**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**

**Análise da influência de diferentes misturas de biodiesel no
desempenho e emissões de poluentes de um motor diesel agrícola**

Angelo Juliato

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração:
Máquinas Agrícolas**

**Piracicaba
2006**

Angelo Juliato
Tecnólogo em Processamento de Dados

**Análise da influência de diferentes misturas de biodiesel no desempenho e
emissões de poluentes de um motor diesel agrícola**

Orientador:

Prof. Dr. **TOMAZ CAETANO CANNAVAM RIPOLI**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração:
Máquinas Agrícolas**

Piracicaba
2006

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Juliato, Angelo

Análise da influência de diferentes misturas de biodiesel no desempenho e emissões de poluentes de um motor diesel agrícola / Angelo Juliato. - - Piracicaba, 2006.
159 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.

1. Combustão 2. Máquinas agrícolas – Desempenho 3. Motores diesel 4. Óleos vegetais como combustíveis I. Título

CDD 631.3

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

DEDICATÓRIA

À Miriam e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Dr. Tomaz Caetano Cannavam Ripoli pela orientação, encorajamento e por insistir em seu pensamento prático.
- Aos colegas de turma e professores do Curso de Pós-graduação em Máquinas Agrícolas, pelo apoio.
- Ao engenheiro Fábio Miskulin, da empresa Yanmar, fabricante de motores, pelo fornecimento do motor para teste.
- Ao Dr. Roberto Stein, da Delphi, por ceder gentilmente as instalações mais modernas do país para a realização dos ensaios.
- À Ceralit, pelo fornecimento dos combustíveis para ensaio.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	17
LISTA DE SIGLAS.....	19
1 INTRODUÇÃO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Biodiesel e a Matriz Energética Brasileira.....	23
2.2 A agricultura brasileira e sua propensão ao cultivo de oleoginosas.....	25
2.3 A utilização do biodiesel no mundo e no Brasil.....	26
2.3.1 A utilização de biodiesel no mundo.....	26
2.3.2 Histórico no Brasil.....	28
2.3.3 Benefícios sociais e econômicos para o Brasil.....	29
2.4 Considerações sobre as emissões veiculares e ciclo de vida do biodiesel.....	31
2.5 Conceito de biodiesel, processos de produção e sua aplicação em motores...	36
2.6 Propriedades do biodiesel	41
2.7 Óleo vegetal bruto não é biodiesel.....	48
2.8 Alguns Resultados de ensaios.....	49
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	63
3.1 Material	63
3.1.1 Caracterização do Laboratório de Ensaio de Motores.....	63
3.1.1.1 Dinamômetro de motores.....	63
3.1.1.2 Sistema de medição de gases.....	64
3.1.1.3 Unidade de condicionamento de óleo	67
3.1.1.4 Unidade de condicionamento de líquido de arrefecimento.....	67
3.1.1.5 Unidade de condicionamento e medição de combustível.....	67
3.1.1.6 Sistema de controle, medição e automação.....	68
3.1.1.7 Sistema de bombeamento e seleção de combustível	71
3.1.1.8 Sistemas auxiliares (de suporte) e de sistemas de segurança.....	72

3.1.2 Caracterização do motor ensaiado.....	74
3.1.2.1 Aplicações do motor Yanmar NSB.....	75
3.1.3 Combustível utilizado.....	76
3.2 Métodos	78
3.2.1 Sequência de ensaio	78
3.2.2 Instrumentação.....	79
3.2.3 Montagem do motor em dinamômetro.....	84
3.2.4 Execução do ensaio.....	86
3.2.5 Cálculo dos resultados.....	87
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	89
4.1 Torque corrigido.....	89
4.2 Potência corrigida.....	89
4.2.1 Potência em função da taxa de biodiesel.....	91
4.3 Consumo específico.....	91
4.4 Gases não poluentes	93
4.4.1 Dióxido de carbono.....	93
4.4.2 Oxigênio.....	95
4.5 Gases poluentes.....	96
4.5.1 Monóxido de carbono.....	96
4.5.2 Óxido de nitrogênio.....	97
4.5.3 Hidrocarbonetos.....	98
CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS.....	103
APÊNDICE.....	113
ANEXOS	117

RESUMO

Análise da influência de diferentes misturas de biodiesel no desempenho e emissões de poluentes de um motor diesel agrícola

Existem motivações de ordem ambiental e energética para que combustíveis renováveis sejam cada vez mais utilizados. O biodiesel é uma das alternativas renováveis à utilização de óleo diesel de origem fóssil, e sua utilização tem crescido no mundo. No Brasil, existe uma propensão muito positiva para o cultivo de oleaginosas, e o biodiesel aparece como proposta de solução ambiental, energética e social. A utilização de biodiesel no Brasil tem sido crescente desde 2004 e torna-se compulsória a partir de 2008. Nas lavouras não é diferente, e a utilização do biodiesel no maquinário agrícola já é realidade em diversas fazendas do país. A fim de se conhecer as consequências em termos de desempenho, devido a utilização de biodiesel em motores do ciclo diesel, estudos se fazem necessários. O presente trabalho teve por objetivo comparar desempenho, consumo específico e emissão de gases de um motor originalmente concebido para funcionar com óleo diesel de origem mineral, utilizando-se misturas de biodiesel de soja e de nabo forrageiro em proporções de até 20 % em seu volume. Os ensaios foram realizados no laboratório de motores da Delphi, em Piracicaba, SP, em dinamômetro de motor assíncrono, em célula de medição automatizada. Não foram observadas diferenças significativas no desempenho do motor ao funcionar com misturas de biodiesel comparativamente ao diesel padrão. O HC foi maior para misturas de biodiesel em toda a faixa de operação do motor. O NO_x mostrou-se maior apenas na faixa inicial de operação. Para o CO não se pôde atribuir uma tendência de emissões de gases relacionada ao biodiesel. Para os gases não poluentes, o biodiesel produziu menor oxigênio que o diesel padrão e mesmo nível de CO_2 . O consumo específico de combustível mostrou-se sensível à adição de biodiesel, sendo maior proporcionalmente às taxas de biodiesel utilizadas. A taxa de biodiesel adicionada nem sempre resultou em tendência proporcional de alteração nos resultados.

Palavras-chave: Biocombustíveis, Biodiesel, Motor diesel, Ensaios, Emissões, Desempenho

ABSTRACT

Performance and pollutants emissions influence analysis of different biodiesel blends on a diesel agricultural engine

There are environmental and energetic motivations that lead to a higher usage of renewable fuels. Biodiesel is one of the renewable alternatives to the fossil diesel fuel and its usage has been growing worldwide. In Brazil there are positive conditions for the oil energetic agriculture and biodiesel emerges as a proposal for environmental, energetic and social solution. Utilization of biodiesel has been increasing since 2004 and will become obligatory starting 2008. Agricultural utilization of biodiesel on machines is already a reality in several farms in Brazil. In order to better understand the consequences in terms of engine performance due to biodiesel utilization in diesel engines, research is necessary. This work had the objective of comparing performance, specific fuel consumption and gas emissions of an engine originally designed to burn fossil diesel, using soy and forage turnip biodiesel / diesel blends in proportions up to 20 % in volume. Tests were performed at Delphi engine laboratories in Piracicaba, SP, in asynchronous dynamometers, in a computer controlled test cell. No significative performance differences were found when running with biodiesel blends if compared to standard diesel. HC was higher with biodiesel blends for all engine operation range. NO_x was higher only at initial engine operation range. It was not possible to attribute a tendency to CO emission related to biodiesel usage. For non-pollutant gases, biodiesel blends resulted in less oxygen and same level of CO₂. Specific fuel consumption was sensitive to biodiesel and was found to be higher proportionally to the biodiesel amount in every blend. Amount of biodiesel did not produce always proportional results.

Keywords: Biofuels, Biodiesel, Diesel engine, Test, Emissions, Performance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mercado de combustíveis para transporte no Brasil.....	24
Figura 2 –	Variação das emissões de poluentes (HC, CO e NO _x) em função da adição de biodiesel.....	33
Figura 3 –	Processo de obtenção de biodiesel a partir da transesterificação.....	39
Figura 4 –	Reações químicas relativas à transesterificação.....	40
Figura 5 –	Peças de um motor submetido à utilização de óleo vegetal bruto. A – mancal do virabrequim. B – bico injetor.....	48
Figura 6 –	Consumo específico de combustível (BSFC) em função da relação ar-combustível (λ) para a condição de 2000 rpm.....	53
Figura 7 –	Concentração de NO _x em função da relação ar-combustível para a condição de 2000 rpm.....	54
Figura 8 –	Dinamômetro utilizado para ensaio.....	64
Figura 9 –	Bancada de medição de emissões (A). Sistema LubCon - condicionamento de óleo (B). Sistema CoolCon - condicionamento de líquido de arrefecimento (C). Sistema FuelCon - condicionamento e medição de combustível (D).....	66
Figura 10 –	Sistema de conexão de sinais de entrada e saída analógicas e digitais.....	69
Figura 11 –	Sensores de temperatura e pressão - vista externa (A). Sensores de temperatura e pressão - vista interna (B). Controlador do dinamômetro (C). CPU VME de controle do sistema (D).....	69
Figura 12 –	Célula de testes.....	70

Figura 13 – Sala de controle - vista do painel de operações (A). Sala de controle - vista dos racks de controle (B).....	70
Figura 14 – Captura de tela como exemplo de interface para o sistema de controle e automação FEV ADAPT.....	71
Figura 15 – Sistema de bombeamento utilizado para os ensaios.....	72
Figura 16 – Sistemas de suporte: sprinkler (A), detector de fumaça (B), extintor automático de CO ₂ (C) e detectores de gases tóxicos (D).....	73
Figura 17 – Motor Yanmar: Vista lateral com destaque para o tanque de combustível (A). Vista lateral esquerda (escapamento, detalhe do cabeçote do motor disposto de forma horizontal) (B). Vista traseira (volante de inércia, ventilador do radiador e escapamento) (C). Vista frontal (filtro de ar, tanque de combustível, receptáculo da manivela de partida e reservatório de líquido de arrefecimento) (D).	75
Figura 18 – Cultivador (A). Bomba d'água para irrigação (B). Cultivador acoplado a cortador (C). Grupo gerador de eletricidade (D).....	76
Figura 19 – Bomba utilizada para medição do óleo diesel padrão.....	77
Figura 20 – Tambores de acondicionamento (A). Medição da quantidade de biodiesel antes de ser adicionado ao diesel comum (B). Finalização da elaboração das misturas, por meio da complementação com óleo diesel padrão (C).....	78
Figura 21 – Alavanca de aceleração manual onde foi fixado o cabo de controle de aceleração do sistema.....	79
Figura 22 – Tubagem de escape preparada para receber as instrumentações de medição.....	80

Figura 23 – Duto de admissão de ar preparado para receber instrumentação de medição de pressão (A). Termopar localizado acima do filtro de ar para medição da temperatura de ar de admissão (B).....	81
Figura 24 – Instrumentação para medição de pressão de combustível.....	82
Figura 25 – Termopar instalado para medição de temperatura do líquido de arrefecimento.....	83
Figura 26 – Termopar instalado para medição da temperatura do óleo.....	83
Figura 27 – Motor em fase inicial de instalação. O motor é fixado ao berço e conectado ao dinamômetro por meio de um eixo-cardã.....	84
Figura 28 – Motor completamente instalado no dinamômetro.....	85
Figura 29 – Detalhe das conexões do sistema de amostragem.....	85
Figura 30 – Curvas de torque corrigido em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel.....	89
Figura 31 – Curvas de potência corrigida em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel	90
Figura 32 – Curvas de potência máxima corrigida em função das percentagens de biodiesel	91
Figura 33 – Curvas de consumo específico de combustível em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel.....	92
Figura 34 – Consumo específico médio em função da taxa de biodiesel adicionada, tipo e percentagem de biosiesel.....	93
Figura 35 – Emissões de dióxido de carbono em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel.....	94

Figura 36 – Emissões de oxigênio em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel.....	95
Figura 37 – Emissões de monóxido de carbono em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel.....	96
Figura 38 – Emissões de óxidos de nitrogênio em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel.....	98
Figura 39 – Emissões de hidrocarbonetos em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Composição da matriz energética no mundo e no Brasil.....	24
Tabela 2 –	Oleaginosas e suas características de produtividade.....	25
Tabela 3 –	Consumo de óleo diesel no Brasil: parcelas produzidas localmente e importadas (em 10 ⁹ L).....	30
Tabela 4 –	Limites para emissão de poluentes para veículos a diesel.....	33
Tabela 5 –	Especificação do biodiesel B100.....	41
Tabela 6 –	Especificação de óleo diesel e mistura óleo diesel/biodiesel – B2 de uso rodoviário.....	43
Tabela 7 –	Alterações médias em emissões devido ao uso do biodiesel em relação ao combustível comum.....	51
Tabela 8 –	Resultados de testes de durabilidade de motores com misturas de biodiesel.....	52
Tabela 9 –	Visão geral qualitativa dos resultados de testes de Verhaeven et al. (2005).....	55
Tabela 10 –	Variação da quantidade total de contaminantes estimada pela frota de ônibus de transporte urbano na cidade de Valência por ano.....	57
Tabela 11 –	Descrição dos analisadores de gases, seus princípios e descrições de funcionamento.....	65
Tabela 12 –	Sequência de ensaio.....	79
Tabela 13 –	Diferenças obtidas no consumo específico de combustível médio em relação ao consumo com diesel padrão.....	93

Tabela 14 – Diferenças obtidas nas emissões de CO ₂ em relação às emissões com diesel padrão.....	94
Tabela 15 – Diferenças obtidas nas emissões de O ₂ em relação às emissões com diesel padrão.....	95
Tabela 16 – Diferenças obtidas nas emissões de CO em relação às emissões com diesel padrão.....	97
Tabela 17 – Diferenças obtidas nas emissões de NO _x em relação às emissões com diesel padrão.....	98
Tabela 18 – Diferenças obtidas nas emissões de HC em relação às emissões com diesel padrão.....	99

LISTA DE SIGLAS

AEA – Álcool Etílico Anidro
AEH – Álcool Etílico Hidratado
ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM – American Society for Testing and Materials Standards
BSFC – Consumo Específico de Combustível
Bx – Mistura de óleo diesel + x % de biodiesel
CEI – Comissão Executiva Interministerial
CENPES – Centro de Pesquisas da Petrobrás
CNG – Gás Natural Comprimido
CNPE – Conselho Nacional de Política Energética
CO – Monóxido de Carbono
CO₂ – Dióxido de Carbono
COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CREA – Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia
CV – Coeficiente de Variação
DG – Diglicerídeo
EGR – Recirculação de Gases de Escapamento
EMA – Engine Manufacturers Association
EPA – Environmental Protection Agency
ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
GG – Grupo Gestor
GL – Glicerol
GNV – Gás Natural Veicular
GTI – Grupo de Trabalho Interministerial
HC – Hidrocarbonetos
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados
LII – Límpido e Isento de Impurezas

LNG – Gás Natural Liquefeito
LPG – Gás Liquefeito de Petróleo
LSD – Diesel de Baixo Enxofre
MG – Monoglicerídeo
MME – Ministério de Minas e Energia
MP – Material Particulado
NAE – Núcleo de Assuntos estratégicos
NE – Não exigível
NO_x – Óxidos de Nitrogênio
O₂ – Oxigênio
OMS – Organização Mundial de Saúde
PASEP – Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PIS – Plano de Integração Social
PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
RME – Rapeseed Methyl Ester
SO₂ – Dióxido de Enxofre
SO_x – Óxidos de Enxofre
TG – Triglicerídeo
THC – Hidrocarbonetos Totais
ULS – Diesel de Ultra Baixo Enxofre
UNICAMP – Universidade de Campinas
USP – Universidade de São Paulo
UVOME – Used Vegetable Oil Methyl Ester
VOC – Componentes Orgânicos Voláteis

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Plano Nacional de Agroenergia (2006 – 2011), a agroenergia é uma das prioridades do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, e deriva da necessidade crescente de energia como insumo para o desenvolvimento da sociedade. A elevação recente dos preços do petróleo, no mercado internacional, aponta para a necessidade de buscar alternativas de suprimento de energia, tanto elétrica como para transporte (BRASIL 2005a).

O óleo diesel combustível é utilizado em grande escala no país e no mundo. Nos motores agrícolas a conduta não é diferente. A grande maioria das máquinas agrícolas utiliza este combustível, mesmo as de pequeno porte (MIALHE, 1996).

A crescente conscientização ambiental e consequente demanda por recursos renováveis de energia tem despertado o interesse na utilização de plantas oleaginosas para a produção de biodiesel. Atualmente o governo federal, por meio do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, autoriza a adição de 2 % deste combustível ao óleo diesel de origem fóssil. A partir de janeiro de 2008 esta mistura torna-se obrigatória (BRASIL, 2003b).

No mundo e no Brasil as alternativas renováveis estão sendo estudadas, e o biodiesel, entre outros biocombustíveis, tem sido anunciado como uma alternativa para a redução de gases do efeito estufa (BRASIL, 2005a). O biodiesel é definido pelo National Biodiesel Board como monoalquil éster de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de fontes renováveis, como óleos vegetais ou gordura animal, utilizado em substituição aos combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão, do ciclo diesel (BRASIL, 2004b).

Em 16 de janeiro de 2004, com a finalidade de preparar o Brasil para um novo contexto energético, a partir da matriz de agroenergia, foi lançado na escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ da Universidade de São Paulo – USP, o Pólo Nacional de Biocombustíveis para Pesquisa e Desenvolvimento. O pólo foi implantado com o objetivo de coordenar esforços e definir estratégias para o uso de diferentes fontes de biomassa (AMARAL, 2006).

Dentre as vantagens do biodiesel, destaca-se a semelhança das suas propriedades às do diesel mineral, possibilitando sua substituição sem alterações no motor, além de reduzir o nível de poluentes (SANTOS et al., 2004).

Dadas as suas características controversas como combustível viável, são necessários estudos para avaliação de viabilidade, principalmente, com relação ao desempenho dos motores.

