg/m <sup>3</sup> )	842,7	842,8	857,0	872,1	ASTM D 4052
Viscosidade Cinemática 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	3,294	3,583	3,982	4,727	ASTM D 445
Enxofre (mg/Kg)	412,23	443	243	3,13	ASTM D 5453
Carbono (% m/m)	85.84 ± 0.13	85,73±0,24	80,48±0,42	75,47±0,09	ASTM D 5291
Hidrogênio (% m/m)	13.54 ± 0.11	13,81±0,02	13,18±0,11	12,69±0,0	ASTM D 5291
Nitrogênio (% m/m)	0,09	0,10	0,09	0,07	ASTM D 5291
Poder Calorífico Inferior (Kcal/kg)	10068 ± 23	10.125±2	9.405±19	8.802±1	ASTM D 4809
Número de Cetano (NC)	48,8	52,1	54,4	60,3	ASTM D 613-01
Acidez	-	-	-	0,5	

B3\* Óleo diesel comercial

#### 4.1 INSTRUMENTOS DE MEDIDA E EQUIPAMENTOS

Para realizar os testes foram utilizados os equipamentos caracterizados na seção 3.2, cujo acondicionamento está representado esquematicamente na figura 4.1. O módulo AVL INDICOM para medir pressão instantânea no interior do cilindro.

#### 4.2 TESTE DE DESEMPENHO

As análises das emissões e do desempenho do motor Agrale M95 foram realizadas em banco dinamométrico, empregando diversos tipos de combustível, especificados na seção 4.1.

Os ensaios seguiram os seguintes procedimentos:

- Cada tipo de combustível o motor foi submetido a três velocidades angulares diferentes: 1500, 2000 e 2500 rpm.
- Para cada velocidade angular o motor foi submetido a cargas parciais de 50 e 75%.
- Além disso, o motor foi testado com carga máxima a uma velocidade angular de 2600 rpm.

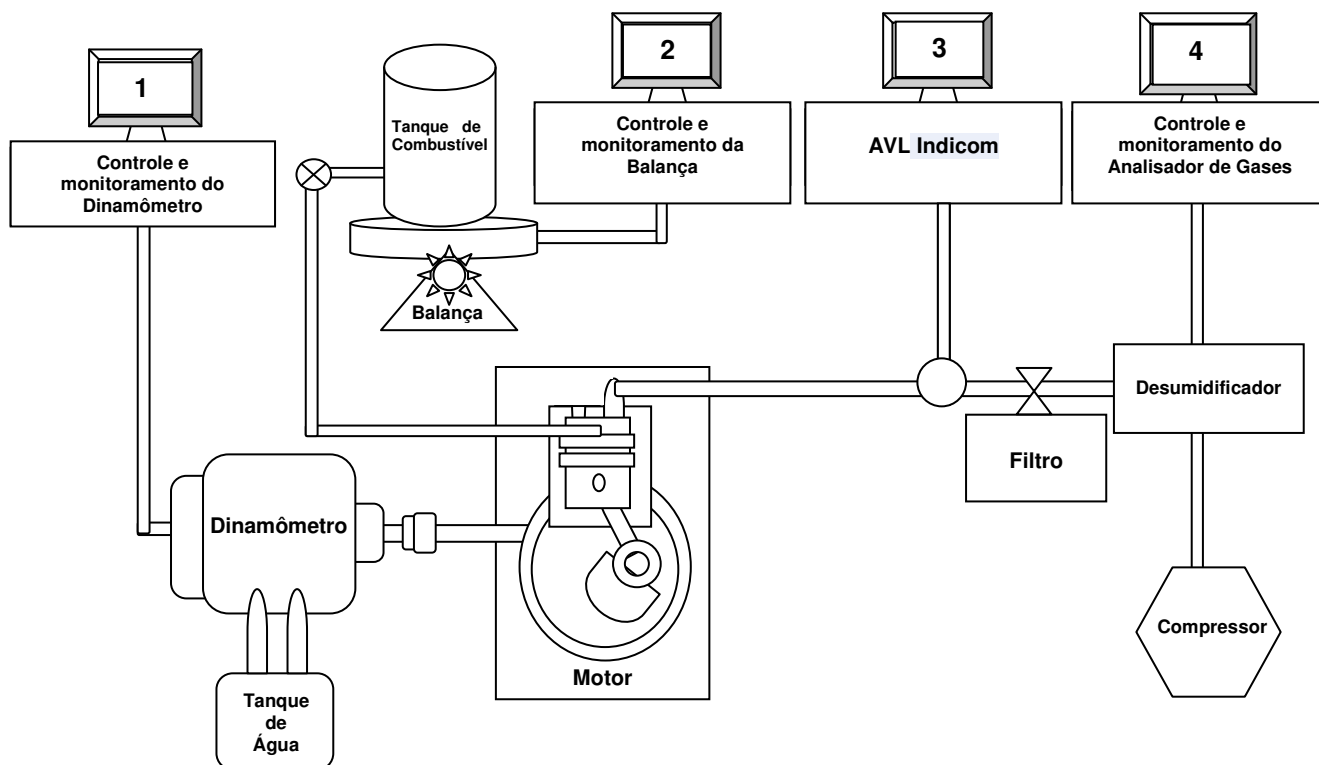


FIG 4.1 - Esquema representativo do banco dinamométrico

## 4.3 RESULTADOS

### 4.3.1 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

As FIGS 4.2 e 4.3 mostram o comportamento do motor AGRALE M95 relativo às emissões de CO<sub>2</sub>. Verifica-se que o óleo diesel comercial (B3) emite, em média, 8% a mais de CO<sub>2</sub> se comparado aos demais combustíveis testados. Além disso, pode ser observado que as emissões de CO<sub>2</sub> aumentam de acordo com a carga a que o motor é submetido. Outro fato verificado é que, em média, o biodiesel de palma (B100-E), e suas misturas emitem menor quantidade de CO<sub>2</sub> se comparado ao biodiesel de palma (B100-T) e as misturas deste com o óleo diesel comercial.