Embora se encontre na bibliografia testes com motores de diferentes portes, e utilizando-se diferentes oleaginosas, é ainda, inédito no Brasil um ensaio com motor monocilíndrico agrícola comparando-se misturas de diferentes oleaginosas. Por ser o biodiesel um combustível que contém mais oxigênio que o diesel fóssil, parte-se do princípio que um motor de pequeno porte apresente queda de desempenho e aumento de consumo de combustível. Além do desempenho e do consumo, as emissões de gases tendem a variar, com aumento de Óxidos de Nitrogênio – NO_x e queda de Hidrocarbonetos – HC e Monóxido de carbono – CO.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um motor agrícola do ciclo diesel em funcionamento com diferentes misturas de biodiesel, de duas origens distintas: soja e nabo forrageiro, por meio da medição de potência, torque, emissões de gases e consumo específico de combustível. A finalidade foi orientar os possíveis usuários de motores, bem como os fabricantes, no tocante à necessidade de modificações e/ou consequências na utilização de biodiesel. O motor foi ensaiado em um laboratório de motores com certificação metrológica internacional, e seu desempenho foi medido em toda a faixa de operação, possibilitando a análise de seu desempenho, emissões de poluentes e consumo de combustível.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biodiesel e a matriz energética brasileira

A matriz energética brasileira possui uma forte participação de energias provindas de recursos renováveis. Conforme pode-se observar na Tabela 1, enquanto no mundo a participação de energias renováveis é de 14 %, no Brasil esta participação é de 45,5 % (BRASIL, 2004b).

Segundo Parente (2003), a consciência mundial está mudando com relação à produção e consumo de energia, especialmente quando originária de fontes não-renováveis, como é o caso dos combustíveis fósseis. Isto tem conduzido estudos em busca de aperfeiçoamento do uso de energia alternativa. Segundo o autor, o ano de 1970 representou um verdadeiro marco na história energética do planeta, pois a partir daí, vários esforços foram dedicados à superação da crise, os quais incidiram, basicamente, em dois grupos de ações: O primeiro consistiu na conservação ou economia energética, e o segundo dedicou-se ao aperfeiçoamento do uso de fontes alternativas, como álcool e biodiesel.

De acordo com Brasil (2005c), o Ministério de Minas e Energia – MME, divide o mercado de combustíveis para transporte em álcool hidratado, gasolina tipo C, etanol, gás natural veicular – GNV e óleo diesel (Figura 1). Nota-se que o óleo diesel combustível responde por 57,7 % de todo o combustível comercializado no Brasil. A adição de 5 % de biodiesel ao óleo diesel comum consiste, portanto, de uma expressiva participação no mercado de combustíveis, pois resulta em uma fatia de 2,9 % no mercado, superando a atual fatia ocupada pelo GNV.

Tabela 1 – Composição da matriz energética no mundo e no Brasil

Fontes	Percentagens em relação ao total de energia (%)	
	Mundo	Brasil
Petróleo	35,3	43,1
Carvão mineral	23,2	6,0
Gás natural	21,1	7,5
Biomassa tradicional	9,5	8,5
Nuclear	6,5	1,8
Hidroelétrica	2,2	14,0
Biomassa moderna	1,7	23,0
Outras renováveis	0,5	0,1

Fonte: Adaptado de MME (2005)

Figura 1 – Mercado de combustíveis para transporte no Brasil

Fonte: Adaptado de MME (2005)

A matriz energética mundial tem participação total de 79,6 % de fontes de carbono fóssil, sendo 35,3 % de petróleo, 23,2 % de carvão e 21,1 % de gás natural (Tabela 1).

O Brasil se destaca entre as economias industrializadas pela elevada participação das fontes renováveis em sua matriz energética. Isso se explica por alguns privilégios da natureza, como uma bacia hidrográfica contando com vários rios de

planalto, fundamental à produção de eletricidade (14 %), e o fato de ser o maior país tropical do mundo, um diferencial positivo para a produção de energia de biomassa (23 %) (BRASIL 2005c).

Segundo Melo (2005), fontes alternativas de energia vêm ganhando espaço no Brasil. O GNV é uma destas alternativas. O Brasil possui a segunda maior frota de veículos movidos a este combustível do mundo, com 740.000 veículos, perdendo para a Argentina, com 1.200.000 veículos.

2.2 A agricultura brasileira e sua propensão ao cultivo de oleaginosas

O Brasil, devido a sua diversidade climática e de ecossistemas, permite uma gama de possibilidades de oleaginosas para produção de biodiesel. Teixeira (2005a) apresentou as principais oleaginosas cultiváveis no Brasil que poderiam ser utilizadas para a fabricação de biodiesel: Soja (*Glycine max*), Algodão (*Gossypium* spp. L.), Girassol (*Helianthus annuus*), Mamona (*Ricinus communis*), Dendê (*Elaeis guineensis*), Nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), Macaúba (*Acrocomia aculeata*) e Pinhão-manso (*Jatropha curcas*). A Tabela 2 apresenta algumas características relevantes destas oleaginosas.

Tabela 2 – Oleaginosas e suas características de produtividade

Espécies	Origens do óleo	Teores de óleo (%)	Meses de colheita / ano	Produtividade (t óleo. ha ⁻¹)
Dendê / Palma	Amêndoa	22	12	0,3 a 6,0
Macaúba	...	...	...	...
Girassol	Grão	38 a 48	3	0,5 a 1,9
Pinhão-manso	...	...	...	...
Mamona	Grão	45 a 50	3	0,5 a 0,9
Nabo Forrageiro	Grão	...	...	...
Soja	Grão	18	3	0,2 a 0,4
Algodão	Grão	15	3	0,1 a 0,2

Fonte: (TEIXEIRA, 2005a)

Nota: Sinal convencional utilizado:

... Dado numérico não disponível

2.3 A utilização do biodiesel no mundo e no Brasil

2.3.1 A utilização de biodiesel no mundo

A utilização de óleos vegetais como combustível, em motores de combustão interna não constitui uma inovação recente. Em 1900, Rudolf Diesel (1858 - 1913), inventor do motor do ciclo diesel, utilizou óleo de amendoim para demonstrar seu invento em Paris (RABELO, 2001).

Segundo Teixeira (2005b), a produção de biodiesel, vem alcançando seu espaço, principalmente na Europa, onde sua utilização na forma pura (B100) tem sido viabilizada. O autor informa que o maior produtor mundial é a Alemanha, ultrapassando 1,5 milhão de toneladas anuais. Em maio de 2005, foi apresentado, em *workshop* promovido pela Câmara de Comércio da Alemanha, um aumento da demanda de biocombustíveis, emanada pela comissão Européia, de 2 % para 5,75 %, até o ano de 2010 (HAUPT¹, 2005 apud TEIXEIRA, 2005b). É esperado que o biodiesel seja responsável por uma significativa contribuição nesse setor. Na Alemanha, a flexibilidade da produção é visível, com plantas industriais que variam em capacidade produtiva de 2 mil a 120 mil toneladas anuais, e, esta condição é muito interessante, pois permite aos empreendedores diversas opções de investimento em projetos industriais de pequena, média e grande escala.

Segundo o artigo Biodiesel... (2005), multiplicam-se no mundo as iniciativas de utilização de óleos vegetais transesterificados como combustível ecológico auto-sustentável, ou renovável. Na Europa existe a possibilidade de se encontrar biodiesel nas bombas em postos de abastecimento comuns. Na Alemanha, o biodiesel é 12 % mais barato que o diesel comum, demonstrando uma forma de incentivo ao uso. Nos Estados Unidos, mais de 200 frotas rodam com biodiesel a fim de gerar massa de dados em termos resultados de durabilidade.

Peterson et al. (2000), afirmam que a utilização de combustíveis alternativos baseados em biomassa, incluindo o biodiesel, irão melhorar o ambiente, reduzir o uso de reservas de petróleo e reduzir importações. Informam que desde 1979, a

¹ HAUPT, J. Biodiesel: development and outlook in Germany and Europe: requirements on quality assurance of biodiesel for a sustainable market access. São Paulo: AHK, 2005.

Universidade de Idaho tem pesquisado o uso de biodiesel de colza produzido localmente como um substituto do óleo diesel. Enquanto a maioria do biodiesel nos Estados Unidos é produzida com metanol, a universidade desenvolveu técnicas para produção com etanol e óleo vegetal, incluindo óleo reutilizado de fritura de batata, para produção dos ésteres etílicos. Os autores relatam que muitos ensaios na universidade têm provado que estes combustíveis apresentam características iguais ou até mesmo superiores às do diesel comum.

Segundo o artigo *Support for Biofuels...* (2006), no ano de 2006 o comitê agrícola da Comunidade Européia adotou uma resolução para o desenvolvimento de plantações para biocombustíveis e outros propósitos não-alimentícios. Este comitê seguirá na direção de criar a segunda geração de biocombustíveis bem como priorizar a criação de novas plantas produtoras de biodiesel além de dar apoio à maior utilização de biodiesel adicionado ao diesel.

O artigo *French Biofuel...* (2006) informa que na França, em 2006 foi anunciado o investimento de 1 bilhão de euros para a construção de 10 usinas para a produção de biocombustíveis, o que auxiliará o país a atingir a meta criada pelo governo de 7,5 % em 2008 e 10 % em 2015 do total de combustíveis consumidos no país.

De acordo com Verhaeven et al. (2005), em 2003 a União Européia adotou uma diretiva para promover os biocombustíveis para transporte. Esta diretiva estabelece objetivos para os membros de cada região da comunidade, iniciando com uma proporção de 2 % de biocombustíveis para transporte em 2005 chegando a 5,75 % em 2010. Os autores informam que os combustíveis com o maior potencial de mercado na Europa são o álcool e o biodiesel, apesar de a longo prazo também haver potencial para combustíveis sintéticos baseados em biomassa. Logo, com a alta participação de veículos diesel na frota européia, o biodiesel se torna a alternativa com melhor propensão ao sucesso. As normas de qualidade do óleo diesel combusível foram adaptadas para permitir a presença de até 5 % de biodiesel no diesel comum, sem que fossem violadas as garantias dos fabricantes de veículos. Informam ainda que a utilização de pequenas quantidades de biodiesel é normalmente tolerada, mas para misturas maiores, apenas alguns fabricantes estão propensos a colaborar, enquanto outros ainda estão relutando.

Nos Estados Unidos, a busca pela utilização do biodiesel pode ser confirmada pelo grande número de pesquisas e ensaios direcionados a este tema.

2.3.2 Histórico no Brasil

O decreto presidencial de 2 de julho de 2003 instituiu o Grupo de Trabalho Interministerial – GTI composto por representantes de diferentes órgãos governamentais, a fim de se estudar a viabilidade de utilização de óleo vegetal – biodiesel como fonte alternativa de energia (BRASIL, 2003a).

Este decreto deu início a inúmeros esforços nas mais diversas áreas, principalmente a agrícola e a automotiva, em busca de análises de desempenho e durabilidade devido à necessidade de se entender as influências de tal combustível nos motores já em uso no país. No entanto, o Brasil não é pioneiro na pesquisa e utilização de biocombustíveis. Segundo Rousseff (2004), pode-se citar os seguintes marcos no desenvolvimento dos biocombustíveis no Brasil e no mundo:

- 1960/70: Registros de estudos sobre produção de biodiesel no mundo,
- 1970/80: Lançamento do pró-ácool,
- 1980: Depositada a 1ª patente de biodiesel no Brasil, pelo Dr. Expedito Parente,
- 1988: Início da produção de biodiesel na Áustria e na França,
- 1997: O congresso Norte-Americano aprova o biodiesel como combustível alternativo,
- 1998: Setores de pesquisa e desenvolvimento no Brasil retomam os projetos para uso do biodiesel,
- 2002: A Alemanha ultrapassa a marca de 1 milhão de toneladas anuais de produção,
- 12/2003: Decreto do Governo Federal institui a Comissão Executiva Interministerial – CEI, e o Grupo Gestor – GG, encarregados da implantação das ações para produção e uso de biodiesel,
- 06/12/2004: Lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel: Marco Regulatório e Metas Físicas.

2.3.3 Benefícios sociais e econômicos para o Brasil

O Núcleo de Assuntos Estratégicos – NAE do Governo Federal, em seu caderno sobre as Diretrizes de Política de Agroenergia, relata que em sua resolução n. 03 de 23 de setembro de 2005, o Conselho Nacional de Política Energética – CNPE antecipou para janeiro de 2006 o B2, cuja obrigatoriedade se restringe ao volume do biodiesel produzido por detentores do selo “Combustível Social”. O mercado potencial do biodiesel é determinado essencialmente pelo mercado do derivado de petróleo, já que o biodiesel é considerado um substituto direto para o óleo diesel. Conforme pode ser observado na Tabela 3, atualmente, a demanda total de óleo diesel no Brasil é de cerca de 40 bilhões de litros anuais, sendo 94 % produzido no próprio país e 6 % importado, com gastos de quase US\$ 1 bilhão por ano com a importação (BRASIL, 2005b). O uso da mistura B2, já autorizada desde dezembro de 2004, e obrigatório a partir de janeiro de 2008, conforme mencionado, representa um volume de, aproximadamente, 840 milhões de litros anuais de biodiesel, e contribui para a redução das importações de diesel. Para a mistura B5, obrigatória a partir de 2013, o MME estima o volume de 2,6 bilhões de litros de biodiesel por ano. Ainda segundo o caderno, a sua produção e uso representam o desenvolvimento de uma fonte energética sustentável sob os aspectos ambiental, econômico e social. O estudo do Governo considera que a dimensão do mercado no Brasil e no mundo assegura uma grande oportunidade para o setor agrícola, assim como contribuirá para o desenvolvimento e a ampliação do parque industrial. Considera ainda que, com vistas à redução dos custos de produção buscar-se-á no segmento industrial o desenvolvimento e a adequação da produção desse combustível renovável em regime contínuo, sem no entanto invalidar as experiências de produção pelo regime de bateladas, inicialmente desenvolvidas. O mesmo estudo afirma que faz-se necessário consolidar a tecnologia da transesterificação etílica, tendo em vista a potencialidade brasileira na produção do etanol a partir da cana-de-açúcar. Afirma ainda que esforços devem ser viabilizados para a adequada identificação das barreiras tecnológicas e comerciais que podem dificultar a colocação do biodiesel nacional nos mercados externos, em especial dos Estados Unidos e da União Européia, onde predomina a transesterificação metílica a partir de um seletivo conjunto de oleaginosas (soja e canola), pois isto é relevante para o aproveitamento do

diferencial positivo do Brasil no segmento agrícola, que dispõe de uma grande diversidade de matérias-primas, com diferentes potencialidades regionais. Engloba tanto culturas já tradicionais, como a soja, o amendoim, o girassol, a mamona e o dendê, quanto alternativas novas, como o pinhão manso, o nabo forrageiro e uma grande variedade de oleaginosas a serem exploradas. O estudo conclui que “o cultivo de matérias-primas e a produção industrial têm grande potencial de geração de empregos, promovendo, dessa forma, a inclusão social”. Para estimular ainda mais esse processo, o Governo Federal instituiu um modelo tributário específico, com a criação do selo “Combustível Social” e a instituição de níveis diferenciados de desoneração tributária em função do aproveitamento combinado da agricultura familiar e do agronegócio na cadeia produtiva. Os decretos nº 5.297, de 06.12.2004, e nº 5.457, de 06.06.2005 instituem o “Selo Combustível Social” e dispõem sobre os coeficientes de redução das alíquotas das contribuições para o PIS/PASEP e COFINS incidentes na comercialização de biodiesel. O decreto nº 5.298, de 06.12.2004 estabelece alíquota zero para o IPI incidente na comercialização de biodiesel

Tabela 3 – Consumo de óleo diesel no Brasil: parcelas produzidas localmente e importadas (em 10⁹ L)

Parcelas	Ano				
	2000	2001	2002	2003	2004
Consumo total	37,16	38,94	38,92	39,24	42,92
Produção local	31,31	32,36	32,54	35,42	39,23
Importação	5,85	6,58	6,38	3,82	3,69

Fonte: Brasil 2005a

A difusão e utilização do biodiesel no Brasil está em sinergia com outra tecnologia genuinamente brasileira, e que tem já aproximadamente 500 anos de experiência: o álcool produzido da cana-de-açúcar. Destaca-se que a produção de biodiesel necessita de grande quantidade de álcool e, para produzir álcool, utiliza-se grande quantidade de diesel, o qual poderá ser substituído por biodiesel. Além disso, o uso desta alternativa energética aponta para importante crescimento do agronegócio brasileiro em decorrência do aumento da área plantada e da geração de empregos (LOPES, 2004).

2.4 Considerações sobre as emissões veiculares e ciclo de vida do biodiesel

Segundo a resolução 001 de 23/01/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, impacto ambiental é toda e qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, segurança e bem-estar da população, atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estáticas e sanitárias do ambiente e a qualidade dos recursos ambientais. Emissões de gases de escapamento têm sido consideradas como uma das mais importantes fontes de impacto ambiental no país e no mundo (BRASIL, 1986).

Segundo Walsh et al. (2005), apesar do progresso e de novas tecnologias, a qualidade do ar com relação à presença de material particulado e ozônio continua ruim. Os autores relatam que durante a década de 70, a região metropolitana de São Paulo iniciou o monitoramento da qualidade do ar e encontrou quantidades altas de dióxido de enxofre, monóxido de carbono e fumaça. E na década de 80, por meio de 23 estações automáticas de coleta e monitoramento, constatou-se que os níveis de material particulado inalável e ozônio eram também altos, frequentemente ultrapassando os limites prescritos em normas. Embora estes limites tenham sido estabelecidos na Organização Mundial de Saúde - OMS, no Brasil, somente mais tarde, eles tomaram forma de lei, por meio do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. A Tabela 4 mostra os limites para emissões de poluentes para veículos a diesel atualmente em vigor. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA então reconheceu que a maioria destes poluentes tinham como fonte primária a frota nacional de veículos. Desde então, progressos têm sido feitos no que se refere a certos problemas de poluição, particularmente provindos do CO e do dióxido de enxofre – SO₂. Os autores afirmam que a crescente utilização de álcool como combustível no final da década de 80 e início de 90 reduziu por exemplo a quantidade de chumbo, antes utilizado na gasolina como aditivo anti-detonante. Segundo os autores, graças ao álcool, em 1991 os níveis de poluentes na região metropolitana de São Paulo ficaram abaixo dos níveis prescritos pela OMS. Mas infelizmente graças ao crescimento da frota, principalmente dos veículos movidos a diesel, a quantidade de material particulado em 2002 voltou a

mostrar níveis alarmantes, até 40 % maiores que o prescrito pela OMS. Além disso, 80 % dos óxidos de nitrogênio são originados nos caminhões e ônibus, que na atmosfera são responsáveis pela formação das partículas secundárias. Finalmente, afirmam que o nível de emissões de motores a diesel está vinculado diretamente à quantidade de enxofre contida no combustível. Para decréscimos de 400 para 2 ppm existe a diminuição de 50 % na emissão de particulados, por exemplo. Como é sabido, o biodiesel não contém enxofre, o que o torna mais “limpo” na geração de SO_2 . Outro ponto importante relacionado ao biodiesel é a redução da emissão de poluentes para a atmosfera, assim como a transformação de óleo residual de frituras em combustível, minimizando o efeito deste sobre o solo e cursos d’água (LOPES, 2004). Embora Ripoli e Ripoli (2004) alertem para o fato de que a atmosfera é um sistema dinâmico, e que não se pode considerar “saldo positivo ou negativo na contribuição para um ambiente”, o protocolo de Kioto considera “saldo de carbono”, e aplica o balanço final para cada combustível. Por ser um combustível de origem vegetal, e composto adicionalmente de etanol (no caso do Brasil), este combustível pode oferecer balanços positivos de carbono para o Brasil.