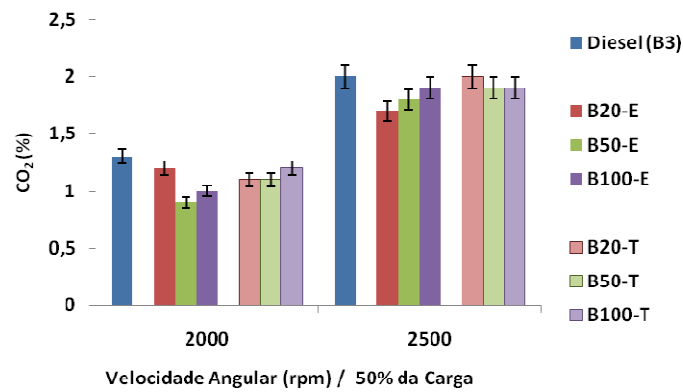


FIG 4.2 - Emissão de CO<sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 50 % de carga

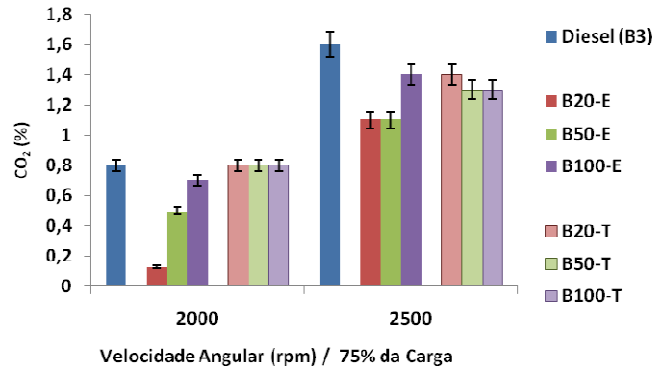


FIG 4.3 - Emissão de CO<sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com 75 % de carga

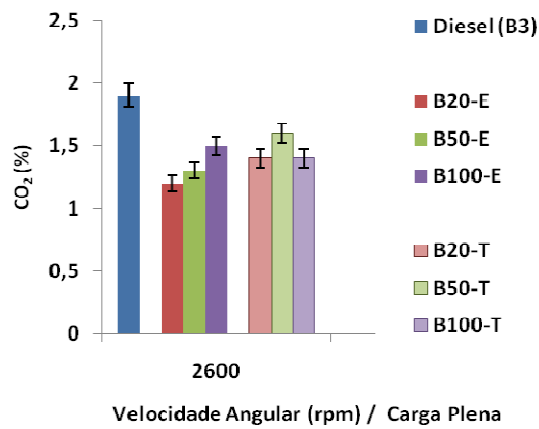


FIG 4.4 - Emissão de CO<sub>2</sub> do motor AGRALE M95 com carga plena

### 4.3.2 EMISSÃO DE NO<sub>x</sub>

A FIG. 4.5 mostra que, quando a velocidade angular é de 1500 rpm, as emissões de NO<sub>x</sub> proveniente dos combustíveis de origem vegetal são maiores que as do óleo diesel comercial (B3). Entretanto, quando o motor opera em velocidade angular de 2000 rpm as emissões de NO<sub>x</sub> são menores no combustível (B100-T) e suas misturas, seguindo do óleo diesel comercial (B3). Quando o motor opera a uma velocidade angular de 2500 rpm as emissões de NO<sub>x</sub> oriundas do óleo diesel comercial (B3) e do biodiesel de palma (B100-T) e suas misturas são praticamente as mesmas.

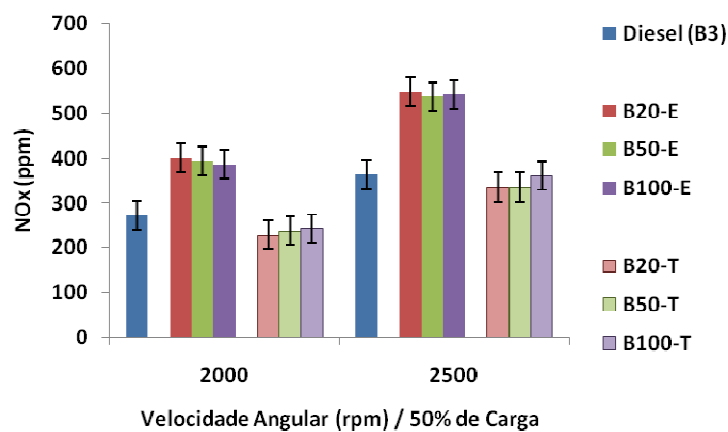


FIG. 4.5 - Emissão de NO<sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com 50 % de carga

Na FIG. 4.6 se observa que, independente da velocidade angular, as emissões de NO<sub>x</sub> provenientes do biodiesel de palma obtido através do processo de transesterificação (B100-T) e de suas misturas (B20-T) e (B50-T) são menores se comparadas aos outros tipos de combustível testados. Ao se comparar a FIG 4.5 e a FIG. 4.6 constata-se que o motor AGRALE M95 emite menos NO<sub>x</sub> quando submetido a 75% carga máxima. Analisando todo o experimento, os menores índices de emissão de NO<sub>x</sub> são obtidos quando o motor estava operando com velocidade angular de 2000 rpm.

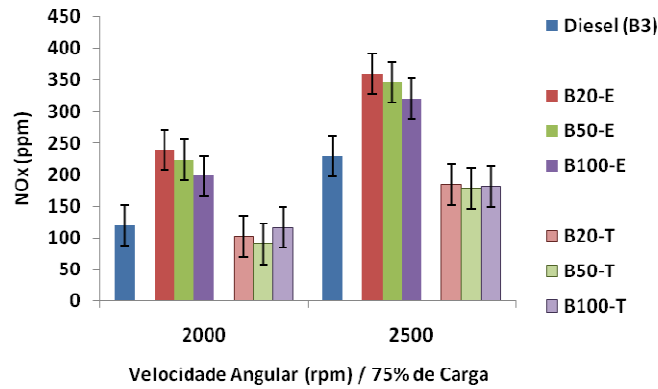


FIG. 4.6 - Emissão de NO<sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com 75 % de carga

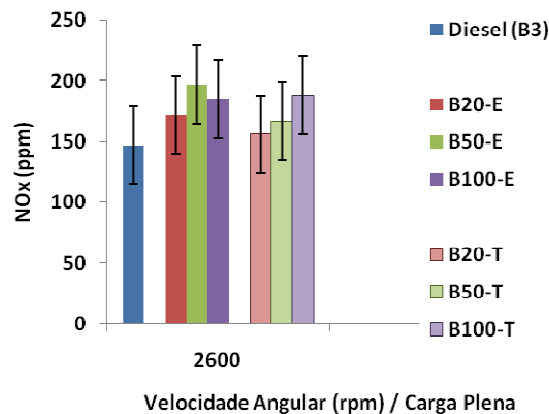


FIG. 4.7 - Emissão de NO<sub>x</sub> do motor AGRALE M95 com carga plena

#### 4.3.3 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL

O consumo específico de combustível mostra com que qualidade o motor utiliza o combustível. As FIGS 4.8, 4.9 e 4.10 mostram que, em quase todos os testes, o óleo diesel comercial (B3) teve o menor consumo específico de combustível comparado aos demais combustíveis testados, excetuando duas condições específicas:

- Quando o motor está com velocidade angular de 2500 rpm, operando com 50% da carga máxima e abastecido com (B20-T)
- Quando o motor está com velocidade angular de 2500 rpm, operando com 75% da carga máxima e abastecido com (B20-E)

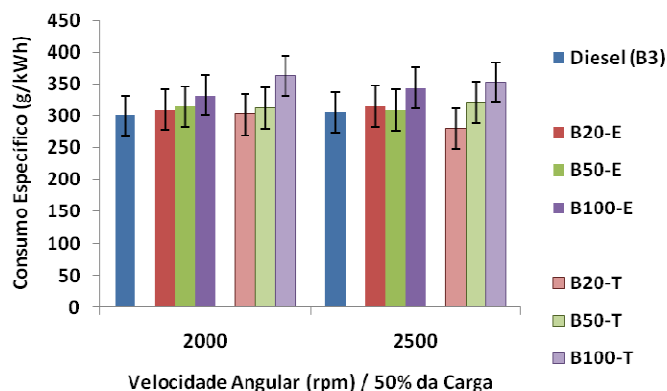


FIG 4.8 - Consumo específico do motor AGRALE M95 com 50 % de carga

Comparando os combustíveis de origem vegetal verifica-se que o biodiesel de palma (B100-T) apresenta maior consumo específico de combustível do que o biodiesel de palma (B100-E), em todos os percentuais de carga a que o motor foi submetido.

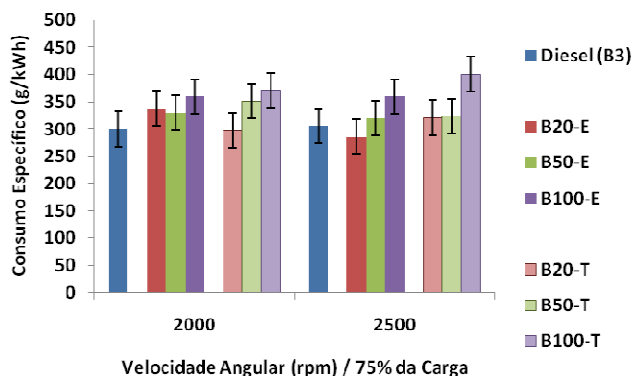


FIG 4.9 - Consumo específico do motor AGRALE M95 com 75 % de carga

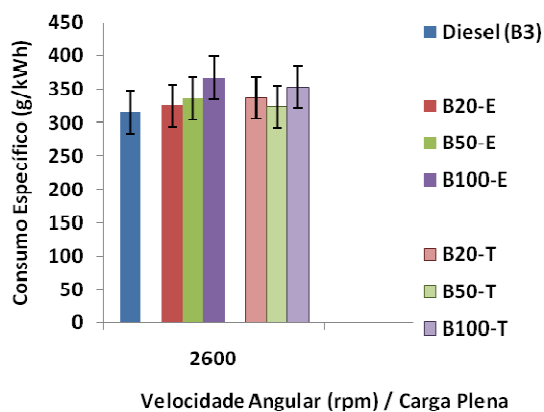


FIG 4.10 - Consumo específico do motor AGRALE M95 com carga plena

Como o consumo específico de combustível (*CEC*) está relacionado com o poder calorífico inferior ( $Q_i$ ) do combustível, quanto maior o poder calorífico de um combustível menor será o consumo específico deste. Entretanto, estes dados não são suficientes para julgar que tipo de combustível tem o melhor comportamento em relação à produção de energia. Para realizar analisar é necessário calcular a eficiência ( $\eta$ ) com que o motor opera com cada combustível (EHSANI, Mehrdad, 2002).

$$\eta = \frac{1}{CEC \cdot Q_i} \quad (5.3)$$

A partir do cálculo da eficiência é possível apontar o combustível que teve o melhor aproveitamento. Apesar do óleo diesel comercial (B3) apresentar menor consumo específico na maioria dos testes realizados, no quesito de eficiência o combustível que obteve os melhores índices, na maioria dos testes, foi o biodiesel de palma (B100-T), comparado ao biodiesel de palma (B100-E) e ao óleo diesel comercial (B3). Entretanto, o combustível que alcançou a maior eficiência  $\eta = 0,306$  foi o (B20-E) na ocasião em que o motor operava com velocidade angular de 2500 rpm. A TAB. 4.2 mostra os rendimentos dos diversos combustíveis testados.

TAB. 4.2 - Rendimento dos Combustíveis

COMBUSTÍVEL	RENDIMENTO ( $\eta$ )				
	2000 rpm		2500 rpm		100 % de carga
	50% de carga	75% de carga	50% de carga	75% de carga	
<b>B3</b>	0,284	0,276	0,280	0,275	0,271
<b>B20-E</b>	0,282	0,259	0,277	0,306	0,269
<b>B50-E</b>	0,289	0,275	0,297	0,284	0,270
<b>B100-E</b>	0,294	0,271	0,285	0,271	0,266
<b>B20-T</b>	0,281	0,284	0,303	0,264	0,251
<b>B50-T</b>	0,293	0,260	0,285	0,283	0,283
<b>B100-T</b>	0,269	0,263	0,277	0,243	0,276



#### 4.3.4 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE CETANO NO ATRASO DA IGNIÇÃO

O número de cetano determina a qualidade da ignição de um motor diesel. Quanto maior for o número de cetano de um combustível, menor será o período de tempo entre a injeção e a ignição deste combustível, ou seja, há uma redução no atraso da ignição (ONURSAL et al., 1997).

As FIGS. 4.11 e 4.12 mostram o comportamento do motor com relação ao número de cetano de cada combustível e o atraso da ignição, em graus, obtido em cada teste. A partir dessas figuras verifica-se que o atraso na ignição tende a diminuir com o aumento do número de cetano de cada combustível. Este fato pode ser constatado em todas as velocidades angulares utilizadas.

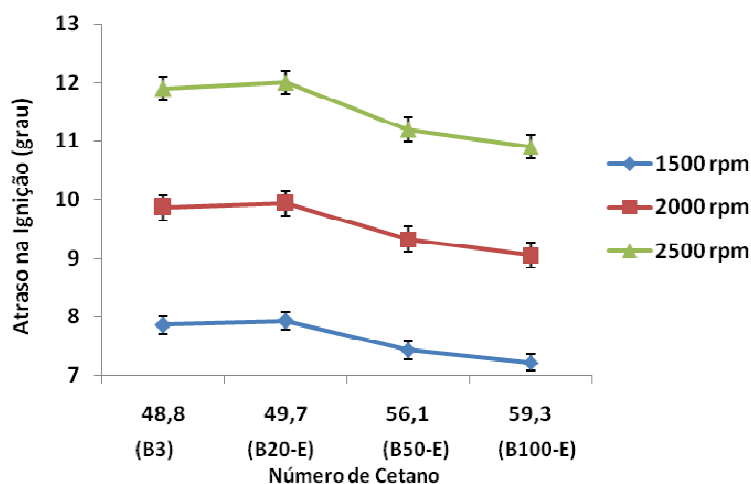


FIG 4.11 - Influência do número de cetano no atraso da ignição

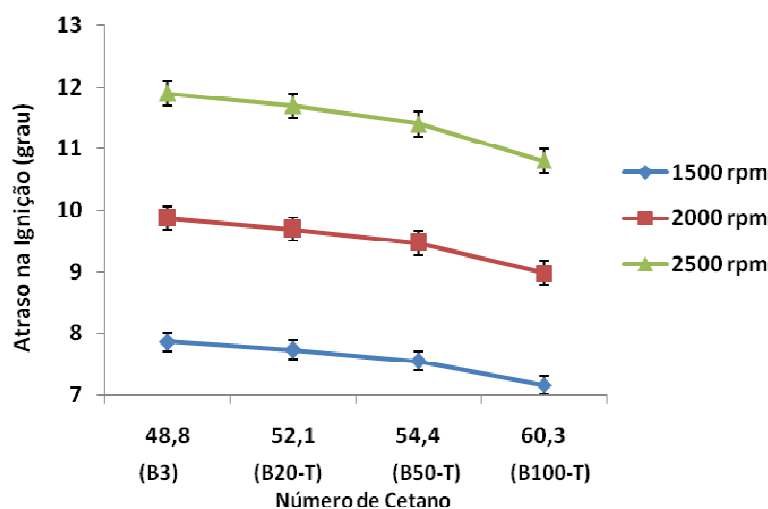


FIG 4.12 - Influência do número de cetano no atraso da ignição

Na FIG. 4.11, especificamente nos dados relativos ao combustível (B20-E), verifica-se um suave aumento no atraso na ignição em comparação com o combustível (B3), não obstante este último possuir número de cetano menor. Levando em consideração que o equipamento introduz um erro de  $\pm 0,1$  graus, o resultado obtido é consistente.

#### 4.4 CONCLUSÃO

Considerando as barras de erro, o óleo diesel comercial (B3) apresentou os menores valores em relação ao consumo específico nos testes realizados. Entretanto, o combustível que obteve o melhor índice de eficiência foi o biodiesel de palma (B20-E). O (B100-E) apresentou os valores de eficiência mais próxima dos valores do óleo diesel comercial (B3) o que representa uma vantagem significativa, pois a eficiência, aliada ao custo do produto são fatores determinantes na escolha do combustível a ser empregado.

Atualmente, os dois tipos de biodiesel de palma (B100-E) e (B100-T) apresentam preços mais elevados se comparados ao óleo diesel comercial (B3), mas com o aumento da demanda de biocombustíveis brevemente haverá igual concorrência entre estes combustíveis.

Os combustíveis de origem vegetal caracterizam-se por apresentarem número de cetano maior se comparados aos combustíveis de origem fóssil. Conforme foi constatado nos testes, quanto maior número de cetano menor o atraso na ignição, fato que traz eleva a qualidade do combustível. Entretanto, um número de cetano maior também pode causar aumento nas emissões de NOx nos motores abastecidos com biodiesel. Para minimizar os efeitos negativos do número de cetano pode ser adaptado um dispositivo para fazer a recirculação dos gases de exaustão para o interior do cilindro com o objetivo de diminuir a quantidade de nitrogênio (N<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>) na mistura ar-combustível. Ou ainda, manipular a bombas de injeção atrasando a injeção do combustível na câmara de combustão. Desta forma o tempo de exposição do combustível a altas temperaturas iria diminuir diminuindo a produção de NOx.

## 5- ANÁLISE DE EMISSÕES E O DESEMPENHO DO MOTOR AGRALE M90

Este capítulo apresenta a análise do desempenho do motor AGRALE M90 acoplado a um gerador KOHLBACK que fornece energia a um arranjo constituído por nove lâmpadas, divididas em três bancos de lâmpadas distintos, cada um composto por três lâmpadas de 500 W de potência cada. O esquema deste arranjo representativo pode ser observado na FIG. 5.1. Além da avaliação do desempenho, este estudo mostra o comportamento do motor em relação à opacidade dos gases de escape e às emissões de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>.

Os testes foram executados com o motor trabalhando a uma velocidade angular de 1800 rpm, utilizando 11 tipos de combustível: óleo diesel comercial (B4); biodiesel de palma obtido através do processo de esterificação (B100-T) e misturas (B10-T), (B20-T), (B30-T), (B40-T), (B50-T), (B60-T), (B70-T), (B80-T) e (B90-T).

Os instrumentos de medida utilizados para realizar os testes foram: opacímetro NA-9000 e analisador de gases MODAL 2010-AO, cujas características estão especificadas nas seções 2.4.2 e 2.4.3, respectivamente.