Segundo o Environmental Protection Agency – EPA, proporcionalmente a seu teor em uma mistura com diesel, o biodiesel promove uma redução das principais emissões associadas ao derivado de petróleo, com a exceção dos NO_x (ESTADOS UNIDOS, 2002). O incremento observado nas emissões deste poluente, conforme Figura 2, não é elevado, se comparado com os benefícios obtidos nos demais poluentes sendo de 2 % a 4 % para B20, com um ponto máximo de 10 % para B100, mas deve ser considerado, porque é um dos principais precursores do ozônio troposférico, atualmente o mais grave problema de qualidade do ar em São Paulo (SÃO PAULO, 2003). Ainda segundo o EPA, há que se considerar a redução das emissões de óxidos de enxofre – SO_x pois como o biodiesel não contém enxofre, as emissões destes óxidos são reduzidas com este combustível.

Tabela 4 – Limites para emissão de poluentes para veículos a diesel

Poluentes	Limites		
	Até 31/12/2005	desde 01/01/2004 ⁽¹⁾	a partir de 01/01/2009
Monóxido de carbono (CO em g/kW.h)	4,0	2,10	1,50
Hidrocarbonetos (HC em g/kW.h)	1,10	0,66	0,46
Óxidos de nitrogênio (NO _x em g/kW.h)	7,00	5,00	3,50
Material particulado ⁽²⁾ (MP em g/kW.h)	0,25	0,10 ou 0,13 ⁽³⁾	0,02
Opacidade ELR (m ⁻¹)	NE	0,80	0,50

Fonte: IBAMA (2006)

Notas:

⁽¹⁾ Em 2004 -> inicia com o atendimento de 100 % dos ônibus urbanos; em 2005 -> continua para 100 % de micro-ônibus e novos lançamentos e 40 % dos outros veículos da produção; a partir de 2006 -> para 100 % dos veículos comercializados. **Alternativamente** em 2004 -> inicia com o atendimento de 60 % dos ônibus urbanos; em 2005 -> continua para 100 % de ônibus urbanos, micro-ônibus e novos lançamentos e 60 % dos outros veículos da produção; a partir de 2006 -> para 100 % dos veículos comercializados.

⁽²⁾ Aplicável somente a veículos movidos a óleo diesel;

⁽³⁾ Aplicável somente a motores de cilindrada unitária inferior a 0,75 dm³ e rotação à potência nominal superior a 3000 m⁻¹.

⁽⁴⁾ (NE) não exigível.

Figura 2 – Variação das emissões de poluentes (HC, CO e NO_x) em função da adição de biodiesel
Fonte: United States Environment Protection Agency (2002)

Um estudo do Governo Federal (BRASIL, 2003a) afirma que para uma avaliação mais precisa dos benefícios ambientais do biodiesel, é necessário levar-se em conta todo seu ciclo fenológico, a produção de sementes, fertilizantes e as tecnologias agrícolas aplicadas em sua produção. Quanto ao efeito estufa, deve-se avaliar a quantidade de gases de efeito estufa emitida em todas as fases desse ciclo e deduzi-la do volume capturado na fotossíntese da biomassa que lhe serve de matéria-prima, embora esta metodologia seja criticada por alguns especialistas. Entretanto, analisando-se apenas as emissões de gases de efeito estufa geradas pelo ciclo de vida do insumo álcool (desconsiderando as emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida da matéria graxa, o estudo concluiu que o uso do biodiesel metílico reduz a emissão de gases causadores do efeito em 95 %. Ainda no mesmo estudo, quanto ao biodiesel etílico, a redução foi de 96,2 %, havendo, portanto, diferença pouco significativa (1,2 %) entre os dois ésteres. As emissões de poluentes locais (controlados e não controlados) do biodiesel variaram, basicamente, em função do tipo de óleo vegetal (soja, mamona, palma, girassol, etc) ou gordura animal usados na produção do biodiesel. Tomando-se por base o biodiesel puro (B100), produzido com óleo de soja, seu uso reduziu as emissões do monóxido de carbono em 48 %, de material particulado em 47 %, do óxido de enxofre em, praticamente, 100 % e dos hidrocarbonetos totais em 67 %.

Há estudos em andamento visando reduzir a formação do NO_x mediante o emprego de catalisadores adequados, ou por meio de procedimentos que consistem em injetar diesel na região do coletor de escapamento dos motores, utilizar-se de recirculação de gases de escapamento ou ainda em atrasar o tempo de injeção no motor.

Janulis (2003) analisou diversos aspectos sobre o balanço energético e ciclo de vida da produção e utilização de etanol e biodiesel. O autor ressalta que para que um combustível seja reconhecido como biocombustível viável, este necessita ser produzido de material renovável e deve apresentar um valor menor de impacto ambiental que seu equivalente fóssil. No estudo, foram calculados o balanço energético e o ciclo de vida do biodiesel de colza para a região da Lituânia, concluindo-se que o fato de um combustível ser elaborado a partir de fontes renováveis não significa que seja positivo

para o balanço de carbono, pois, no caso de colza na Lituânia, a eficiência nas plantações ainda está aquém da encontrada na Comunidade Européia, e o Rapeseed Methil Ester – RME somente será viável se novas tecnologias de produção e extração de óleo forem utilizadas. A produtividade mínima para colza foi determinada em 3 t.ha⁻¹.

Beer et al. (2002) estudaram os diversos combustíveis e sua influência na geração de CO₂ e, conseqüentemente, o efeito estufa. Os autores quantificaram por meio de análise detalhada de todos os processos envolvidos desde a produção até a queima de cada combustível. O cenário foi a Austrália e a frota de veículos pesados. Os combustíveis examinados foram: diesel de baixo enxofre – LSD, diesel de ultra-baixo enxofre – ULS, gás natural comprimido – CNG, gás natural liquefeito – LNG, gás liquefeito de petróleo – LPG, etanol de celulose, biodiesel e óleo reaproveitado. Concluíram que o biodiesel e o etanol apresentaram a menor geração de CO₂ composto (em gramas de gases de efeito estufa por quilômetro rodado). O biodiesel reduziu as emissões de gases do efeito estufa entre 41 e 51 %, enquanto que o álcool apresentou redução entre 49 e 55 %. O estudo confirmou que os combustíveis renováveis, biodiesel e etanol, foram menos agressivos ao ambiente, mesmo quando considerando seu ciclo de vida. Os combustíveis gasosos (LPG, CNG) vieram logo em seguida. O óleo diesel comum somente teve sua geração de CO₂ reduzida quando aditivado com biocombustíveis, mas ainda se apresentou melhor que o LSD e o ULS, devido a energia necessária para produzi-los. Por ter um processo complexo de produção, e que demanda muita energia, o LNG ficou em último.

Kim e Dale (2005) apresentaram um estudo sobre o balanço energético e o ciclo de vida do etanol e do biodiesel, apontando um saldo de carbono positivo, desde que ocorra cuidado excepcional na condução das lavouras. Concluíram que se a biomassa das plantações forem utilizadas para a produção de combustíveis, então estes apresentarão impacto negativo em termos de gases do efeito estufa e com relação ao aquecimento global. No entanto, mesmo que se tenha um impacto positivo em termos de CO₂, há que se preocupar com a acidificação e a eutroficação, principalmente, devido ao nitrogênio e ao fósforo durante o cultivo. Além disso são necessárias alternativas para o pré-tratamento da palha do milho, evitando ácido sulfúrico.

Williamson e Badr (1998) avaliaram a viabilidade da utilização do biodiesel de colza como um substituto para o óleo diesel comum, considerando seus impactos ambientais, bem como os efeitos na utilização em motores e a viabilidade econômica para o Reino Unido. Os autores ressaltaram que o CO₂ e outros gases do efeito estufa podem ser anulados, se considerada a fotossíntese das plantas que dão origem ao biodiesel. Se o biocombustível for produzido, processado e transportado sem entradas de energia adicionais, e considerando que a totalidade da planta seja utilizada para produção de energia, então o biocombustível pode ser considerado neutro, ou seja, não possui efeito algum sobre o nível de CO₂ da atmosfera. Mas no entanto, segundo os autores, os biocombustíveis não são produzidos de maneira sustentável, e as condições de aproveitamento não são ideais, o que resulta em emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa para a atmosfera. O impacto do RME nos gases de efeito estufa pôde ser estimado pelo conhecimento do processo para se cultivar as sementes, produzir / processar o óleo, e pela determinação da relação de energia. Para comparação, esta relação para o óleo diesel mineral é de 1:5, enquanto que do RME é de 1:4,21. Os autores concluíram que se forem utilizados biodiesel e biocombustíveis em vez de óleo diesel mineral, os impactos adversos ao ambiente seriam reduzidos. Alertam que cuidados devem ser tomados ao se avaliar a queima destes combustíveis em motores, a fim de se identificar a necessidade de adaptações dos mesmos. Finalizam com a informação de que no Reino Unido a quantidade de biodiesel que poderia ser produzida seria suficiente apenas para produzir biodiesel menor que B5, ressaltando que para diminuir impactos, este biodiesel poderia ser utilizado em grandes centros urbanos ou ainda em transporte fluvial.

2.5 Conceito de biodiesel, processos de produção e sua aplicação em motores

De acordo com a resolução ANP 42/2004, o biodiesel é definido como combustível composto de alquil ésteres de ácidos graxos oriundos de óleos vegetais ou gorduras animais, designado como B100. São designadas misturas B2, B5, B10 etc. aqueles compostos de óleo diesel mineral adicionados de 2, 5 e 10 % respectivamente de biodiesel (BRASIL 2004a).

O biodiesel pode ser obtido de diferentes oleaginosas (CARAMORI et al., 2006). Souza e Ferrari (2006) elaboraram biodiesel a partir de óleo de girassol, obtendo um biodiesel com parâmetros conforme os limites estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Portanto, desde que haja controle do processo de transesterificação, as características do biodiesel são muito similares, quando não idênticas ao óleo diesel de origem fóssil.

A maioria dos tipos de biodiesel é produzida por meio de um processo químico denominado transesterificação. Este processo consiste em misturar o óleo com um álcool, tipicamente metanol ou etanol e, na presença de um catalisador, tal como hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio. Esta reação produz ésteres metílicos (se for utilizado metanol) ou ésteres etílicos (se for utilizado etanol) – que compõem o biodiesel – e glicerina (MURPHY, 1995).

Ainda há diversos desafios técnicos a serem avaliados, tais como a rápida oxidação, contida com aditivos, a viscosidade dependente da matéria-prima e a baixa estabilidade (PIMENTA, 2005).

A confiabilidade mecânica dos motores é a maior preocupação, pois embora a lubricidade do biodiesel seja um benefício para bombas e peças do motor, a incerteza está na formação de depósitos que podem se acumular nos bicos injetores (SEM, 2004b) e anéis de segmentos (SEM 2004a). Este fato foi observado em diversos estudos, e mostrou-se dependente do tipo do motor, origem do biodiesel e método de produção. A diluição do óleo do cárter, pelo combustível, também é uma preocupação e pode acabar resultando em desgaste prematuro ou falhas do motor. Estes fatores requerem a quantificação da diluição (mistura) para que os efeitos sejam minimizados (SCHWARTZ et al., 2005).

De acordo com Canakci e Van Gerpen (2003), muitos estudos têm mostrado que as propriedades do biodiesel são muito próximas do óleo diesel mineral. Os autores afirmam que o biodiesel pode ser utilizado em motores diesel com poucas ou nenhuma modificação. Informam, ainda, que o biodiesel possui um número de cetano maior do que o diesel de petróleo, não possui aromáticos e contém de 10 % a 11 % de oxigênio.

No entanto, Saad et al. (2006) alertam para a qualidade de diferentes tipos de biodiesel provenientes de diferentes matérias-primas. Certas propriedades inerentes à

matéria-prima podem ser transferidas para o combustível produzido, podendo ser inadequadas para o funcionamento do motor.

Dorado et al. (2003), afirmam que os combustíveis alternativos para motores diesel têm se tornado importantes devido a preocupações ambientais e diversos aspectos sócio-econômicos. Informam que óleos vegetais e gorduras animais representam uma alternativa promissora para o óleo diesel convencional, mas advertem que diversas propriedades químicas destes óleos e gorduras, entre eles a alta viscosidade e o alto peso molecular, pioram a atomização do combustível e baixa volatilidade resultando em combustão incompleta e severos depósitos no motor, entupimento dos bicos injetores e problemas em anéis de segmento. Concluem que a pesquisa tem provado que uma das maneiras de melhorar as propriedades dos óleos e gorduras é a sua transesterificação. A Figura 3 apresenta um diagrama esquemático simplificado da produção de biodiesel por meio deste processo.

A visão geral da Engine Manufacturers Association – EMA descrita como “voice of the engine manufacturing industry on domestic and international public policy, regulatory, and technical issues that impact manufacturers of engines”² (EMA, 2003) trad. de: Juliato, é que as misturas de biodiesel menores que 5 % são geralmente aceitas, mas misturas maiores necessitam ser avaliadas.

² Voz da indústria de manufatura de motores em assuntos de regulamentação e técnicos públicos de política local ou internacional.

Figura 3 – Processo de obtenção de biodiesel a partir da transesterificação
 Fonte: Brasil (2005b)

Segundo Strong (2004), a Comunidade Européia tem utilizado o biodiesel de forma mais consistente que em outros países. Os países da Europa normalmente utilizam RME, originado da colza, enquanto que, nos Estados Unidos, a predominância é do éster metílico de soja.

Segundo He et al. (2005), a demanda de biodiesel e produção nos Estados Unidos tem crescido de forma acentuada nos anos recentes, pois tecnologias diferentes de reação para produção de biodiesel têm sido desenvolvidas e aplicadas, das operações em lote mais tradicionais, praticadas por pequenos produtores, até operações contínuas ou semi-contínuas de estágio simples ou múltiplo, praticadas por grandes produtores. Os autores afirmam que em geral, a transesterificação contínua é a preferida ao processo por lotes, pois, fornece qualidade mais consistente do produto e menor custo por unidade produzida.

Segundo Teixeira (2005b), a reação de transesterificação foi exaustivamente estudada pela França e Bélgica durante a 2ª Guerra Mundial. Devido à escassez de combustíveis e ao fato de esses países controlarem um grande número de colônias, distribuídas em vários continentes, estimulou-se a pesquisa acadêmica e aplicada, como pode ser comprovado a partir dos processos registrados nas décadas de 40 e 50. O autor define a transesterificação como a reação de um triglicerídeo (óleo ou gordura), com um álcool (etanol, etanol, propanol etc.), catalisada por ácidos, bases ou enzimas no caso de catálise homogênea; ou menos usual por meio de catálise heterogênea a partir de catalisadores especiais em estado sólido. A seqüência de reações é demonstrada na Figura 4 onde podem ser verificadas as razões molares dos reagentes e produtos.

Reação Completa:

Reação passo a passo :

Figura 4 –Reações químicas relativas à transesterificação
Fonte: Freedman et al. (1986). Apud Teixeira 2005 b

Notas: R'CO₂R – Éster metílico ou etílico
ROH – Álcool utilizado

Haas et al. (2006) desenvolveram um modelo computacional para estimar investimentos de capital e custos operacionais de plantas produtoras de biodiesel. O modelo foi desenvolvido utilizando softwares de simulação e considerou óleo de soja como matéria-prima. Concluíram que o maior montante de investimento foi o referente

a tanques de armazenamento. Para custos operacionais, o maior gasto foi a própria matéria-prima, responsável por 88 % do custo operacional. Descobriram que o custo de produção do biodiesel variou inversa e linearmente em relação às variações no mercado do glicerol, o qual é vendido para amortização dos custos.

2.6 Propriedades do biodiesel

A ANP, por meio da resolução ANP nº 42, de 24.11.2004 criou o Regulamento Técnico Nº 4/2004, que estabelece a especificação para o biodiesel B-100 (Tabela 5). Com esta especificação, a ANP procurou estabelecer um padrão mínimo de qualidade para o combustível, independente das fontes oleaginosas que o originarem (BRASIL, 2004a).

Tabela 5 – Especificação do biodiesel B100

(continua)

Características	Unidades	Limites	Métodos		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1)	-	-	-
Massa específica a 20°C	Kg/m ³	Anotar (2)	7148, 14065	1298, 4052	-
Viscosidade Cinemática a 40°C,	Mm ² .s ⁻¹	Anotar (3)	10441	445	EN ISO 3104
Água e sedimentos, máximo (4)	% volume	0,050	-	2709	-
Contaminação Total (6)	mg.kg ⁻¹	Anotar	-	-	EN 12662
Ponto de fulgor, mínimo	°C	100,0	14598-	93-	EN ISO3679
Teor de éster (6)	% massa	Anotar	-	-	EN 14103
Destilação; 90 % volume recuperados, máximo	°C	360 (5)	-	1160	-
Resíduo de carbono de 100 % destilados, máximo	% massa	0,10	-	4530, 189	EN ISO 10370
Cinzas sulfatadas, máximo	% massa	0,020	9842	874	ISO 3987
Enxofre total (6)	% massa	Anotar	-	4294 5453	EN ISO 14596
Sódio + Potássio, máximo	mg.kg ⁻¹	10	-	-	EN 14108 EN 14109
Cálcio + Magnésio (6)	mg.kg ⁻¹	Anotar	-	-	EN 14538
Fósforo (6)	mg.kg ⁻¹	Anotar	-	4951	EN 14107
Corrosividade ao cobre, 3h a 50° C, máximo	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número de Cetano (6)	-	Anotar	-	613	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máximo	°C	(7)	14747	6371	-
Índice de acidez, máximo	mg KOH.g ⁻¹	0,80	14448-	664-	EN 14104 (8)
Glicerina livre, máximo	% massa	0,02	-	6584 (8) (9)	EN 14105 (8) (9) EN 14106 (8) (9)
Glicerina total, máximo	% massa	0,38	-	6584 (8) (9)	EN 14105 (8) (9)

Tabela 5 – Especificação do biodiesel B100

(conclusão)

Características	Unidades	Limites	Métodos		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Monoglicerídeos (6).	% massa	Anotar	-	6584 (8) (9)	EN 14105 (8) (9)
Diglicerídeos (6)	% massa	Anotar	-	6584 (8) (9)	EN 14105 (8) (9)
Triglicerídeos (6)	% massa	Anotar	-	6584 (8) (9)	EN 14105 (8) (9)
Metanol ou Etanol, máximo	% massa	0,5	-	-	EN 14110 (8)
Índice de Iodo (6)		Anotar	-	-	EN 14111 (8)
Estabilidade à oxidação a 110°C, mínimo	H	6	-	-	EN 14112 (8)

Fonte: Adaptado de BRASIL (2006)

Notas:

- (1) LII – Límpido e isento de impurezas.
- (2) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para massa específica a 20°C constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.
- (3) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para viscosidade a 40°C constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.
- (4) O método EN ISO12937 poderá ser utilizado para quantificar a água não dispensando a análise e registro do valor obtido para água e sedimentos pelo método da American Society for Testing and Materials Standards – ASTM D 2709 no Certificado da Qualidade.
- (5) Temperatura equivalente na pressão atmosférica.
- (6) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados pelo produtor de biodiesel à ANP, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de matéria-prima, o produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas.
- (7) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para ponto de entupimento de filtro a frio constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.
- (8) Os métodos referenciados demandam validação para as oleaginosas nacionais e rota de produção etílica.
- (9) Não aplicáveis para as análises mono-, di-, triglicerídeos, glicerina livre e glicerina total de palmiste e coco. No caso de biodiesel oriundo de mamona deverão ser utilizados, enquanto não padronizada norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT para esta determinação, os métodos: do Centro de Pesquisas da Petrobrás – CENPES constantes do ANEXO B para glicerina livre e total, mono e diglicerídeos, triglicerídeos.

Já a resolução ANP nº 15, de 17.7.2006, estabelece as especificações apresentadas na Tabela 6, de óleo diesel e mistura óleo diesel/biodiesel – B2 de uso rodoviário, para comercialização em todo o território nacional (BRASIL, 2006).

Tabela 6 – Especificação de óleo diesel e mistura óleo diesel/biodiesel – B2 de uso rodoviário

Características (1)	Unidades	Limites		Métodos	
		Tipos		ABNT	ASTM
		Metropolitano	Interior		
APARÊNCIA					
Aspecto		Límpido isento de impurezas		Visual (2)	
Cor		-	Vermelho	Visual (2)	
Cor ASTM, máximo		3,0	3,0 (3)	NBR 14483	D 1500
COMPOSIÇÃO					
Teor de Biodiesel, (4)	% vol.	2,0	2,0	Espectrometria de Infra-vermelho	
Enxofre Total, máximo	mg.kg ⁻¹	500	2.000	NBR14875	D 1552
				NBR14533	D 2622
					D 4294
					D 5453
VOLATILIDADE					
Destilação	°C			NBR 9619	D 86
10 % vol., recuperados		Anotar			
50 % vol., recuperados, máximo		245,0 a 310,0			
85 % vol., recuperados, máximo		360,0	370,0		
90 % vol., recuperados		Anotar			
Massa específica a 20°C	kg.m ³⁻¹	820 a 865	820 a 880	NBR 7148, NBR 14065	D 1298 D 4052
Ponto de fulgor, mínimo	°C	38,0		NBR 7974 NBR 14598	D 56 D 93 D 3828
FLUIDEZ					
Viscosidade a 40°C, máximo	(mm ² .s ⁻¹) cSt	2,0 a 5,0		NBR 10441	D 445
Ponto de entupimento de filtro a frio	°C	(5)		NBR 14747	D 6371
COMBUSTÃO					
Número de Cetano, mínimo (6)	-	42		-	D 613
Resíduo de carbono Ramsbottom no resíduo dos 10 % finais da destilação, máximo	% massa	0,25		NBR 14318	D 524
Cinzas, máximo	% massa	0,010		NBR 9842	D 482
CORROSÃO					
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máximo	-	1		NBR 14359	D 130
CONTAMINANTES					
Água e Sedimentos, máximo	% volume	0,05		NBR 14647	D 1796
LUBRICIDADE					
Lubricidade, máximo (7)	mícron	460	-		D 6079

Fonte: Brasil (2006)

Notas:

(1) Poderão ser incluídas nesta especificação outras características, com seus respectivos limites, para óleo diesel obtido de processo distinto de refino e processamento de gás natural ou a partir de matéria prima que não o petróleo.

(2) A visualização será realizada em proveta de vidro de 1L.

- (3) Limite requerido antes da adição do corante. O corante vermelho, segundo especificação constante da Tabela III deste Regulamento Técnico, deverá ser adicionado no teor de 20 mg/L pelas Refinarias, Centrais de Matérias Primas Petroquímicas e Importadores.
- (4) Adição não obrigatória. Com o objetivo de formar base de dados, os agentes autorizados que procederem a mistura óleo diesel/biodiesel – B2 e dispuserem de espectrômetro de infravermelho deverão fazer a análise e anotar o resultado.
- (5) Limites conforme Tabela II.
- (6) Alternativamente ao ensaio de Número de Cetano fica permitida a determinação do Índice de Cetano calculado pelo método NBR 14759 (ASTM D 4737), cuja especificação fica estabelecida no valor mínimo de 45. Em caso de desacordo de resultados prevalecerá o valor do Número de Cetano.
- (7) Até 01.04.2007, data em que deverão estar sanadas as atuais limitações laboratoriais dos Produtores, apenas os óleos diesel que apresentarem teores de enxofre inferiores a 250 mg/kg necessitarão ter suas lubricidades determinadas, e informadas à ANP, sem, contudo, comprometer a comercialização dos produtos.

Dadas as especificações, cabe ressaltar as seguintes características, necessárias à compreensão deste trabalho:

Número de cetano

O número de cetano é um número adimensional que atribui qualidade de ignição ao combustível do ciclo diesel. Seus valores podem estar compreendidos entre 15 e 100, este último como sendo correspondente à ignição do hexadecano ($C_{16}H_{34}$), popularmente. Normalmente o número médio de cetano para o óleo diesel de origem mineral é de 40 e para o biodiesel, 60, o que lhe confere maior qualidade de ignição (KNOTHE, 2005).

Poder calorífico

Segundo o Bosch Automotive Handbook, o poder calorífico é o índice de energia contida nos combustíveis. Os autores ressaltam que combustíveis oxigenados tais como álcool, éter ou ainda ésteres de ácidos graxos possuem poderes caloríficos menores que aqueles encontrados em hidrocarbonetos puros, devido ao oxigênio contido nestes combustíveis não auxiliar na combustão. A potência obtida com combustíveis oxigenados só pode ser igualada àquela com combustíveis livres de oxigênio às custas de maior consumo de combustível (BOSCH, 2004). As misturas B20 podem apresentar até 1,73% de queda em relação ao diesel comum, enquanto que no biodiesel puro (B-100) este valor pode decair em até 8,65% (NBB, 2006).

Viscosidade

A viscosidade do combustível é ponto determinante no comportamento do motor. Uma baixa viscosidade pode acarretar problemas de perdas por vazamentos na bomba injetora resultando em perda de desempenho. Ao contrário, caso a viscosidade seja alta, pode haver aumentos nos picos de pressão de injeção, e conseqüentemente alteração no padrão dos jatos de combustível dentro do motor. A viscosidade é a medida da resistência interna ao escoamento de um líquido. Em relação ao óleo diesel mineral, o biodiesel pode apresentar níveis de viscosidade maiores, o que necessitaria alteração na regulação dos sistemas de alimentação do motor (BOSCH, 2004).

Ponto de névoa

Trata-se da temperatura, expressa em número inteiro, na qual se inicia a separação das parafinas, o que pode ser observado pelo aparecimento de “névoa” ou turbidez no líquido durante resfriamento. O óleo diesel possui ponto de névoa de aproximadamente 1°C enquanto que o biodiesel apresenta valores entre -6 e 8°C (BOSCH, 2004).

Estabilidade

A estabilidade do biodiesel está ligada à oxidação quando exposto ao ar. Os fatores que influenciam na oxidação são a presença de ar, luz, traços de metais e temperatura elevada. Em ensaios de estocagem de 2 anos, observou-se aumento de viscosidade e redução no poder calorífico. Além da degradação oxidativa, o biodiesel também é potencialmente sujeito à formação de compostos poliméricos insolúveis e à degradação hidrolítica causada pela água (PRANKL, 2005).

Enxofre

É muito importante ressaltar este fator, que apesar de não ser uma propriedade dos combustíveis, está intimamente ligado às emissões veiculares. O enxofre é resultado da má qualidade do petróleo, e dos componentes adicionados na refinaria durante o processo de craqueamento. A quantidade de enxofre pode ser reduzida com tratamentos específicos com hidrogênio durante a fase de produção. No Brasil, o

enxofre nos combustíveis tem sido preocupação constante do IBAMA, e a Petrobrás alega dificuldades técnicas para atender aos limites estabelecidos. Por ser de origem vegetal, o biodiesel não contém enxofre, e se adicionado ao óleo diesel mineral reduz, por conseguinte, a percentagem de enxofre na mistura. Isto acarretará em menor emissão de poluentes, principalmente, particulados e SO_2 , possibilitando a utilização de filtros de particulados e catalisadores (BOSCH, 2004).

Massa específica

Há uma correspondência constante entre o poder calorífico dos combustíveis e sua densidade. Densidades maiores apresentam poderes caloríficos maiores. Assumindo-se ajustes constantes da bomba injetora de combustível (e portanto, volume constante de injeção), o uso de combustíveis com densidades diferentes será acompanhado por variações na mistura e flutuações no poder calorífico. Alta densidade provoca aumento de material particulado enquanto densidades menores podem causar perda de desempenho (BOSCH, 2004).

Ponto de fulgor

O ponto de fulgor é a temperatura na qual o combustível emite uma quantidade de vapor suficiente para permitir uma ignição por meio de uma centelha neste vapor sobre o combustível que está evaporando (PRANKL, 1999).

Lubricidade

Todo o equipamento relacionado à injeção de diesel depende diretamente da lubricidade do combustível. As propriedades de lubrificação do diesel são importantes principalmente para bombas rotativas. Neste tipo de bomba, as peças móveis são lubrificadas pelo próprio combustível e não pelo óleo do motor. Outros sistemas de injeção – que incluem injetores, bombas e bombas em linha, são parcialmente lubrificadas pelo óleo diesel. A lubricidade do combustível é uma indicação da quantidade de desgaste que ocorre entre duas partes metálicas cobertas pelo combustível em contato uma com a outra. Combustíveis com baixa lubricidade podem

causar desgaste prematuro das peças relacionadas ao sistema de injeção de combustível (PRANKL, 1999).

Cinzas sulfatadas

O conteúdo de cinzas sulfatadas de um combustível inclui todos os materiais não combustíveis presentes. As cinzas são determinadas pela queima completa de uma amostra de óleo e consistem de todos os compostos metálicos existentes no óleo - aditivos e desgaste tratados com ácido sulfúrico e convertidos à sulfatos, expressos em percentagem (PRANKL, 1999).

Índice de acidez

O número de acidez total, permite a avaliação da presença de contaminantes ácidos no óleo. A necessidade de se distinguir entre ácidos orgânicos e inorgânicos exigiu novos métodos para a caracterização do biodiesel (PRANKL, 1999).

Índice de iodo

A utilização de ésteres etílicos ou metílicos em motores diesel pode levar à diluição do óleo lubrificante do motor pelo combustível. O índice de iodo está diretamente vinculado ao grau de insaturação do óleo, ou seja, à presença de cadeias duplas, em óleos vegetais e gorduras. Uma quantidade grande de ácidos insaturados nos ésteres (expressados por um alto índice de iodo) aumenta o perigo de polimerização do óleo lubrificante do motor (PRANKL, 1999).

Dantas (2006) testou e caracterizou biodiesel de óleo de algodão, utilizando as rotas metílica e etílica e concluiu que o biodiesel, tanto nas rotas metílica, quanto etílica, apresentou características combustíveis compatíveis com a Resolução 42 da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – ANP. As misturas de biodiesel apresentaram uma diminuição no teor de enxofre e do aumento do índice de cetano, conforme o aumento na percentagem de biodiesel na mistura.

2.7 Óleo vegetal bruto não é biodiesel

Óleo vegetal bruto não pode ser considerado biodiesel. O artigo técnico Abastecimento com óleo vegetal bruto... (2006) apresentou resultados de testes feitos por Correa e Maziero, com trator em dinamômetro, em funcionamento com óleo de girassol puro. O objetivo inicial do teste era rodar 200 horas para avaliação de durabilidade, mas o ensaio teve que ser interrompido com cerca de 60 horas, pois a temperatura do óleo do cárter era de 120°C e podia se ouvir batidas no motor. Já no início do ensaio, após poucas horas de uso, havia queda de 7,8 % na potência e aumento de 15,5 % no consumo de combustível. O motor foi então encaminhado ao fabricante, que constatou acúmulo de carvão no bico injetor e na cabeça do êmbolo, obstrução do pescador de óleo do cárter, desgaste prematuro do retentor e formação de depósito na bomba injetora. Este ensaio demonstrou que o óleo vegetal deve ser preparado adequadamente para ser utilizado no motor. A Figura 5 apresenta duas peças submetidas a utilização de óleo vegetal bruto por 200 horas, em um trator Valtra. Os depósitos de material sólido podem ser observados no mancal (6a) e bico injetor (6b).

Figura 5 – Peças de um motor submetido à utilização de óleo vegetal bruto. A – mancal do virabrequim.
B – bico injetor

Fonte: Valtra (2005)

2.8 Alguns resultados de ensaios

Segundo o artigo Biocombustível exige pesquisa... (2005), vários estudos na Universidade de Campinas – Unicamp e USP de Jaboticabal e Ribeirão Preto mostram que o biodiesel pode ser utilizado em motores sem prejuízo para o desempenho, apenas com aumento das emissões de óxidos de nitrogênio.

Lopes (2006) apresentou resultados de avaliação de desempenho de um trator com 14 tipos de biodiesel, sendo eles os originados de gorduras residuais, amendoim, girassol e soja. Foram abordados muitos aspectos, mas com relação ao desempenho, concluiu-se que a proporção e o tipo de biodiesel não comprometeram o desempenho do trator. Verificou-se também que, quanto a rotação do motor (em trabalho de campo), considerando-se todos os tipos de biodiesel, a variação média foi de 72 rpm (3,8 %), sendo a menor variação de 2,1 % e a maior de 5,5 %. Como as variações foram mais evidentes em misturas de maior proporção de biodiesel, o autor atribuiu a queda de rotação à influência do menor poder calorífico do biodiesel. No entanto, não houve queda de desempenho do trator para nenhum dos combustíveis utilizados. Os valores de opacidade foram reduzidos com a adição de biodiesel em até 49 % para B100.

Lopes (2005) mediu o consumo específico de um trator em condições de campo comparando biodiesel destilado e filtrado, não encontrando influência destes combustíveis em consumo específico. No mesmo ensaio, o autor concluiu que com B50 o consumo aumentou 7 % e com B100 18 % em relação ao diesel comum.

Tolmasquim (2003), mostrou que o biodiesel, além de ser um combustível renovável e biodegradável, o seu uso proporciona reduções de emissões de enxofre, de anidro carbônico, hidrocarbonetos não queimados e de material particulado.

Crnkovic et al. (2005) concluíram por meio de análise termogravimétrica que, ao se utilizar biodiesel e mistura B10 para manter a mesma característica estequiométrica do diesel, quando na utilização de biodiesel, deve-se empregar pressão de injeção mais alta para garantir que o combustível seja altamente vaporizado, proporcionando melhor aproveitamento, levando a menor geração de emissões.

Rabelo (2001) testou um motor diesel marca Lombardini, monocilíndrico, utilizando diferentes misturas de óleo vegetal, biodiesel e álcool etílico hidratado – AEH e álcool etílico anidro – AEA. As seguintes misturas foram testadas:

Diesel metropolitano

B20 + Diesel (20 % biodiesel de óleo reutilizado de fritura e 80 % diesel metropolitano)

B50 + Diesel (50 % biodiesel de óleo reutilizado de fritura e 50 % diesel metropolitano)

B90 + AEH (90 % biodiesel de óleo reutilizado de fritura e 10 % álcool etílico hidratado)

B80 + AEH (80 % biodiesel de óleo reutilizado de fritura e 20 % álcool etílico hidratado)

B80 + AEA (80 % biodiesel de óleo reutilizado de fritura e 20 % álcool etílico anidro)

B100 (100% biodiesel de óleo reutilizado de fritura)

Os resultados mostraram que as misturas de biodiesel ora apresentavam maior potência, maior torque e praticamente mesmo consumo de combustível que o diesel metropolitano, principalmente para valores acima de 1900 rpm, ora apresentavam desempenho menor (a 1400 rpm). O autor ressalta duas observações e sugere trabalhos posteriores. A primeira diz respeito ao fato da mistura B50 + Diesel apresentar melhor desempenho do que o B100. A segunda refere-se à queda absoluta de torque e potência, que se verifica quando se adiciona etanol ao B100. No caso do combustível ensaiado B90 + AEH, foi possível observar maior potência, relativamente ao diesel, para valores abaixo de 2.000 rpm.

Peterson et al. (1995) notaram um acréscimo de 7 % no consumo específico com o biodiesel em comparação ao D2, enquanto que o B100 apresentou um acréscimo de 5 % no consumo específico para rotações entre 2.000 e 2.400 rpm. O B50 + Diesel, embora tenha fornecido a maior potência, apresentou um consumo específico praticamente igual ao diesel para rotações entre 2.000 a 2.400 rpm.

Korus e Jaiduk (1985) compararam três tipos de biodiesel misturados a 50 % com o diesel comercial, biodiesel de canola de inverno, biodiesel de girassol com 74 % de ácido oleico e biodiesel de girassol com 84 % de ácido linoleico. Não detectaram uma diferença significativa na potência desenvolvida. O consumo específico de combustível foi de até 8 % a mais para os combustíveis alternativos.

Ajav et al. (1999) obtiveram um acréscimo de 9 % de consumo específico do combustível com 20 % de álcool etílico hidratado para rotações mais elevadas.