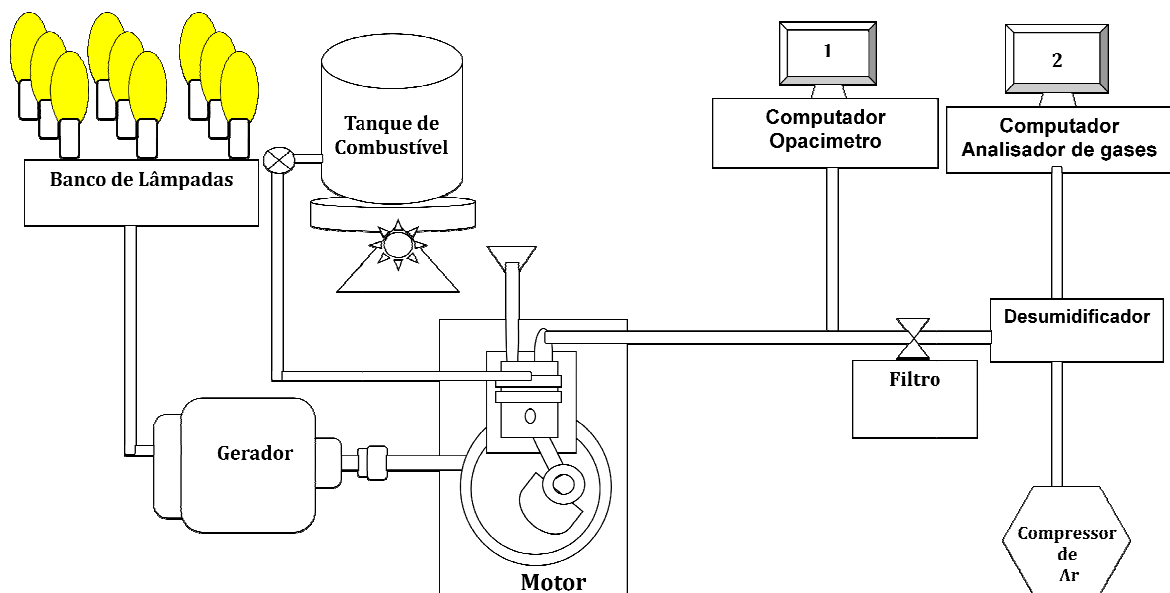


FIG. 5.1 – Esquema representativo dos equipamentos

## 5.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS

Os instrumentos de medida utilizados para realizar os testes foram: opacímetro NA-9000 e analisador de gases MODAL 2010-AO, cujas características estão especificadas nas seções 2.4.2 e 2.4.3, respectivamente. Foram empregados ainda um motor e um gerador que estão especificados nas TABS 5.1 e 5.2, respectivamente. E, para controlar o gerador, foi usado um sistema composto por:

- Amperímetro HARTMANN & Braun com escala 5 a 20 A e sensibilidade de 0,5 A.
- Voltímetro HARTMANN & BRAUN com escala 100 a 250 V e sensibilidade de 5 V.
- Disjuntor central.
- Quatro disjuntores que acionam os bancos de lâmpadas, aplicando carga ao motor.

TAB. 5.1 - Especificação do Motor

MOTOR	AGRALE M90
Potência CV / kW / rpm	12 / 8,8 / 2400
Torque Máximo daNm / rpm	3,9 / 2350
Número de cilindros	1
Taxa de compressão	20:1
Sistema de injeção	Injeção direta

TAB. 5.2 - Especificação do Gerador

GERADOR	KOHLBACK
Potência kVA	7,5
Voltagem	220/117 V
Frequência	60 Hz

## 5.2 METODOLOGIA APLICADA NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

O local de execução dos experimentos foi equipado com sistemas que proporcionam condições apropriadas à realização de ensaios comparativos. A área de execução dos testes está dividida em dois compartimentos: sala de controle e sala de equipamentos.

Na sala de controle estão localizados os seguintes equipamentos: tanque de combustível, bureta de aferição, sistema de ignição e de parada do motor, manômetro do compressor de ar, além de dois computadores conectados ao analisador de gases e ao opacímetro, executando as seguintes funções:

- Computador 1: recebe os dados transmitidos pelo opacímetro NA-9000, relativos a opacidade dos gases de escape.
- Computador 2: capturar os dados enviados pelo analisador de gases MODAL 2010-AO, concernentes às emissões geradas pelo motor.

Na sala de equipamentos estão localizados os seguintes equipamentos: motor, gerador, compressor de ar, opacímetro e analisador de gases. O sistema de insuflamento de ar e exaustão de gases de escape, existente neste recinto, mantém as condições atmosféricas propícias para a realização dos testes.

### 5.2.1 MEDIDAS PRELIMINARES

Para que haja regularidade nos resultados dos testes, alguns procedimentos foram padronizados.

- Os testes de desempenho do motor foram realizados na mesma condição de temperatura, de pressão e de umidade relativa do ar.
- Os dados de cada conjunto de teste foram tomados depois da estabilização das curvas de emissões, de torque e de potência.

### 5.2.3 MEDIDAS PREVENTIVAS

Três procedimentos foram adotados para evitar desvios nos resultados causados por pane no equipamento ou falha humana.

- O consumo de combustível foi medido duas vezes em cada etapa e a aferição foi repetida nos casos em que a diferença de tempo entre as duas medidas for superior a um segundo.
- O ensaio foi interrompido, os dados descartados e o teste reiniciado nos casos de pane no grupo de equipamentos.

### 5.3 TESTE DE DESEMPENHO

Este experimento foi dividido em três etapas. Na primeira, os terminais do gerador foram ligados a um banco de lâmpada, totalizando uma demanda de 1500 W. Na segunda etapa os terminais do gerador foram ligados a dois bancos de lâmpadas, totalizando uma demanda de 3000 W. E, finalmente, na terceira etapa os terminais do gerador foram ligados a três bancos de lâmpadas, totalizando uma demanda de 4500 W. Após a estabilização do motor, os dados relativos ao consumo de combustível e às emissões foram coletados.

### 5.4 RESULTADOS

#### 5.4.1 EMISSÃO DE NO<sub>x</sub>

A FIG 5.2 ilustra o comportamento do motor em relação às emissões de NO<sub>x</sub>. Pode-se perceber que quanto maior a carga a que o motor é submetido maior é a

quantidade de NOx nos gases de exaustão. Observa-se também que o óleo diesel comercial (B4) apresentou os menores índices de emissão de NOx. Em contrapartida, foi registrada as maiores emissões de NOx quando o motor estava abastecido com biodiesel de palma (B100-T), um aumento médio de 8% nas emissões se comparada ao óleo diesel comercial (B4).

As emissões de NOx relativas aos combustíveis derivado da misturas de óleo diesel comercial (B4) e biodiesel de palma (B100-T), enquadraram-se entre os intervalo de valores desses combustíveis.