McCormic et al. (2005) testaram misturas de biodiesel de diferentes origens em dois motores diesel. Biodiesel produzido de óleo de soja, óleo de canola, gordura animal e sebo foram testados em dois motores diesel. Os diversos tipos de biodiesel

foram testados puros ou a 20 % em volume com óleo diesel de petróleo. Os motores foram um Cummins ISB 2002 e um DDC série 60 2003. Ambos atendiam aos limites de emissões para 2004 dos Estados Unidos. Os testes foram executados conforme metodologia do EPA. Todos os tipos de biodiesel apresentaram redução do material particulado, em média, de 25 % e aumento do NO_x em 3 %. O aditivo para aumento de número de cetano 2-etil hexil nitrato não apresentou efeito nas emissões de No_x para o B20.

Morris et al. (2003) modelaram a queima do biodiesel e, analisando os dados resultantes, determinaram que o efeito médio que o biodiesel (B100) e uma mistura de 20 % / 80 % biodiesel / diesel (B20) teria nas emissões de veículos a diesel. A Tabela 7 resume as alterações estimadas pelo modelo em percentagem de massa versus as emissões produzidas por um motor a diesel, utilizado na modelagem de qualidade de ar. Na análise dos resultados concluíram que os materiais particulados do B100 e B20 tiveram respectivamente 20 % e 5 % menor toxidez do que aquelas do diesel comum.

Tabela 7 – Alterações médias em emissões devido ao uso do biodiesel em relação ao combustível comum

Misturas	Alterações comparando-se ao diesel comum (%)				
	NO _x	MP	CO	VOC	SO ₂
B20	+2,4	-8,9	-13,1	-17,9	-20
B100	+13,2	-55,3	-42,7	-63,2	-100

Fonte: Morris et al. (2003)

Nota: VOC – Componentes orgânicos voláteis

Foi executado na Universidade de Idaho um ensaio de durabilidade de motores Yanmar 15 kW, com óleo de soja reutilizado de fritura (B100 etílico de soja). Cada motor foi operado por 200 horas utilizando-se B100, B80, B20 e diesel padrão. Os motores foram caracterizados antes e depois das 200 horas, durante as quais trabalharam a 100 % da carga. A Tabela 8 apresenta os resultados de deterioração para torque (Nm) em percentagem, bem como o consumo total do motor, em litros para as 200 horas. O maior consumo de combustível foi atribuído ao menor poder calorífico

do biodiesel, enquanto que o aumento do torque não foi entendido como significativo, já que o torque permaneceu constante durante as 200 horas (ESTADOS UNIDOS, 1996).

Tabela 8 – Resultados de testes de durabilidade de motores com misturas de biodiesel

	Combustível utilizado			
	B100 soja	B80	B20	Diesel
Consumo (l)	747	651	681	630
Degradação do Torque (%)	2,0	0,7	1,0	3,0

Fonte: (Estados Unidos, 1996)

Estudos do Western Transportation Institute no estado de Montana, EUA, indicaram que a perda de potência encontrada quando se utiliza biodiesel pode ser influenciada por diversos fatores, tal como a tipo de motor, o fabricante / marca do motor, manutenção do veículo de uma forma geral, tipo do diesel utilizado como base e as condições dos filtros. Afirmam que os usuários de B20 podem ou não sentir esta perda de potência ao dirigir, enquanto que usuários de B100 podem com certeza sentir esta perda. Ziejewski et al. (1984), Niehaus et al. (1986), Schumacher et al. (1992), Reece e Peterson (1993), e Marshall (1993) observaram perdas de potência de 1 a 7 % em seus ensaios (MONTANA, 2004).

Com poucas modificações, pode-se compensar a perda de potência em um motor funcionando com biodiesel. Feldman e Peterson (1992), durante um teste de 200 horas EMA, em um motor de 3 cilindros de injeção direta, observaram aumento de potência ao se avançar 2 graus no tempo de injeção.

Duran et al. (2005) estudaram os efeitos da queima do biodiesel na produção de material particulado por meio de modelos matemáticos e redes neurais. Para a comparação, foram utilizados diesel comum, dois biocombustíveis de diferentes origens e diversas misturas de biodiesel. O motor simulado foi um diesel de injeção direta e o ciclo utilizado foi o 5 pontos europeu. Analisando a massa de dados gerada pelo modelo, concluíram, entre diversos pontos, que à medida em que o modelo foi alimentado com variáveis significando maiores taxas de biocombustíveis, houve melhora nas emissões de particulados insolúveis.

Schumacher (1995) testou motores Navistar com misturas B20 e encontrou alterações de potência variando de 13 % de ganho a 3 % de perda. A maioria dos motores apresentou perda de potência se comparados com diesel comum.

Senatore e Cardone (2005) avaliaram um motor diesel queimando óleo diesel, biodiesel de colza e de óleo reaproveitado de frituras. Segundo os autores, o torque para os 3 combustíveis foi praticamente coincidente a 2000 rpm e 3000 rpm. No entanto, os dois biocombustíveis apresentaram uma pequena queda em relação ao diesel comum. Com relação ao consumo específico de combustível, uma piora pôde ser observada na Figura 6, quando se utilizou qualquer um dos biocombustíveis testados em toda faixa de operação. Explicam que esta queda de desempenho e aumento de consumo podem ser atribuídas ao menor poder calorífico dos biocombustíveis, pois, a despeito de suas origens diferentes, estes possuem características físico-químicas similares.

Figura 6 – Consumo específico de combustível (BSFC) em função da relação ar-combustível (λ) para a condição de 2000 rpm
 Fonte: Senatore e Cardone (2005)

Figura 7 – Concentração de NO_x em função da relação ar- combustível para a condição de 2000 rpm
 Fonte: Senatore e Cardone (2005)

Para a mesma condição de 2000 rpm o NO_x mostrou-se maior para os dois combustíveis derivados de óleo vegetal, fato explicado pelos autores como decorrente de características de viscosidade e densidade dos biocombustíveis, o que altera o tempo de injeção (Figura 7).

Xiaoming et al. (2005) testaram diversas misturas de biodiesel simultaneamente em 3 motores. As misturas foram B100, B50, B20, diesel e diesel com baixo teor de enxofre. O objetivo foi entender desempenho e emissões dos motores testados. Os resultados indicaram que HC, CO, particulados e fumaça foram melhores com misturas de biodiesel. No entanto, houve uma sensível piora nas emissões de NO_x , além de uma pequena queda de potência com as misturas. As seguintes conclusões relacionadas a desempenho e emissões foram apresentadas:

- Quando abastecido com B20 e B50, o consumo de combustível aumentou e a potência diminuiu, aproximadamente em 8 % e 3 %, respectivamente.

- Emissões de CO caíram 11 % para B50 e 8 % para B20. Para particulados a queda foi de 12 % com B50 e 13 % com B20. NO_x teve comportamento inverso, aumentando 27,4 % com B50 e 6,8 % com B20. As emissões de HC não apresentaram tendência, sendo menores 29,4 % com B50 e maiores em 7,1 % com B20.

- Níveis de fumaça foram reduzidos em 35 a 65 %.

Verhaeven et al. (2005) apresentam ensaios de diversos veículos em condições reais de tráfego, sendo veículos de passageiros e caminhões de coleta de lixo. Dois tipos de biodiesel foram utilizados: RME e used vegetable oil methyl ester - UVOME. Além da utilização diária dos veículos, medições foram executadas com equipamentos embarcados enquanto os veículos trafegavam em situações normais de tráfego. A maioria dos testes foram executados com B100, mas com UVOME, várias misturas foram utilizadas, variando de B20 a B100. A Tabela 9 apresenta uma visão geral qualitativa dos resultados dos testes:

Tabela 9 – Visão geral qualitativa dos resultados de testes de VERHAEVEN et al. (2005)

Combustíveis	Veículos de passageiros		Caminhão de coleta de lixo	
	VW Golf III CL 1.9 D		DAF 2300 FAG	
	UVOME 20 - 30	UVOME 100	UVOME 20 - 30	UVOME 100
Consumo de combustível	+	-	0	0
Consumo de energia	+	+	+	+
Emissão de CO	++	++	++	+++
Emissão de NO _x	0	--	0	0
Emissão de HC	+++	++	-	+++
Emissão de CO ₂	+	0	+	+
Particulados	++	+	Na	Na
Opacidade	Na	Na	0	++++
Potência	0	-	0	0

Nota: 0 efeito neutro; + efeito positivo (1 + para cada 10 % de melhora);- efeito negativo (1 – para cada 10 % de deterioração); Na não aplicável.

Os resultados apontaram, especialmente, para os veículos de passageiros, que uma mistura de 20 a 30 % de biodiesel forneceu excelentes resultados em emissões e consumo de energia. Os autores informam que é preferível utilizar estas misturas do

que biodiesel puro, já que o biodiesel puro não aumentou consistentemente as vantagens em emissões, embora tenha apresentado decaimento considerável em consumo. Além do mais, as misturas B20 a B30 não apresentaram as desvantagens em perda de potência, emissões de NO_x e consumo de combustível que o B100 apresentou. Alguns efeitos, no entanto, pareceram depender da tecnologia do motor utilizado. Para os motores pesados ficou clara a maior vantagem de se utilizar o biodiesel puro. As seguintes vantagens de misturas “pequenas” como B20 foram ainda consideradas:

Comparadas com B100:

- não houve necessidade de ajustes no motor,
- não apresentaram efeitos negativos em consumo de combustível e potência
- uma fatia maior de mercado pode ser alcançada, abrangendo um número maior de veículos beneficiados,
- o potencial para redução de emissões no mercado total de combustíveis é maior,
- o efeito no preço final do combustível é reduzido.

Comparadas com óleo diesel:

- há melhor lubrificação do sistema de injeção de combustível, resultando em desgaste menor,
- efeito positivo em emissões de poluentes,
- aumento da eficiência energética,
- melhora da biodegradabilidade do combustível.

Trapel (2005), procurou caracterizar o funcionamento de um motor diesel com diferentes emulsões de biocombustíveis, sendo elas biodiesel, misturas de biodiesel / diesel, e uma combinação das duas com água. Estas misturas foram injetadas diretamente na câmara de combustão do motor em teste, e diversos parâmetros operacionais foram alterados, a fim de se estudar sua respectiva influência nas emissões de poluentes. Os resultados mostraram que a combustão de biodiesel, contribuiu para uma redução significativa de CO, HC, e material particulado, se

comparadas ao diesel comum. O aumento de emissões de NO_x pôde ser anulado por meio da adição de emulsões com 10 % de água.

Payri et al. (2005) em seu trabalho com o ECOBUS, afirmam que os resultados obtidos com biodiesel demonstraram que a utilização deste combustível pode reduzir de uma maneira importante a quantidade total de poluentes emitidos pelo transporte na cidade de Valência - Espanha, e estes resultados podem ser extrapolados para outras frotas de ônibus similares rodando em condições similares na Europa. Eles ressaltam que o aumento de alguns contaminantes, tal como o NO_x dependem muito do tipo do motor e das condições de operação. Adicionalmente, uma redução de impacto ambiental muito importante pode ser obtida por meio da reutilização do óleo usado de fritura. Como aspecto negativo, notou-se um aumento de 2,5 % em consumo de combustível. Consolidando todos estes aspectos, os autores elaboraram a Tabela 10, que reflete a quantidade estimada acumulada anual de emissões a serem reduzidas por meio da utilização de mistura B30 na frota da cidade.

Tabela 10 – Variação da quantidade total de contaminantes estimada pela frota de ônibus de transporte urbano na cidade de Valência por ano

Poluentes	CO	CO ₂	NO _x	THC	Material Particulado
Redução anual	23983 kg	2540 T	954 kg	1168 kg	1528 Kg

Fonte: Payri et al. (2005)

Nota: THC – Hidrocarbonetos totais

Clark e Lyons (1999) compararam emissões produzidas por veículos funcionando com óleo diesel comum e uma mistura de 35 % de biodiesel de soja em diesel comum (B53). Para efetuar esta comparação foram utilizados 8 tratores. Emissões de CO, HC e material particulado apresentaram-se menores quando utilizando B35 nos tratores Detroit Diesel Série 60 350 hp (261 kW) e 1989 Cummins 855 (14 L) 315 hp (235 kW), mas ao medir os resultados nos tratores equipados com os motores 1989 Mack E-6 350 hp (261 kW), apenas o CO apresentou-se menor. As emissões de NO_x apresentaram-se maiores para todos os tipos de motores / tratores com B35.

Biodiesel também foi utilizado por Tsolakis e Megaritis (2004) em um protótipo para reforma de gás de escapamento por meio de injeção de biodiesel a fim de gerar hidrogênio para redução de NO_x . A utilização de biodiesel nesta operação apresentou-se mais eficiente do que o diesel de ultra-baixo enxofre.

Peterson et al. (2000) estudaram a influência da composição do biodiesel, principalmente quanto ao número de iodo, nas emissões de um motor diesel turboalimentado. Ao se aumentar o número de iodo, houve influência nas emissões de NO_x , tanto para testes a frio quanto a quente. As alterações do número de iodo não influenciaram as emissões de HC, CO, CO_2 ou de particulados.

Al-Widyan et al. (2001) investigaram o potencial dos ésteres etílicos de óleos vegetais na substituição de óleo diesel fóssil. Foram testadas diversas misturas de biodiesel / diesel e biodiesel puro (B100). Testes de rotação variável foram executados em um motor monocilíndrico acoplado a um dinamômetro. Mediu-se desempenho e emissões de gases. Os resultados indicaram que as misturas queimaram com maior eficiência com menos consumo específico de combustível e portanto, resultaram em maior eficiência térmica. Além disso, as misturas produziram menor CO e HC do que o diesel puro. O biodiesel B100 e o B75 apresentaram o melhor desempenho, enquanto que a mistura B50 produziu os menores níveis de emissões.

Monyem et al. (2001) avaliaram os tempos de injeção e combustão de um motor John Deere comparando dois tipos de combustível: B20, e B20 com oxidação acelerada. O motor foi operado em rotação constante de 1400 rpm enquanto se variava tempos de injeção. Concluíram que: O biodiesel, quando oxidado, apresentou emissões menores de HC e CO. Retardando-se o tempo de injeção houve melhora de 50 % em CO e 34 % em HC ao se comparar as mesmas emissões para o diesel. As reduções para NO_x e material particulado também foram significativas.

Muñoz et al. (2004) apresentaram resultados de ensaios de motores funcionando com biodiesel de óleo de girassol. Primeiramente os ensaios foram executados sem nenhuma alteração nas especificações do fabricante do motor, e então, o tempo de injeção foi atrasado em 3°. Os resultados apresentaram quedas inconsistentes de emissões. Por exemplo, HC foi menor apenas em algumas condições de operação do motor, principalmente em rotações menores. As concentrações de No_x apresentaram-se

sempre maiores em quaisquer condições de operação quando o motor funcionava com biodiesel. As emissões de CO foram menores para biodiesel, com exceção de alguns pontos de alta carga. Ao se atrasar o tempo de injeção em 3°, obteve-se maior HC e CO para os dois combustíveis e menor NO_x.

Schumacher et al. (2001a) estudaram um motor Cummins L10E aplicando diversas misturas de biodiesel de soja, incluindo nafta em sua composição. Os objetivos foram: entender alterações nas emissões regulamentadas, determinar alterações de desempenho e, adicionalmente, aplicar duas estratégias de redução de NO_x atrasando-se o tempo de injeção e adicionando-se nafta. Os resultados mostraram consistência com outros ensaios encontrados na bibliografia, pois à medida em que o conteúdo de biodiesel no diesel aumentava, o motor apresentava menores níveis de HC, CO e PM. Adicionando-se nafta, o NO_x manteve-se estável e foi até menor em algumas condições. Os autores apresentaram as seguintes conclusões: Houve redução de CO, HC, PM e aumento de NO_x à medida em que aumentou-se a quantidade em volume de biodiesel; quando abastecido com B20 ou B30, o motor não apresentou desempenho estatisticamente diferente daquele obtido com diesel comum; o NO_x pôde ser reduzido com atraso da injeção, ou com adição de nafta, funcionando com B20.

Schumacher et al. (2001b) analisaram e compararam emissões entre dois motores da série 60 DDC que funcionaram com misturas de biodiesel e diesel. Entre diversos objetivos ressaltou-se o estudo das emissões regulamentadas e das características de desempenho. Os resultados apresentados mostraram que, conforme a concentração de biodiesel aumentou, houve também aumento de NO_x e reduções de THC, CO, e PM. O THC apresentou queda com B35 e com biodiesel puro. Apesar da potência ter se apresentado consistente com baixos níveis de biodiesel (B35 ou menor) o consumo específico aumentou. Com B20 o consumo aumentou em 1,3 %. B35 provocou aumento de 2,3 %, B65 7,1 % e B100 12,7 %.

Yuan et al. (2005), utilizaram um programa de simulação de motores denominado KIVA-3V, para caracterizar ignição, formação de “spray” e combustão de biodiesel de óleo de soja e gordura animal em um motor diesel de injeção direta. Foi previsto, no modelo, que os dois biocombustíveis teriam tempos mais curtos de ignição e temperaturas mais altas de combustão. A análise da formação do “spray” indicou que o

biodiesel de soja apresentou melhor penetração na câmara de combustão do que aquela do diesel, mas o biodiesel de gordura animal apresentou penetração pior. Ambos os biocombustíveis apresentaram zonas de maior temperatura nos cilindros, o que pode explicar o aumento de NO_x tipicamente encontrado nestes combustíveis / ensaios.

Canakci e Van Gerpen (2003) estudaram o desempenho e emissões de um motor operando com biodiesel de gordura animal, biodiesel de soja e óleo diesel comum e confirmaram os resultados obtidos nos modelos aplicados. Entre as conclusões, pode-se citar: Ambos os tipos de biodiesel forneceram praticamente as mesmas eficiências térmicas do que o diesel comum. No entanto, o consumo específico foi maior em 13,5 % para biodiesel de soja e 14,2 % para o biodiesel de gordura animal. O maior consumo de combustível pôde ser atribuído ao seu menor poder calorífico (12 % menor que óleo diesel); o motor ao funcionar com biocombustível (ambos os tipos) apresentou diferenças estatisticamente significativas em relação ao CO, HC e fumaça, se comparadas ao óleo diesel. Não houve diferença significativa entre os dois tipos de biodiesel.

- O NO_x apresentou-se maior em 13,1 % para biodiesel de soja e 11,6 % para biodiesel de gordura animal.