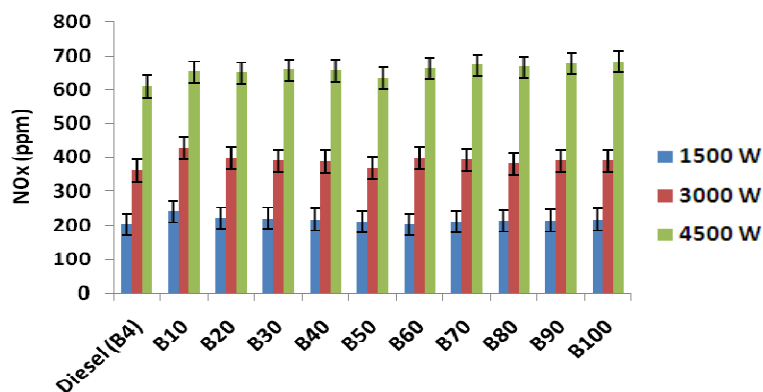


FIG 5.2 - Emissão de NOx do motor AGRALE M90

#### 5.4.2 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL

O consumo específico de combustível (*CEC*) é calculado dividindo o fluxo de massa ( $\dot{m}$ ) divida pela potência ( $P$ ) produzida pelo motor.

$$(5.1)$$

O fluxo de massa do combustível ( $\dot{m}$ ) é obtido multiplicando a vazão volumétrica ( $\dot{V}$ ) de combustível pela massa específica ( $\rho$ ) deste. As massas específicas dos diversos tipos de combustível utilizados neste estudo estão expostas na FIG. 5.5.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (5.2)$$

Para calcular a vazão volumétrica do combustível foi utilizada uma bureta de 100 ml de volume ( $v$ ) e observado o tempo ( $t$ ) que o combustível contido neste recipiente levava para ser consumido.

$$\dot{V} = \frac{\Delta v}{t} \quad (5.3)$$

A potência do gerador ( $P_g$ ) é calculada a partir da voltagem ( $U$ ) e da corrente ( $i$ ) que são aferidas, respectivamente, pelo voltímetro e pelo amperímetro que compõe o sistema de controle do gerador.

$$P_g = U\sqrt{3}.i \quad (5.4)$$

A potência do motor ( $P_m$ ) é obtida considerando que o gerador capta apenas 81% da potência fornecida pelo motor, devido a perdas por atrito.

$$P_m = \frac{P_g}{0,9.0,9} \quad (5.5)$$

A FIG. 5.3 apresenta o consumo de combustível referente aos testes de desempenho dos combustíveis. Pode ser observado que, considerando a demanda do banco de lâmpadas de 4500 W, o óleo diesel comercial apresentou consumo específico de combustível inferior comparado ao biodiesel de palma (B100-T) e suas misturas.

Não foi possível calcular o consumo de combustível para o banco de lâmpadas de 1500 W porque a corrente registrada no sistema de controle ficou abaixo de 5 A , portanto, fora da sensibilidade do equipamento.



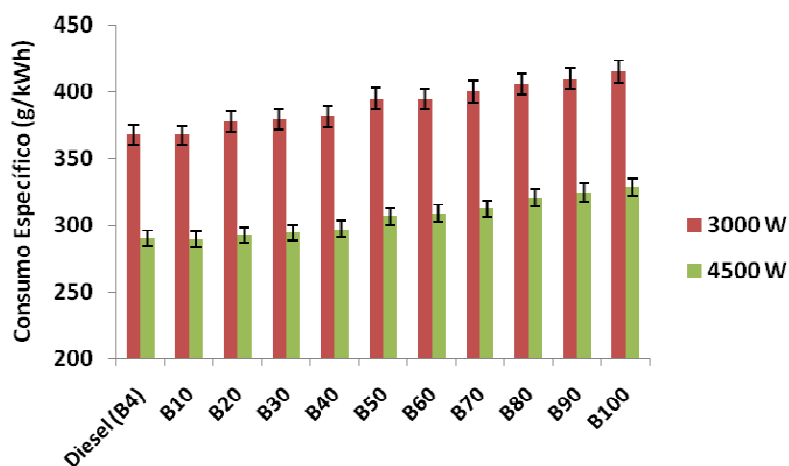


FIG 5.3– Consumo Específico do motor AGRALE M90

#### 5.4.4 VISCOSIDADE CINEMÁTICA

A viscosidade cinemática dos combustíveis utilizados nos ensaios, cujos resultados estão apresentados na FIG. 5.6, foi obtida utilizando um viscosímetro SAYBOLT.

A unidade de medida de viscosidade cinemática proveniente da indústria de petróleo é conhecida como Saybolt Universal Seconds (SUS). A viscosidade cinemática em Segundos Saybolt Universal (SUS) é definida como o tempo gasto para um volume determinado de líquido fluir através do orifício com dimensões definidas. Quando o tempo medido for abaixo de 600 segundos, a unidade da viscosidade é Segundos Saybolt Universal (SUS), caso o tempo medido seja superior a 600 segundos a unidade é Segundos Saybolt Furol (SSF).

Viscosidade geralmente é expressa em centipoise, centitokes ou SSU. Para converter a viscosidade cinemática de SSU para Centistokes cuja unidade é  $\text{mm}^2/\text{s}$  no Sistema Internacional (SI) utiliza-se a equação abaixo (VOLK, 2005):

$$\text{Centistokes} = 0,22 \times \text{SSU} - (180/\text{SSU}) \quad (5.7)$$

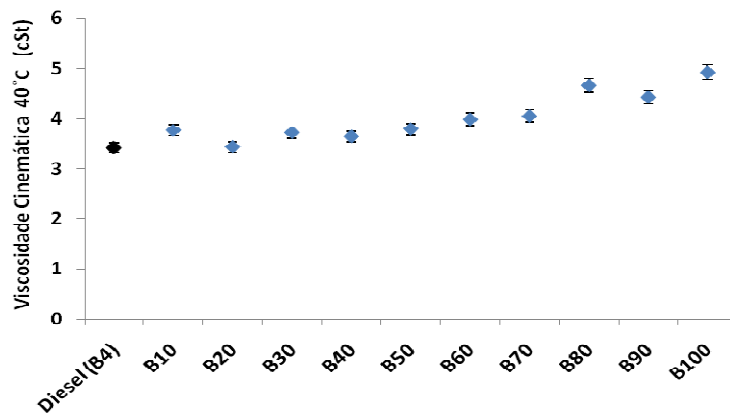


FIG 5.4 – Viscosidade Cinemática a 40 °C ( cSt)

## 5.5 CONCLUSÃO

Em relação às emissões de NOx verifica-se que aumentando a carga a que o motor é submetido aumenta a quantidade de NOx nos gases de exaustão também aumentam. Isto provavelmente acontece devido ao aumento de temperatura que ocorre no interior do cilindro quando a carga no motor aumenta.

O óleo diesel comercial (B4) apresentou consumo específico de combustível inferior quando a solicitação de carga requerida foi de 4500 W. O mesmo foi observado quando a solicitação de carga requerida foi de 3000 W. Nos outros testes apresentados neste trabalho o óleo diesel comercial também apresentou consumo específico de combustível menor que o dois tipos de biodiesel testados (B100-E) e (B100-T). Levando em consideração que o poder calorífico do óleo diesel comercial é cerca de 14% maior do que o poder calorífico do (B100-E) e do (B100-T) é possível que o consumo específico de combustível estar associado principalmente ao poder calorífico dos combustíveis.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados relativos à velocidade angular de 1500 rpm foram desconsiderados porque o motor apresentou instabilidade nesta rotação.

Os testes indicam que o óleo diesel comercial (B3) e (B4) apresentam o menor consumo específico de combustível, seguido das misturas entre estes combustíveis e o biodiesel de palma e, finalmente, do biodiesel de palma. Assim, o aumento do percentual de biodiesel de palma (B100-E) e (B100-T) na mistura com o óleo diesel comercial (B3) e (B4) provoca um aumento do consumo específico. Isso ocorre para compensar a menor quantidade de energia por massa de combustível existente no combustível de origem vegetal comparado ao combustível de origem fóssil. O biodiesel de palma (B100-E) e (B100-T) tem poder calorífico inferior ao do óleo diesel comercial (B3) e (B4), conforme pode ser observado nas TABS 3.1 e 4.1. Portanto, se um motor abastecido com óleo diesel comercial gerar uma determinada potência, este motor, funcionando nas mesmas condições, vai consumir mais combustível para gerar a mesma potência se estiver abastecido com (B100-E) ou (B100-T).

As emissões de  $\text{NO}_x$  foram maiores nas ocasiões em que os motores foram abastecidos com biodiesel de palma (B100-E) e (B100-T) e suas misturas com diesel comercial (B3) e (B4). Este fato pode estar relacionado com o número de cetano que é maior nos combustíveis de origem vegetal. O número de cetano tem influência direta no atraso da ignição: quanto maior o número de cetano menor o atraso da ignição. Como maioria do  $\text{NO}_x$  se forma na fase de pré combustão quando a temperatura na câmara de combustão é mais alta, um maior tempo de exposição à altas temperatura acaba produzindo maior quantidade de  $\text{NO}_x$ .

O capítulo 2 apresenta resultados em que as emissões de  $\text{NO}_x$  proveniente dos combustíveis de origem são praticamente iguais às emissões de  $\text{NO}_x$  produzidas no motor abastecido com óleo diesel comercial. Provavelmente porque o motor foi testado com velocidades angulares relativamente baixas, o que exigiu pouco da capacidade do motor. Neste regime de trabalho é possível que a câmara de combustão consiga dissipar melhor o calor contribuindo para que a temperatura não seja tão elevada. Não foi possível testar o motor com velocidades angulares maiores

porque o dinamômetro no qual estava acoplado danificou, impedindo a continuação dos testes.

A formação do  $\text{NO}_x$  também está relacionada a outros dois fatores: ao nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e ao oxigênio ( $\text{O}_2$ ) presentes no ar da mistura ar-combustível no momento da combustão, ou ao nitrogênio presente na composição do próprio combustível. Como o combustível de origem vegetal utilizado neste trabalho apresenta baixos níveis de  $\text{N}_2$  na sua composição, a maioria das emissões de  $\text{NO}_x$  está associada ao primeiro caso.

É possível diminuir as emissões de  $\text{NO}_x$  proveniente do biodiesel de palma e, desta forma, eliminar esta desvantagem acentuada do biodiesel de palma em relação ao óleo diesel comercial. A primeira sugestão seria efetuar uma alteração na bomba injetora com a finalidade de adiantar o ponto de injeção do combustível na câmara de combustão. Esta manobra iria diminuir o tempo de exposição do combustível às altas temperaturas. A segunda sugestão seria criar um sistema de recirculação dos gases de escape. Isto diminuiria a concentração de  $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$  presentes na câmara de combustão.

Em relação à opacidade, estudos mostram que a opacidade originária dos combustíveis de origem vegetal é geralmente mais baixa em relação ao óleo diesel (LAL e REDDY, 2005). Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a opacidade diminui à medida que a quantidade de biodiesel de palma (B100-E) na mistura aumenta. Isto se deve ao fato do combustível de origem vegetal apresentar maior concentração de oxigênio, favorecendo o processo de oxidação da fuligem e, conseqüentemente menor opacidade.

Os testes realizados com os diversos tipos de motor do ciclo diesel estacionário revelam a viabilidade de utilização do biodiesel de palma (B100-T) e (B100-E) como combustíveis com capacidade de substituir o óleo diesel. Entretanto, os parâmetros de desempenho e emissões não são suficientes para determinar todas as conseqüências de utilização do biodiesel de palma nos motores do ciclo diesel.

Portanto, para trabalhos futuros, é preciso realizar testes de durabilidade, utilizando um motor diesel cujo emprego seja nacionalmente consagrado, com o objetivo de analisar a influência da utilização do biodiesel e suas misturas no desgaste de componentes do motor e na vida útil dos óleos lubrificantes.

Igualmente importante é estudar as condições e os procedimentos relativos ao armazenamento dos combustíveis de origem vegetal para que não haja variações em suas propriedades físico-químicas e a segurança não seja comprometida.

Além disso, é conveniente dar continuidade na investigação relativa às emissões de  $\text{NO}_x$  provenientes dos combustíveis vegetais, pois esta é uma desvantagem significativa deste tipo de combustível. Além as sugestões de modificação nos componentes mecânicos mencionadas anteriormente, é interessante também pesquisar a adição de catalisadores capazes de diminuir às emissões de  $\text{NO}_x$ .

É recomendável executar ensaios para levantar as curvas pressão versus ângulo de manivela, bem como, as curvas de torque e de potência do motor, com o objetivo de obter maiores informações a cerca da influência das propriedades físico-químicas em relação à combustão.

Aprofundar o estudo relacionando o consumo específico, o poder calorífico e os componentes moleculares dos combustíveis para avaliar quais são as propriedades que atuam com maior relevância na eficiência de cada combustível.

O panorama energético global dá sinais claros da crescente demanda em relação ao combustível de origem vegetal como forma alternativa de energia. O Brasil tem plena capacidade para liderar o processo mundial de substituição de petróleo por biocombustíveis por ser um país dotado de condições geográficas favoráveis à agricultura e possuir três décadas de experiência em pesquisas que resultaram na geração de tecnologia de ponta nesta área.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Silvio C. A. et al. **Performance of a diesel generator fuelled with palm oil.** Fuel 2002. v. 81. p. 2097-2102

C.D. RAKOPOULOS et al. **Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels for various origins.** Energy Conversion and Management. v. 47. p. 3272–3287, 2006.