Crookes (2006) simulou as emissões e desempenho de um motor diesel ao funcionar com biodiesel e as comparou com resultados também simulados para óleo diesel. Evidenciou-se que o biodiesel derivado de óleo vegetal apresentou maior consumo específico de combustível, apesar de o NO_x ou fumaça não terem sido maiores.

Usta (2005) ensaiou um motor com biodiesel de sementes de tabaco. Evidenciou-se que as sementes são normalmente descartadas por não serem produto próprio para consumo. Por conterem quantidades significativas de óleo, o autor elaborou biodiesel metílico delas, e testou em um motor diesel de injeção indireta turbo alimentado. Os resultados mostraram que a adição de éster metílico destas sementes reduziram emissões de SO_2 e de CO, enquanto causaram leve aumento de NO_x . O desempenho teve sensível aumento com a adição de biodiesel. Concluiu-se que o

biodiesel de sementes de tabaco pode ser utilizado em motores diesel sem modificações ou pré-aquecimento da mistura.

Dorado et al. (2003) estudaram as emissões de um motor diesel de injeção direta Perkins em funcionamento com biodiesel de óleo de oliva reaproveitado. Os resultados mostraram que o uso do biodiesel causou redução das emissões de CO em até 58,9 %, CO₂ até 8,6 % (com exceção de apenas um caso de aumento de 7,4 %), NO até 37,5 % e SO₂ até 57,7 %, e aumento das emissões de NO₂ em até 81 %. O biodiesel também apresentou um pequeno aumento de consumo específico de combustível menor que 8,5 %, o que, segundo os autores, pode ser tolerado considerando-se os benefícios ambientais. Ressaltaram, ainda, que a alternativa proposta poderia diminuir significativamente o enorme descarte de óleo usado de fritura, diminuindo também a dependência de fontes fósseis de combustível.

Até mesmo em utilizações não automotivas o biodiesel já foi avaliado, sempre buscando redução de emissões de gases poluentes. Lee et al. (2004) testaram um aquecedor de água residencial do tipo boiler queimando B20. O diesel base foi o não automotivo (diesel de aquecimento). O equipamento queimou satisfatoriamente o combustível sem perda de desempenho, e apresentando emissões reduzidas. Comparando-se com as emissões do diesel comum, o SO₂ foi menor em $19,7 \pm 2,5$ %, o NO_x foi similar, o material particulado foi em média $15,7 \pm 7,5$ % mais baixo. O mais interessante é que os resultados também indicaram reduções do particulado PM 2,5, que está associado a diversos problemas de saúde.

Nabi et al. (2005) testaram um motor diesel de injeção direta com biodiesel produzido a partir de sementes de Neem. Comparadas com as emissões normais do mesmo motor com óleo diesel as emissões foram menores para CO e fumaça, enquanto que o NO_x foi maior. No entanto, os autores afirmam que, facilmente, com utilização de recirculação de gases de escapamento – EGR o NO_x pode ser reduzido.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Caracterização do Laboratório de Ensaio de Motores

Os ensaios foram realizados nos laboratórios de motores da Delphi Automotive Systems em Piracicaba, SP.

Mialhe (1996) compilou uma série de equipamentos para análise de motores a combustão, dentre eles medidores de torque, velocidade angular, consumo de combustível, temperaturas, pressões e parâmetros psicrométricos. Os equipamentos abaixo relacionados são versões automatizadas e ou aprimoradas dos equipamentos descritos pelo autor, e podem ser agrupados da seguinte forma:

3.1.1.1 Dinamômetro de motores

O dinamômetro de motores consiste de um motor elétrico controlado por um sistema computadorizado. Sua função é gerar carga para o motor em teste, por meio da corrente elétrica, de maneira similar a um motor elétrico. Fazem parte ainda do conjunto uma célula de carga e um medidor de rotações (*encoder*). Embora de construção complexa, seu funcionamento é muito simples. O operador ao ajustar a faixa de trabalho na qual pretende trabalhar, define rotação e torque, e o sistema de controle mantém estas condições possibilitando as medições de desempenho do motor. A Figura 8 apresenta o dinamômetro utilizado para o ensaio.

Tipo: Elétrico, assíncrono, *double-sided*

Marca: Schenck

Modelo: Dynas 220

Potência máxima: 130 kW

Torque máximo: 270 Nm

Rotação máxima: 10000 rpm

Grandezas medidas: Potência (kW), Torque (Nm), Rotação (rpm)

Figura 8 – Dinamômetro utilizado para ensaio

Foto: A. Juliato

3.1.1.2 Sistema de medição de gases

O sistema de medição de gases utilizado consiste de diversos analisadores (Figura 9) e de um conjunto de amostragem. Este último, é responsável por bombear o gás de escapamento através de uma sonda desde a tubagem de exaustão até os analisadores. Todo o sistema é aquecido à temperatura de 190°C para que não haja condensação de vapores de água na linha de amostragem, o que poderia reter hidrocarbonetos invalidando as medições. Antes de chegar aos analisadores, o gás é filtrado em diversas etapas para evitar partículas nos conjuntos óticos e de análise, e sua pressão e fluxo são equalizados. Os analisadores utilizados neste sistema são descritos na Tabela 11.

Tipo: Bancada multi gás – emissões brutas

Marca: Pierburg

Modelo: PSE 2000

Tabela 11 – Descrição dos analisadores de gases, seus princípios e descrições de funcionamento

Abreviaturas	Denominações	Princípios de funcionamento	Descrições de funcionamento
HC	Hidrocarbonetos	Ionização de chama	Uma chama piloto é mantida acesa dentro do analisador por meio da queima de H_2 e Ar sintético. Ao passar pela câmara de análise, os hidrocarbonetos produzem uma inização desta chama que é detectada por um sensor
CO	Monóxido de carbono	Infravermelho não-dispersivo	Um emissor e um detector de luz infravermelha trabalham em conjunto, cada qual na extremidade de um tubo selado. Por barrar a luz infravermelha, ao passar pela câmara de análise, o CO é detectado em forma de queda de tensão.
CO ₂	Dióxido de carbono		
NO _x ou NO	Óxidos de nitrogênio	Luminescência química	O sistema de análise consiste de uma câmara na qual os gases em análise são energizados com alta tensão e devido a propriedade óxido de nitrogênio ser reativo à alta tensão gerando luz, esta é medida por um detector de luz (diodo).
O ₂	Oxigênio	Paramagnético	Um campo magnético é gerado em um tubo capilar, restringindo a passagem de moléculas de O ₂ proporcionalmente à sua concentração, alterando a pressão so sistema, que é medida e transformada eletronicamente em concentração de gás

Fonte: Horiba (1995)

Figura 9 – Bancada de medição de emissões (A). Sistema LubCon - condicionamento de óleo (B). Sistema CoolCon - Condicionamento de líquido de arrefecimento (C). Sistema FuelCon - condicionamento e medição e combustível (D)

Fotos: A. Juliato

3.1.1.3 Unidade de condicionamento de óleo

O condicionador de óleo trabalha para manter o óleo de lubrificação do motor a uma determinada temperatura previamente ajustada. Este sistema conta com uma bomba que retira o óleo do motor e o transfere, continuamente, através de um trocador de calor óleo / água, retornando-o posteriormente para o motor (Figura 9 B).

Tipo: Trocador água / óleo.

Marca: FEV

Modelo: LubCon

Capacidade (l): 30

Faixa de trabalho (°C): 60 a 120

3.1.1.4 Unidade de condicionamento de líquido de arrefecimento

De maneira análoga ao sistema de condicionamento de óleo, o sistema de condicionamento do líquido de arrefecimento tem o objetivo de manter a temperatura da água dentro dos parâmetros determinados pelo operador. O sistema consiste de uma bomba e um trocador de calor água / água, o qual é controlado por uma válvula proporcional e um sistema conectado ao sistema de automação principal (Figura 9 C).

Tipo: Trocador água / água

Marca: FEV

Modelo: CoolCon

Capacidade (l): 32

Faixa de trabalho (°C): 60 a 120

3.1.1.5 Unidade de condicionamento e medição de combustível

O sistema de condicionamento e medição de consumo de combustível tem dois objetivos principais: o primeiro, manter a temperatura e a pressão do combustível dentro das faixas estabelecidas. O segundo, medir, por meio de um processo gravimétrico, o consumo de combustível, que poderá com as devidas correções, ser expresso em consumo específico de combustível (Figura 9 D).

Tipo:

Condicionamento: Bomba centrífuga e regulador de dois estágios, com trocador de calor combustível / água

Consumo: gravimétrico

Marca: FEV / AVL

Modelo: FEV FuelCon

Capacidade (l) 80 l.h^{-1}

Faixa de trabalho ($^{\circ}\text{C}$): 20 a 40

3.1.1.6 Sistema de controle, medição e automação

O sistema denominado FEV ADAPT é um conjunto de equipamentos e programas computacionais para controle e medição das grandezas necessárias para testes de motores. Consiste de:

- computador central de controle e interface com o usuário;
- computador de controle de automação (CPU VME) (Figura 11 D);
- rack de entrada e saída com canais de entrada e saída analógicos e digitais (Figura 10);
- sensores de temperatura e pressão (Figura 11 A e 11 B);
- controlador do dinamômetro (Figura 11 C);
- interface AK para bancada de emissões.

Alguns destes equipamentos localizam-se dentro da célula de teste – local que abriga o motor e seus sistemas de condicionamento, segurança, etc (Figura 12), e outros localizam-se na sala de controle (Figura 13), onde o operador técnico se localiza.

Figura 10 – Sistema de conexão de sinais de entrada e saída analógicas e digitais
Foto: A. Juliato

Figura 11 – Sensores de temperatura e pressão - vista externa (A). Sensores de temperatura e pressão - vista interna (B). Controlador do dinamômetro (C). CPU VME de controle do sistema (D)
Foto: A. Juliato

Figura 12 – Célula de testes
Foto: A. Juliato

Figura 13 – Sala de controle - vista do painel de operações (A). Sala de controle - vista dos racks de controle (B)
Fotos: A. Juliato

Por meio do sistema de automação o operador tem ao seu alcance todos os valores do ensaio *on line*, ou seja, cada parâmetro controlado ou registrado do motor é adquirido eletronicamente a uma taxa de 100 Hz e apresentado na tela (Figura 14),

além de ser gravado em arquivo eletrônico no formato planilha para posterior tratamento.

Figura 14 – Captura digital de tela como exemplo de interface para o sistema de controle e automação FEV ADAPT

Imagem: A. Juliato

3.1.1.7 Sistema de bombeamento e seleção de combustível

Existem dois sistemas distintos de bombeamento utilizados pelos laboratórios de motores. O primeiro, normalmente utilizado, consiste de tanques subterrâneos de grande capacidade (10000 L) e tubulações que conectam estes tanques diretamente ao motor em teste. O segundo, de menor escala, é denominado “bomba de tambor”, e consiste de uma bomba pequena próxima ao laboratório, especialmente projetada para trabalhar com tambores de 200 L, em casos de testes onde a rotatividade de combustíveis é grande (Figura 15). Para os ensaios relatados neste trabalho foi

utilizado o sistema de “bomba de tambor”. Para cada ensaio de desempenho um tambor diferente foi utilizado, sendo um para cada tipo de combustível.

Figura 15 – Sistema de bombeamento utilizado para os ensaios

Foto: A. Juliato

3.1.1.8 Sistemas auxiliares (de suporte) e de sistemas de segurança

Foram, ainda, utilizados sistemas auxiliares de suporte para os ensaios. Embora sejam de grande importância para a segurança do laboratório e seus operadores, estes sistemas não estão diretamente ligados ao ensaio, sendo por esta razão, apenas citados:

- Fan-coil e exaustor de ar da sala – fornecem ar para a sala de teste e retiram os gases de escapamento diluindo-os em ar ambiente.
- Condicionamento de água de arrefecimento e gelada – mantém a água de resfriamento e gelada nas temperaturas corretas. Esta água é utilizada para resfriar os trocadores de calor dos condicionadores de óleo, combustível e líquido de arrefecimento.
- Compressor de ar – fornece ar comprimido para os sistemas pneumáticos de acionamento de acelerador e limpeza dos analisadores de gases.

- Detectores de gases – detectam a presença de gases nocivos (HC, CO, NO_x) caso haja vazamento destes gases sejam eles provindos do motor em teste ou dos analisadores.
- Detectores de fumaça – detectam a presença de fumaça, indicativo de incêndio, e disparam um sistema de extinção de incêndio automático.
- Extintores automáticos de CO₂ – em caso de incêndio detectado, entram em funcionamento automaticamente, inundando a sala com CO₂.
- Sprinklers – também possuem a função de agentes extintores. No caso de incêndio, seu fusível é liberado e cada sprinkler borriфа água a uma pressão de 10 bar.

Figura 16 – Sistemas de suporte: sprinkler (A), detector de fumaça (B), extintor automático de CO₂ (C) e detectores de gases tóxicos (D)

Fotos: A. Juliato

3.1.2 Caracterização do motor ensaiado

O motor ensaiado foi um Yanmar de aplicação agrícola, monocilíndrico, da série NSB (Figura 17), com as seguintes características (YANMAR, 2005c):

Yanmar agrícola - Série NSB 95R (7,7 kW a 2400 rpm)

Ciclo Diesel, horizontal de 4 tempos

Taxa de compressão de 21:1

Normalmente aspirado

Combustão em ante-câmara

Lubrificação forçada por bomba trocóide

Tanque de combustível de 9,5 L

Arrefecido a água

Sistema de injeção por bomba centrífuga

Peso líquido de 113 kg

O motor em questão foi escolhido pelas seguintes razões:

- Largamente utilizado, nas mais diversas aplicações agrícolas, conforme item 3.1.2.1;
- Alta representatividade, pois embora seja monocilíndrico, possui as mesmas características de construção de motores de maior porte;
- Devido à sua construção simples, sem controles eletrônicos, não corrige seu comportamento para adaptação às misturas mais oxigenadas, apresentando exatamente o comportamento a ser estudado, pois, embora motores diesel possam ser controlados eletronicamente (BOSCH 2005), a realidade atual no Brasil mostra a utilização ainda incipiente desta tecnologia. O motor ensaiado não seria capaz de compensar a oxigenação adicional do biodiesel durante o funcionamento. Isto poderia causar desde pequenas quedas de desempenho até mesmo o mau funcionamento do motor, com excesso de emissões e consumo de combustível, fatos a serem estudados.

Figura 17 – Motor Yanmar: Vista lateral com destaque para o tanque de combustível (A). Vista lateral esquerda (escapamento, detalhe do cabeçote do motor disposto de forma horizontal) (B). Vista traseira (volante de inércia, ventilador do radiador e escapamento) (C). Vista frontal (filtro de ar, tanque de combustível, receptáculo da manivela de partida e reservatório de líquido de arrefecimento) (D)

Fotos: A. Juliato

3.1.2.1 Aplicações do motor Yanmar NSB

O motor da série NSB pode ser utilizado em aplicações móveis ou estacionárias, mas sempre trabalhando em carga constante. A Figura 18 ilustra motocultivadores para pequenos trabalhos muito utilizados no país. Entre suas aplicações mais frequentes, pode-se citar preparo de solo com sulcador, arado de aiveca e de disco; distribuição de calcário; semeadura e pulverização (YANMAR, 2005a). Com as devidas adaptações, o

mesmo motocultivador pode ainda ser utilizado para o corte de forragem, para batedura de cereais e para triturar palha após a colheita.

Além do motocultivador, o motor da série NSB pode trabalhar com aplicações estacionárias, normalmente sendo utilizado em bombeamento de água para irrigação ou consumo doméstico / industrial, geração de energia ou, ainda, como fonte de potência para pequenas máquinas tais como moegas, descaroçadoras e de beneficiamento de grãos (Figura 18).

Figura 18 – Cultivador (A). Bomba d'água para irrigação (B). Cultivador acoplado a cortador (C). Grupo gerador de eletricidade (D)
Fonte: Yanmar (2005b)

3.1.3 Combustível utilizado

Utilizou-se para os ensaios misturas de biodiesel provenientes de duas matérias-primas (duas oleaginosas) sendo elas a soja e o nabo forrageiro.

Buscou-se compor dois grupos de misturas, cada qual de uma origem distinta. As misturas foram preparadas em local coberto, com um sistema de medição de volume

previamente calibrado (Figura 19). Foram preparados 50 L de biodiesel de cada proporção, sendo:

- Óleo diesel com 2 % de biodiesel de soja, denominado B2 Soja.
- Óleo diesel com 5 % de biodiesel de soja, denominado B5 Soja.
- Óleo diesel com 10 % de biodiesel de soja, denominado B10 Soja.
- Óleo diesel com 20 % de biodiesel de soja, denominado B20 Soja.
- Óleo diesel com 2 % de biodiesel de nabo forrageiro, denominado B2 Nabo
- Óleo diesel com 5 % de biodiesel de nabo forrageiro, denominado B5 Nabo
- Óleo diesel com 10 % de biodiesel de nabo forrageiro, denominado B10 Nabo
- Óleo diesel com 20 % de biodiesel de nabo forrageiro, denominado B20 Nabo

Além destas misturas, foi disponibilizado um lote de óleo diesel padrão, para o *baseline* ou testemunha dos ensaios. As misturas foram devidamente acondicionadas em tambores apropriados para armazenamento de combustível e identificadas.

Inicialmente, o biodiesel B100 foi retirado dos seus tambores originais e medido em uma proveta graduada e calibrada para obtenção da dosagem correspondente para cada mistura. Da proveta, o biodiesel foi despejado em uma bombona plástica de 50 L, e esta, posteriormente completada com óleo diesel padrão (Figura 20).

Figura 19 – Bomba utilizada para medição do óleo diesel padrão
Foto: A. Juliato

Figura 20 – Tambores de acondicionamento (A). Medição da quantidade de biodiesel antes de ser adicionado ao diesel comum (B). Finalização da elaboração das misturas, por meio da complementação com óleo diesel padrão (C)

Fotos: A. Juliato

3.2 Métodos

3.2.1 Sequência de ensaio

Como não se conhecia o comportamento do motor ao funcionar com misturas de biodiesel, e, para evitar quebras ou prejuízo para os componentes do motor, foi estabelecida uma sequência para a execução do ensaio, de modo que as taxas de adição de biodiesel fossem ensaiadas em ordem crescente. A Tabela 12 apresenta cada ensaio, com seu respectivos números de sequência, e descrições. Entre os dois lotes de misturas de biodiesel (entre os ensaios 5 e 6), um ensaio foi repetido com diesel padrão, a fim de se garantir que o motor ainda apresentava as mesmas características de funcionamento, embora este ensaio não esteja incluído na análise de resultados.

Tabela 12 – Sequência de ensaio

Sequências de ensaio	Combustíveis
1	Diesel Padrão
2	B2 Soja
3	B5 Soja
4	B10 Soja
5	B20 Soja
6	B2 Nabo
7	B5 Nabo
8	B10 Nabo
9	B20 Nabo

3.2.2 Instrumentação

A fim de se monitorar e controlar as condições de ensaio, o motor recebeu uma instrumentação específica de acordo com a norma ABNT NBR 1585.

Controle da aceleração

O sistema de automação da célula de testes é responsável por controlar a aceleração do motor por meio do acionamento da bomba injetora de combustível. Para permitir este controle, um motor de passo foi conectado à alavanca manual de aceleração do motor, por meio de um cabo de aço, de modo que o motor pudesse ser acelerado / desacelerado de dentro da sala de controle. A Figura 21 mostra a alavanca e a indicação do ponto onde foi fixado o cabo de aço.

Figura 21 – Alavanca de aceleração manual onde foi fixado o cabo de controle de aceleração do sistema
Foto: A. Juliato

Pressão, temperatura e emissões de gases de escapamento

Segundo a norma ABNT NBR 1585, a contrapressão do escapamento deve ser medida em um ponto a uma distância mínima equivalente a três diâmetros do tubo em relação à(s) flanges(s) de saída do(s) coletor(es) de escapamento e a jusante do(s) turboalimentador(es), se montado(s). A localização deve ser especificada. No caso do motor ensaiado, por se tratar de peça de pequeno porte, a tubagem de escape (Figura 22) foi instrumentada com todas as sondas no único local disponível, ou seja, próximo à flange do coletor de escapamento. As sondas foram instaladas para tomada de temperatura do escapamento, contrapressão de escapamento e sucção de gases para medição de emissões veiculares. Para a medição de pressão, foi utilizado um sensor de pressão piezoelétrico marca Druck. Para a medição de temperatura foi utilizado um termopar do tipo K, de 3 mm de diâmetro. Para a medição de emissões foi conectada uma mangueira de silicone especial para altas temperaturas, a qual por sua vez, foi conectada ao sistema de amostragem descrito em 3.1.1.2.

Figura 22 — Tubagem de escape preparada para receber as instrumentações de medição
Foto: A. Juliato

Pressão e temperatura de admissão

A temperatura do ar de admissão para o motor (ar ambiente), de acordo com a norma ABNT NBR 1585, deve ser medida a até 0,15 m a montante do conduto de admissão do ar. O termômetro ou termopar deve ser isolado do calor radiante e localizado diretamente na corrente de ar. Ele também deve ser isolado dos respingos do refluxo de combustível. Um número suficiente de locais de medição deve ser utilizado para fornecer uma média representativa da temperatura de admissão. O motor ensaiado recebeu um termopar tipo K antes da entrada do filtro de ar, acima do mesmo (Figura 23 B).

A depressão da entrada deve ser medida a jusante dos dutos de entrada, do filtro de ar, do silenciador da entrada, dos dispositivos de limitação da rotação (se montados) ou seus equivalentes. No caso do motor ensaiado, e de maneira análoga ao escapamento, por se tratar de peça de pequenas dimensões, esta foi instrumentada no início da linha reta após o ponto de conexão com o cabeçote (lado da admissão) (Figura 23 A).

Figura 23 — Duto de admissão de ar preparado para receber instrumentação de medição de pressão (A).
Termopar localizado acima do filtro de ar para medição da temperatura de ar de admissão (B)

Fotos: A. Juliato

Pressão e Temperatura de combustível

Para motores de ignição por compressão, a norma ABNT NBR 1585 determina que a temperatura do combustível deve ser medida na entrada da bomba de injeção do combustível. Exige, ainda, que por solicitação do fabricante, a medição da temperatura

do combustível pode ser feita em qualquer ponto na bomba, representativo da condição de operação do motor. Embora não haja determinação na referida norma para a medição da pressão de combustível, esta foi também monitorada dada a importância deste valor na análise final dos resultados. Além disso, a pressão do combustível é monitorada continuamente pelo sistema de segurança, e em caso de queda, o motor é desligado automaticamente.

A Figura 24 mostra como foi instalado o ponto de medição de pressão de combustível. Para a medição de temperatura foi utilizado o termopar instalado no sistema de condicionamento e medição de consumo de combustível (item 3.1.1.5).

Figura 24 – Instrumentação para medição de pressão de combustível
Foto: A. Juliato

Temperatura do líquido de arrefecimento

A fim de se medir a temperatura de água de arrefecimento foi instalado um termopar tipo K no bloco do cilindro, de maneira que a ponta do termopar ficasse dentro de uma das galerias por onde passa água (Figura 25).

Figura 25 – Termopar instalado para medição de temperatura do líquido de arrefecimento
Foto: A. Juliato

Temperatura do óleo

A NBR 1585 determina que a temperatura do lubrificante deve ser medida na entrada da galeria de óleo ou na saída do arrefecedor do óleo. No caso do motor ensaiado, a temperatura foi medida por meio de um termopar tipo K inserido no parafuso do dreno de óleo (Figura 26). A profundidade de inserção foi de 50 mm a fim de que a determinação da norma fosse observada.

Figura 26 – Termopar instalado para medição da temperatura do óleo
Foto: A. Juliato

3.2.3 Montagem do motor em dinamômetro

Após sua instrumentação para medições das grandezas necessárias ao ensaio, o motor foi instalado em um dinamômetro de motores. Resumidamente a instalação do motor seguiu as etapas: colocação do motor no berço; alinhamento radial e axial do motor em relação à flange; instalação de flange e eixo-cardã para conexão ao dinamômetro; conexão do motor com os sistemas de alimentação, condicionamento (água, óleo, combustível), amostragem de emissões de gases e conexão do motor e dinamômetro ao sistema de automação e controle (sensores, atuadores e canais de medição).

A Figura 27 mostra o motor em fase de instalação. A Figura 28 já apresenta o motor completamente instalado. O detalhe das conexões ao sistema de amostragem são mostrados na Figura 29.

Figura 27 – Motor em fase inicial de instalação. O motor é fixado ao berço e conectado ao dinamômetro por meio de um eixo-cardã

Foto: A. Juliato

Figura 28 – Motor completamente instalado no dinamômetro
Foto: A. Juliato

Figura 29 – Detalhe das conexões do sistema de amostragem
Foto: A. Juliato

3.2.4 Execução do ensaio.

Conforme a norma ABNT NBR ISO 1585, o ensaio de potência efetiva líquida consiste em um ensaio com a bomba injetora na posição fixa de plena carga, para motores de ignição por compressão. Os dados de desempenho são obtidos sob condições estabilizadas de operação, com um fornecimento adequado de ar fresco para o motor. Foram obedecidas as recomendações do fabricante quanto ao amaciamento prévio, partida e aquecimento do motor. As condições do ensaio, tal como a temperatura do ar de admissão, foram selecionadas o mais próximo possível das condições padrão de referência, a fim de minimizar o fator de correção.

Os dados foram tomados apenas quando o torque, a rotação e as temperaturas estavam mantidas, substancialmente, constantes por, pelo menos, 1 minuto. A rotação do motor durante o funcionamento ou leitura não desviou da rotação selecionada por mais do que $\pm 1\%$ ou ± 10 rpm. O sistema de automação e controle observou este aspecto e executou a aquisição dos dados apenas quando os valores estavam estáveis. Os dados observados de carga ao freio, fluxo de combustível e a temperatura do ar de admissão foram então adquiridos a uma frequência de 100 Hz, e agrupados em médias a cada segundo, mas sempre de modo que estas médias não variassem mais que 2% para a carga ao freio e consumo do combustível. A temperatura do líquido de arrefecimento na saída do motor foi mantida dentro de ± 5 °C da temperatura mais alta controlada termostaticamente, especificada pelo fabricante.

A temperatura do combustível foi mantida dentro de ± 3 °C da temperatura especificada pelo fabricante. Em todos os casos, a norma especifica a temperatura mínima tolerável do combustível na entrada da bomba em 30 °C. Caso não especificada pelo fabricante, a temperatura do combustível no ensaio deve ser de (40 °C $\pm$ 3 °C).

As medições foram tomadas em um número suficiente de rotações do motor para definir completamente as curvas de torque e potência entre a menor e a maior das rotações do motor recomendadas pelo fabricante. Esta faixa de rotações incluiu a rotação na qual o motor produz seu torque máximo assim como a sua potência máxima.

Os dados obtidos foram armazenados em arquivo eletrônico no formato Comma Separated Values – CSV.

3.2.5 Cálculo dos resultados

Os resultados foram obtidos por meio de cálculos efetuados pelo software FEV ADAPT e, posteriormente tratados por um segundo software, denominado UNIPLOT, parte integrante do pacote de engenharia que compõe o sistema. As equações utilizadas foram as especificadas pela norma ABNT NBR ISO 1585. O detalhamento das tabelas encontra-se no anexo A.

A incerteza de medição, determinada pela norma ABNT NBR ISO IEC 17025 foi calculada conforme aplicação local do trabalho de Melo (2000).

Os resultados foram tratados estatisticamente por meio de teste “t”, aplicando-se um nível de confiança de 95%. Foram analisadas as grandezas Torque corrigido (Nm), Potência corrigida (kW), CO₂ (%), CO (%), NO_x (ppm), O₂ (%), HC (ppm), Consumo específico de combustível (g.kWh⁻¹) em função da variável Rotação (rpm). O detalhamento da análise encontra-se no Anexo B.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Torque corrigido

O torque apresentou-se instável na faixa de 1600 a 1800 rpm, mas nas faixas de 1900 a 2400 rpm não houve diferença significativa para nenhum dos combustíveis testados, o que está coerente com Lopes (2006) e com os estudos de durabilidade da Universidade de Idaho (ESTADOS UNIDOS, 1996). Observa-se na Figura 30 que apesar de haverem oscilações, o valor mais baixo pertenceu ao B20 Nabo, e, ainda assim, este está a apenas 0,5 Nm do diesel padrão. Portanto o torque não foi influenciado ao se adicionar biodiesel ao diesel padrão na faixa de operação comumente utilizada do motor.

Figura 30 – Curvas de torque corrigido em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel

4.2 Potência corrigida

A potência apresentou-se estável além da faixa de utilização do motor. Apenas nas rotações de 1600 e 1700 rpm mostrou-se, significativamente, abaixo daquela obtida

com diesel padrão. Nas demais rotações, o motor não apresentou diferenças significativas de potência para todos os combustíveis testados.

Uma observação interessante foi o fato de os valores de potência máxima obtidos terem se apresentado maiores do que o especificado para o motor (8,3 kW lidos para diesel padrão contra 7,7 kW declarados pelo fabricante).

Como se pode observar na Figura 31, os gráficos de potência praticamente se sobrepõem, mesmo que a escala do referido gráfico seja expandida.

Portanto, na faixa mais comum de utilização deste motor não se observou diferenças significativas de desempenho ao funcionar com quaisquer das misturas utilizadas para ensaio. O comportamento desta variável foi coerente com a maioria dos trabalhos da bibliografia estudada, citando, entre outros, Korus e Jaiduk (1985), Verhaeven et al. (2005) e Schumacher et al. (2001a e 2001b), embora os resultados de Usta (2005), Shumacher (1995) e Xiaoming et al. (2005) sejam conflitantes com os resultados apresentados.

Figura 31 – Curvas de potência corrigida em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel

4.2.1 Potência em função da taxa de biodiesel

Ao se analisar a potência em função da taxa de mistura de biodiesel para ambas as origens (Figura 32), observou-se que o comportamento do motor se manteve estável em relação à potência máxima obtida à medida em que se adicionou maior quantidade de biodiesel ao diesel padrão.

Figura 32 – Potência máxima corrigida em função das percentagens de biodiesel

4.3 Consumo específico

Segundo Lopes et al. (2003), a maneira mais técnica de se apresentar consumo de combustível é expressá-lo em unidade de massa por unidade de potência (g.kWh^{-1}). Esta forma é conhecida como consumo específico. Portanto, embora o sistema de aquisição de dados utilizado apresente o consumo em diferentes formas (horário, massa e volume), optou-se pela apresentação em g.kWh^{-1} .

Nas rotações dos pontos extremos (1600 e 2400 rpm) não houve diferença significativa para o consumo entre os combustíveis ensaiados, apesar destes dados não serem os mais importantes, já que não se utiliza o motor normalmente nestes extremos de rotação.

Para as demais rotações (1700 a 2300 rpm) os resultados mostraram diferenças significativas, sendo o consumo médio sempre maior para as misturas de biodiesel, com exceção dos valores obtidos com B5 Soja (Figura 33). As diferenças apresentadas ficaram entre 1,75 a 5,92 %, sendo esta última referente ao B20 Soja (Tabela 13).

Analisou-se também o consumo específico médio em função da taxa de biodiesel adicionada, resultando no gráfico da Figura 34. No gráfico observa-se que a linha de tendência para as misturas de ambas as origens apontam claramente para um aumento de consumo específico de combustível médio à medida em que se adicionou biodiesel ao óleo diesel padrão, conforme também observaram, entre outros, Lopes (2005), Peterson et al. (1995), Korus e Jaiduk (1985), Ajav et al. (1999), Schumacher et al. (2001b), Dorado et al. (2003). Na bibliografia estudada, apenas Al-Widyan et al. (2001) encontraram resultados conflitantes.

Figura 33 – Curvas de consumo específico de combustível em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel

Figura 34 – Consumo específico médio em função da taxa de biodiesel adicionada, tipo e percentagem de biosiesel

Tabela 13 – Diferenças obtidas no consumo específico de combustível médio em relação ao consumo com diesel padrão

Diferenças (%)							
Soja				Nabo			
B2	B5	B10	B20	B2	B5	B10	B20
1,75	-0,88	5,19	4,98	3,80	3,62	3,68	5,92

4.4 Gases não poluentes

4.4.1 Dióxido de carbono

As emissões de CO₂ apresentaram-se estáveis à medida em que se adicionou biodiesel ao diesel padrão. Mesmo apresentando algumas rotações com valores significativamente diferentes (1900, 2300 e 2400 rpm). Como pode ser observado na Figura 35, não se observou tendência de aumento ou redução destas emissões em função da rotação ou da taxa de biodiesel. Além de na maioria da faixa de rotação as

emissões não terem sido significativamente diferentes, estas, quando foram, não passaram de 1,6% de diferença em relação ao diesel padrão (Tabela 14). Esta estabilidade do CO₂ foi também observada por Verhaven et al. (2005). Já Dorado et al. (2003) observou resultados conflitantes, pois em seus ensaios, o CO₂ apresentou-se até 8,5 % maior.

Figura 35 – Emissões de dióxido de carbono em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel

Tabela 14 – Diferenças obtidas nas emissões de CO₂ em relação às emissões com diesel padrão

Diferenças (%)							
Soja				Nabo			
B2	B5	B10	B20	B2	B5	B10	B20
-0,3%	-1,4%	0,5%	-1,6%	-0,7%	-1,1%	0,3%	0,7%

4.4.2 Oxigênio

Os níveis de oxigênio apresentaram-se significativamente menores para todas as misturas de biodiesel se comparadas ao diesel padrão (Figura 36). As reduções foram de 5,3 a 40,8%. No entanto, não se verificou uma tendência de redução ou aumento proporcional às taxas de biodiesel aplicadas, sendo os valores aleatoriamente superiores (Tabela 15). Não foi possível encontrar na bibliografia consultada resultados para comparação com os valores obtidos neste trabalho.

Figura 36 – Emissões de oxigênio em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel

Tabela 15 – Diferenças obtidas nas emissões de O_2 em relação às emissões com diesel padrão

Diferenças (%)								
B2	Soja				B2	Nabo		
	B5	B10	B20			B5	B10	B20
-27,6	-32,9	-36,8	-28,9		-35,5	-40,8	-19,7	-5,3

4.5 Gases poluentes

4.5.1 Monóxido de carbono

As emissões de monóxido de carbono apresentaram um comportamento interessante, sendo os valores maiores para as misturas de biodiesel em relação ao diesel padrão nas faixas de rotação até 1900 rpm, significativamente iguais entre 2000 e 2200 rpm, e menores para as faixas de rotação superiores (de 2300 a 2400 rpm). A Tabela 16 e a Figura 37 apresentam estes resultados. Conforme pode-se observar, apesar das diferenças apresentadas, não se pôde atribuir uma tendência de alteração de emissões de CO relacionada à adição de biodiesel, conforme Muñoz et al. (2004), que observou emissões variáveis de CO em seu trabalho. Os resultados mostraram-se conflitantes com Xiaoming et al. (2005), Verhaeven et al. (2005), Trapel (2005), Clark e Lyons (1999), Al-Widyan (2001), Schumacher et al. 2001a e 2001b), Usta (2005) Dorado et al. (2003), Nabi et al. (2005) e com a modelagem matemática de Morris et al. (2003).

Figura 37 – Emissões de monóxido de carbono em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel

Tabela 16 – Diferenças obtidas nas emissões de CO em relação às emissões com diesel padrão

Faixas de rotação (rpm)	Diferenças (%)							
	Soja				Nabo			
	B2	B5	B10	B20	B2	B5	B10	B20
1600 a 1900	5,5	1,8	8,8	3,3	4,0	4,7	5,5	3,6
2300 a 2400	-3,2	-6,5	-0,6	-1,9	-0,6	-2,6	-5,8	-2,6

4.5.2 Óxidos de nitrogênio

As emissões de NO_x resultantes das misturas de biodiesel apresentaram diferenças significativas quando comparadas àquelas quando o motor funcionou com óleo diesel padrão nas faixas de 1600 a 1900 rpm, sendo os valores de diesel padrão sempre menores, de forma consistente, para toda a faixa. Para as rotações maiores, a partir de 2000 até 2400 rpm, não houve diferença significativa, embora as misturas B5 de ambas as origens terem apresentado os piores resultados, com acréscimos de até 7,4 % na totalidade da faixa de rotação do motor.