EHSANI, Mehrdad, GAO, Yimin, EMADI, Ali. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design.** CRC Press, 2009. 534 p. il. ISBN 14-2005-398-1.

FEIGON, S. et al. **Travel Matters: Mitigating Climate Change with Sustainable Surface Transportation.** Transportation Research Board, 2003. 59 p. il. ISBN 0-309-08773-2.

GRUDEN, Dusan. **Traffic and Environment.** Springer, 2003. 294 p. il. ISBN 3-540-00050-X.

HEYWOOD, Jonh B. **Internal Combustion Engine Fundamentals.** McGraw-Hill Science, 1998. 929 p. il. ISBN 00-7028-637-X.

HINRICHS, Roger, KLEINBACH, Merlin, MARON et al. **Energia e Meio Ambiente.** Cengage Learning Editores, 2003. 353p. il. ISBN 85-2210-337-2.

HOLLANDER, Jack. **The Real Environmental Crisis: Why Poverty, Not Affluence, Is the Environment's Number One Enemy.** University of California Press, 2004. 251p. il. ISBN 05-2024-328-5.

IH-FEI, Paul Liu. **Energy, technology, and the environment.** ASME Press, 2005. il. ISBN 07-9180-222-1.

JOHNSTON, Robert M. et al. **Elements of applied thermodynamics.** Naval Institute Press, 1992. 574 p. ISBN 15-5750-226-9.

JOVÍLSON C.M. et al. **Diesel Engine Emissions Characterizations, Fueled with Biodiesel/Diesel Mixtures**. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 19, 2009, Brasília.

JÚNIOR, João A. de Carvalho, LACAVA, Pedro T. **Emissões em Processos de Combustão**. UNESP, 2003. 135 p. il. ISBN 85-7139-484-9.

KENKEL, John. **Analytical Chemistry for Technicians**. CRC Press, 2003. 554 p. il. ISBN 15-6670-519-3.

KREITH, Frank, GOSWAMI, D. Yogi. **The CRC Handbook Of Mechanical Engineering**. CRC Press, 2005. 2688 p. il. ISBN 08-4930-866-6.

KALAM, M.A., MASJUKI, H.H. **Biodiesel from Palm oil — An Analysis of its Properties and Potential**. Biomass and Bioenergy. v. 23. p. 471-479, 2002.

KALAM, M.A., MASJUKI, H.H. **Testing palm biodiesel and NPAA additives to control NOx and CO while improving efficiency in diesel engines**. Biomass and Bioenergy. v.32. p. 1116-1122, 2008.

KANOK-ON, R., CHINDA, C. **Performance of an Engine Using Biodiesel from Refined Palm Oil Stearin and Biodiesel from Crude Coconut Oil**. In: THE JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY AND ENVIRONMENT (SEE), 2004, Hua Hin, Thailand. p. 30-44.

KEMP W. H. **Biodiesel: basics and beyond: a comprehensive guide to production and use for the home and farm**. Aztex Press, 2006. 588 p. il. ISBN 09-7332-333-7

LAPUERTA, Margin, ARMAS, Octavio, FERNANDEZ. José. R. **Effect of Biodiesel Fuels on Diesel Engine Emissions**. Progress in Energy and Combustion Science. v. 34. p. 198-223, 2008.

MARCOVITCH, Jacques. **Para mudar o futuro: mudanças climáticas, políticas públicas e estratégias empresariais**. USP, 2006. 366 p. il. ISBN 85-3140-972-1.

MEIRELLES FILHO, João. **O Livro de Ouro da Amazônia**. Ediouro, 2003. 400p. il. ISBN 85-0002161-6.

NASCIMENTO, Elimar P., VIANNA João N., BUARQUE, Cristovam, BURSZTYN Marcel, DUARTE, Laura, MELLO, Neli, BECKER, Bertha K., WERMANN, Magda S. **Dilemas e Desafios do Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Rio de Janeiro: Garamond, 2007. 144 p. ISBN 978-85-7617-119-5.

OSAKI, Mauro, OTÁVIO, Mário Batalha. **Produção de Biodiesel e Óleo Vegetal no Brasil: Realidade e Desafio**. In: XLVI CONGRESSO BRASILEIRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 2008. Rio Branco-Acre.

ONURSAL, Bekir , GAUTAM, Surhid, P. GAUTAM, Surhid. **Vehicular air pollution: experiences from seven Latin American urban centers**. World Bank Publications, 1997. 282 p. il. ISBN 08-2134-016-6.

PARENTE, E. J.de S. et al. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza: Tecbio, 2003. 68p.

SEBASTIAN, Anton. **A dictionary of the history of science**. Informa Health Care, 2001. 373p. il. ISBN 18-5070-418-X.

SENGUPTA, Mritunjoy, 1989, **Mine Environmental Engineering**. CRC Press,1990. 328 p. il. ISBN 0849349575.

SOUZA SANTOS, Marcio L. de. **Solid fuels combustion and gasification: modeling, simulation, and equipment operation**. CRC Press, 2004. 439 p. il. ISBN 08-2470-971-3.

STIESCH, Gunnar. **Modeling engine spray and combustion processes**. Birkhäuser, 2003. 282 p. il. ISBN 35-4000-682-6.

TICKELL, Joshua. **Biodiesel America: How to Achieve Energy Security, Free America from Middle-East Oil Dependence, and Make Money Growing Fuel**. Biodiesel America, 2006. 340p. il. ISBN 09-7072-274-5.

TICKELL Joshua, TICKELL, Kaia. **From the Fryer to the Fuel Tank: The Complete Guide to Using Vegetable Oil as an Alternative Fuel**. Biodiesel America, 2000. 162 p. il. ISBN 09-7072-270-2.



TOTTEN, George E., WESTBROOK, Steven R., SHAH, Rajes J. **Fuels And Lubrificant Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing.** ASTM International, 2003. 1087 p. il. ISBN 08-0312-096-6.

United Nations Environment Program, Pace University. **UNEP Handbook for Drafting Laws on Energy Efficiency and Renewable Energy Resources.** UNEP/Earthprint, 2007. 240p. il. ISBN 92-8072-810-5.

VOLK, Michael W. **Pump characteristics and applications.** CRC Press, 2005. 533 p. il. ISBN 08-2472-755-X.

WANDER, P. R., ALTAFINI, C. R., POSSAMAI, E. F.. **Analisy of Biodiesel Use in Stationary Engines of Single and Two Cylinders.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 19, 2009, Brasília.

ZOUAIN, Deborah. **Gestão de Instituições de Pesquisa.** FGV Editora, 2001. 255p. il. ISBN 85-2250-364-8.