O gráfico da Figura 39 mostra estas características, já que se observa a linha correspondente à série “diesel padrão” abaixo das demais para o início da faixa de rotação, e depois, esta linha mistura-se às demais a partir de 2000 rpm. No entanto, ressalta-se que a maior diferença encontrada entre as medições foi de 38,1 ppm, sendo considerada muito pequena, já que o limite de medição / detecção do analisador é 25 ppm. Alia-se o fato de que o sistema de medição para NO_x é muito sensível, sendo sua variabilidade analítica alta (Figura 38 e Tabela 17). Estes resultados mostraram-se coerentes com os encontrados por Payri et al. (2005), que afirmam que o aumento do NO_x depende muito do tipo de motor e condições de operação. Na bibliografia estudada, apenas Crookes (2006) encontrou NO_x menor em seus ensaios. Para os demais ensaios analisados, o NO_x sempre se mostrou menor (McCormic et al. (2005), Morris et al. (2003), Senatore e Cardone (2005), Xiaoming et al. (2005), Verhaeven et al. (2005), Clark e Lyons (1999), Muñoz et al. (2004), Shumacher et al. (2001b), Canacki e Van gerpen (2003), Usta (2005) e Nabi et al. (2005).

Figura 38 – Emissões de óxidos de nitrogênio em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel

Tabela 17 – Diferenças obtidas nas emissões de NO_x em relação às emissões com diesel padrão

Faixas de rotação (rpm)	Diferenças (%)							
	Soja				Nabo			
	B2	B5	B10	B20	B2	B5	B10	B20
1600 a 1900	4,7	8,5	0,7	7,1	4,6	7,8	1,8	5,0
2000 a 2400	1,7	5,3	-5,2	1,3	2,4	7,4	-4,2	-2,2

4.5.3 Hidrocarbonetos

A figura 39 apresenta o gráfico das emissões deste poluente. Embora se note uma anomalia nas medições de 2400 rpm, muito provavelmente causada por uma falha no equipamento, optou-se por apresentar os dados e descartá-los na análise estatística. As emissões de HC apresentaram acréscimo quando o motor funcionou com quaisquer misturas de biodiesel. O estudo estatístico mostrou diferenças significativas para toda a faixa de rotação estudada (exceto 2400 rpm). O aumento de HC variou de 17,5 a 38,5%. Os piores resultados foram obtidos com as misturas B5 Nabo e B10 Nabo. A

Tabela 18 mostra estas diferenças percentuais para cada mistura de biodiesel. Na bibliografia consultada não se encontrou resultados coerentes com os apresentados neste trabalho. Os valores obtidos apresentaam-se conflitantes com aqueles obtidos por Xiaoming et al. (2005), Trapel (2005), Clark e Lyons (1999), Al-Widyan et al. (2001), Schumacher et al. (2001a e 2001b). Apenas Muñoz et al. (2004), encontraram resultados inconsistentes de HC, não observando tendência.

Figura 39 – Emissões de hidrocarbonetos em função da rotação para as diferentes misturas de biodiesel

Tabela 18 – Diferenças obtidas nas emissões de HC em relação às emissões com diesel padrão

Faixas de rotação (rpm)	Diferenças (%)							
	Soja				Nabo			
	B2	B5	B10	B20	B2	B5	B10	B20
1600 a 2300	22,5%	17,6%	37,0%	25,1%	31,3%	38,3%	38,5%	31,6%

CONCLUSÕES

Não foram observadas diferenças significativas nos valores de torque e potência do motor ao funcionar com misturas de biodiesel comparativamente ao diesel padrão.

Quanto às emissões de gases poluentes, apenas os valores de hidrocarbonetos mostraram-se significativamente diferentes, sendo maiores em toda a faixa de operação do motor. Os valores de óxidos de nitrogênio foram maiores apenas na faixa de 1600 a 1900 rpm. Para o monóxido de carbono, não se pôde atribuir uma tendência de alteração de emissões relacionada à adição de biodiesel.

Quanto às emissões de gases não poluentes, enquanto o oxigênio apresentou-se menor para todas as misturas de biodiesel em relação ao diesel padrão, o dióxido de carbono não seguiu a mesma tendência, apresentando comportamento estável.

O consumo específico de combustível mostrou-se sensível à adição de biodiesel, sendo maior, proporcionalmente, às taxas de biodiesel utilizadas.

A taxa de biodiesel adicionada nem sempre resultou em tendência proporcional de alteração nos resultados.

REFERÊNCIAS

ABASTECIMENTO com óleo vegetal bruto: resultado de pesquisa no centro de engenharia e automação. **Revista Biodiesel**, Monte Alto, p. 13, abr. 2006. .

AJAV, E. A.; SINGH, B.; BHATTACHARYA, T.K. Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel. **Biomass & Bioenergy**, East Lansing, v. 17, n. 4, p. 357-365, 1999.

AL-WIDYAN, M. I.; TASHTOUSH, G.; ABU-QUDAIS, M. Utilization of ethyl ester of waste vegetable oils as fuel in diesel engines. **Fuel Processing Technology**, Irbid, v. 76 p. 91– 103, 2001.

AMARAL, W. A. N. Pólo nacional de biocombustíveis: missão e desafios para a sustentabilidade da produção de biodiesel. In: AGRONEGÓCIO DE PLANTAS OLEAGINOSAS: MATÉRIAS PRIMAS PARA BIODIESEL, 2006, Piracicaba.
Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias-primas para biodiesel. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 1-6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 1585**: veículos rodoviários – código de ensaio de motores – potência líquida efetiva. Rio de Janeiro, 1996. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6601**: veículos rodoviários automotores leves - determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono no gás de escapamento . Rio de Janeiro, 2001. 29 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**: requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005. 31 p.

BEER, T.; GRANT, T.; WILLIAMS, D.; WATSON, H. Fuel-cycle greenhouse gas emissions from alternative fuels in australian heavy vehicles. **Atmospheric Environment**, Aspendale, v. 36, n. 4, p. 753 – 763, 2002.

BIOCOMBUSTÍVEL exige pesquisa de ponta. **Revista CREA**, São Paulo, p. 16, mar/abr 2005.

BIODIESEL: fonte de energia renovável. **Notesalq**, Piracicaba, p. 8, abr. 2005.

BOSCH. **Automotive handbook**. Stuttgart, 2004. 1232 p.

BOSCH. **Diesel systems**: diesel systems for commercial vehicles. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2005. 1 folder.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução nº 001 de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para o uso e implementação da avaliação do impacto ambiental como um dos instrumentos da política nacional do meio ambiente. Disponível em: <www.ibama.gov.br>. Acesso em: 09 ago. 2005.

BRASIL. Grupo de Trabalho Interministerial. **Relatório final do grupo de trabalho interministerial encarregado de apresentar estudos sobre a viabilidade de utilização de óleo vegetal – Biodiesel – como fonte alternativa de energia**. Brasília, 2003a. 15 p.

BRASIL. Lei n. 11.097, de 13 de janeiro de 2003b. Dispõe sobre criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel e sobre a adição de biodiesel ao óleo diesel. Disponível em: <www.anp.gov.br>. Acesso em: 09 ago. 2006.

BRASIL. Resolução ANP n. 42, de 24 de novembro de 2004a. Dispõe sobre a especificação do Biodiesel B-100. Disponível em: <http://www.anp.gov.br> Acesso em: 09 ago. 2006.

BRASIL. Resolução ANP n. 15, de 17 de julho de 2006. Dispõe sobre as especificações de óleo diesel e mistura óleo diesel/biodiesel – B2 de uso rodoviário, para comercialização em todo o território nacional, e define obrigações dos agentes econômicos sobre o controle da qualidade do produto. Disponível em: <www.anp.gov.br>. Acesso em: 09 ago. 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Agroenergia – 2006 – 2011**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005a. 118 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Ministério da Ciência e Tecnologia. Ministério de Minas e Energia, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Diretrizes de política de agroenergia**. Brasília, 2005b. 123 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional**. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 21 out. 2005c.

BRASIL. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Processos Estratégicos de Longo Prazo. **Biocombustíveis**. Brasília, 2004b. 235 p.

CANAKCI, M.; VAN GERPEN J.H. Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 46, p. 937-944, 2003.

CARAMORI, P.H.; ZULLO JR., J.; ALFONSI, R.R.; OLIVEIRA, D.; MARIN, F.R.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. Zoneamento agroclimático das principais plantas oleaginosas do Brasil. In: AGRONEGÓCIO DE PLANTAS OLEAGINOSAS: MATÉRIAS PRIMAS PARA BIODIESEL, 2006, Piracicaba. **Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias-primas para biodiesel**. Piracicaba, 2006. p. 25-42.

CLARK, N. N.; LYONS, D. W. Class 8 truck emissions testing: effects of test cycles and data on biodiesel operation. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v. 42. p. 1211-1219, 1999.

COSTA NETO, P.R.; ROSSI, L.F.S.; ZAGONEL, G.F.; RAMOS, L.P. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel por meio da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 531-535, 2000.

CRNKOVIC, P.M.; IVO da SILVA, M.V.; SANTOS, A.M. Análise térmica de biodiesel, diesel e mistura B10 para caracterização e avaliação do uso destes combustíveis em motores de ignição por compressão. In: AGRONEGÓCIO DE PLANTAS OLEAGINOSAS: MATÉRIAS PRIMAS PARA BIODIESEL, 2006, Piracicaba. **Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias-primas para biodiesel**. Piracicaba, 2006. p. 4-6.

CROOKES, R.J. Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines. **Biomass and Bioenergy**, St. Joseph, v. 30 p. 461-468, Feb. 2006.

DANTAS, H.J. **Estudo termoanalítico cinético e reológico de biodiesel derivado do óleo de algodão (*Gossypium hisutum*)**. 2006. 86 p. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

DORADO, M.P.; BALLESTEROS, E.; ARNAL, J.M.; GOMEZ, J.; LOPEZ, F.J. Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. **Spain Fuel**, Valencia, v. 82, p. 1311–1315, Mar. 2003.

DURAN, A.; LAPUERTA, M.; RODRIGUEZ-FERNANDEZ, J. Neural networks estimation of diesel particulate matter composition from transesterified waste oils blends. **Fuel**, New York, v. 84, p. 2080-2085, June 2005.

ENGINE MANUFACTURERS ASSOCIATION . **Technical statement on the use of biodiesel fuels in compression ignition engines - february 2003**. Disponível em: < www.enginemanufacturers.org >. Acesso em: 05 mar. 2006.

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy. **EMA 200 hour test**: hydrogenated soy ethyl ester and diesel fuel. Bonneville: University of Idaho, 1996. 29 p.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions**. Washington, 2002. (Draft technical report EPA420-P-02-001).

FELDMAN, M.E.; PETERSON, C.L. Fuel injector timing and pressure optimization on a di diesel engine for operation on biodiesel. In: LIQUID FUELS FROM RENEWABLE RESOURCES, 1992, Nashville. **Proceedings ...** St. Joseph: ASAE, 1992.

FRENCH Biofuel Investment. **AECC News**, Bruxelas, p. 4, Mar. 2006.

HAAS, M.J.; MCALOON, A.J.; YEE, W.C.; FOGLIA, T.A. A process model to estimate biodiesel production costs. **Bioresource Technology**, Wyndmoor, v. 97 p. 671–678, 2006.

HE, B.B.; SINGH, A.P.; THOMPSON, J.C. Experimental optimization of a continuous-flow reactive distillation reactor for biodiesel production. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, p. 2237-2243, 2005.

HORIBA INSTRUMENTS. **Typical Horiba benches**. 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS RENOVÁVEIS. **Limites para emissão de poluentes para veículos a diesel**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/proconve/>>. Acesso em: 12 ago. 2006.

JANULIS, P. Reduction of energy consumption in biodiesel fuel life cycle. **Renewable Energy**, Kaunas, v. 29, p. 861–871, Oct. 2003

KIM, S.; DALE, B.E. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel. **Biomass and Bioenergy**, East Lansing, v. 29, p. 426–439, Aug. 2005

KNOTHE, G. Fuel properties. In: KNOTHE, G.; GERPEN, H.; KRAH, J. (Ed.). **The biodiesel handbook**. Illinois: AOCS Press, 2005 chap. 6.4, p. 47.

KORUS, R.A.; JAIDUK, J.O. A rapid engine test to measure injector fouling in diesel engines using vegetable oil fuels. **Journal of the American Oil Chemists' Society**. Urbana, v. 62, n. 11, p. 1563-1564, Nov. 1985.

LEE, S.W.; HERAGE, T.; YOUNG, B. Emission reduction potential from the combustion of soy methyl ester fuel blended with petroleum distillate fuel. **Fuel**, Ottawa, v. 83, p. 1607–1613, Feb. 2004.

LOPES, A. A UNESP Jaboticabal testa Biodiesel que pode garantir a criação de empregos. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, v. 114, n. 9, Seção II, p. 2. 15 jan. 2004.

LOPES, A. **Biodiesel em trator agrícola: desempenho e opacidade**. 2006. 158 p. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2006.

LOPES, A.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P. Desenvolvimento de um protótipo para medição do consumo de combustível em tratores. **Revista Brasileira de Agroinformática**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 24-31, 2003.

LOPES, A.; REIS, G.N.; DABDOUB, M.J.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P.; CÂMARA, F.T.; BATISTA, A.C.F.; BARBOSA, P.B. Trator funcionando com biodiesel filtrado e destilado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 2., 2005, Varginha. **Anais ...** Varginha: UFLA, 2005. p. 889-894.

MARSHALL, W.F. **Effects of methyl esters of tallow and grease on exhaust emissions and performance of a Cummins L10 engine**. Bartlesville: IIT Research Institute, National Institute for Petroleum and Energy Research, 1993. 23 p. (Report, B08861).

MCCORMICK, R.L.; TENNANT, C.J.; HAYES, R.R.; BLACK, S.; IRELAND, J.; MCDANIEL, T.; WILLIAMS, A.; FRAILEY, M.; SHARP, C.A. Regulated emissions from biodiesel tested in heavy-duty engines meeting 2004 emission standards. In: SAE FUEL AND LUBRICANTS, Rio de Janeiro, 2005. Rio de Janeiro: SAE, 2005. 1 CD-ROM.

MELO, T.C.C. Incertezas de medição em ensaios de emissões para veículos leves. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAIS DA TECNOLOGIA DA MOBILIDADE, 10., 2000, São Paulo. São Paulo: SAE, 2000. 1 CD-ROM.

MELO, T.C.C. Evaluation of the amazon forest low methane natural gas for vehicular applications. In: SAE FUEL AND LUBRICANTS, 1., Rio de Janeiro, 2005. Rio de Janeiro: SAE, 2005. 1 CD-ROM.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba: FEALQ, 1996. 722 p.

MONTANA. Department of Transportation. **Evaluation of biodiesel fuel: literature review**. Helena, 2004. 61 p. (Western Transportation Institute. College of Engineering. Montana State University).

MONYEM, A.; VAN GERPEN, J.H.; CANAKCI, M. The effect of timing and oxidation on emissions from biodiesel – fueled engines. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, p. 35-42, 2001.

MORRIS, R.E.; POLLACK, A. K.; MANSELL, G. E.; LINDHJEM, C.; JIA, Y.; WILSON, G. **Impact of biodiesel fuels on air quality and human health summary report september 16, 1999–january 31, 2003**. Novato: National Renewable Energy Laboratory, 2003. 27 p.

MUÑOZ, M.; MORENO, F.; MOREA, J. Emissions of na automobile diesel engine fueled with sunflower methyl ester. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 47, p. 5-11, 2004.

MURPHY, M.J.; KETOLA, H.N.; RAJ, P.K. **Summary and assessment of the safety, health, environmental and system risks of alternative fuels**. Helena: U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, 1995. 28 p. (Report, FTA-MA-90-7007-95-1).

NABI, N.; MHIA, S.A.; SHAHADAT, Z. Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel–biodiesel blends. **Bioresource Technology**, Bangladesh, v. 97 p. 372–378, Mar. 2005.

NATIONAL BIODIESEL BOARD. **Average density and heating value of biodiesel and diesel fuel**. Disponível em: <www.biodiesel.org>. Acesso em: 10 set.2006.

NIEHAUS, R.A.; GOERING, C.E.; SAVAGE, L.D.; SORENSON, S.C. Cracked soybean oil as a fuel for a diesel engine. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 29, p. 683-689, 1986.

PARENTE, E.J.S. **Biodiesel: uma aventura tecnológica em um país engraçado**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2003. 65 p.

PAYRI, F.; MACIÁN, V.; ARRÈGLE, J.; TORMOS, B. Heavy-duty diesel engine performance and emission measurements for biodiesel (from cooking oil) blends used in the ecobus project In: SAE FUEL AND LUBRICANTS, 1., Rio de Janeiro, 2005. Rio de Janeiro: SAE, 2005. 1 CD-ROM.

PETERSON, C.L.; TABERSKI, J.S.; THOMPSON, J.C.; CHASE, C.L. The effect of biodiesel feedstock on regulated emissions in chassis dynamometer tests of a pickup truck. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 43, p. 1371-1381, 2000.

PETERSON, C.L.; REECE, D.; HAMMOND, B.; THOMPSON, J.; BECK, S. **Making and testing a biodiesel fuel made from ethanol and waste french-fry oil**. Idaho: Department of Water Resources, 1995. Report. Disponível em: <<http://www.biodiesel.org/>>. Acesso em: 06 jul. 2006.

PIMENTA, V. GT4 – testes em motores e veículos. In: SEMINÁRIO BIODIESEL: EXPANDINDO O USO, 1., 2005, São Paulo. **Palestra ...** São Paulo:[s.n.], 2004. p. 13.

PRANKL, H. **Specification of fatty acid methyl esters (FAME)**. Wieselburg: Federal Institute of Agricultural Engineering (BLT), 1999. 25 p. Final report of NTB-net Phase III / Topic 1.

PRANKL, H. Stability of biodiesel. In: KNOTHE, G.; GERPEN, H.; KRAH, J. (Ed.). **The biodiesel handbook**. Illinois: AOCS Press, 2005 chap. 6.4.2, p. 86-92.

RABELO, I. D. **Estudo de desempenho de combustíveis convencionais associados a Biodiesel obtido pela transesterificação de óleo usado em fritura**. 2001 128 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2001.

REECE, D.L.; PETERSON, C.L. A report on the Idaho on-road vehicle test with RME and neat rapeseed oil as an alternative to diesel fuel. In: ASAE INTERNATIONAL SUMMER MEETING, 1993, Spokane. **Proceedings ...** St. Joseph: ASAE, 1993. p. 50.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. 1. ed. Piracicaba: ESALQ, 2004. 302 p.

ROUSSEFF, D. **Biodiesel. O novo combustível do Brasil**. Apresentação à Casa Civil no Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel. Dez 2004. Disponível em: <www.biodiesel.gov.br>. Acesso em: 21 out. 2005.

SAAD, E.B.; DOMINGOS, A.K.; CÉSAR-OLIVEIRA, M.A.F.; WILHELM, H.M.; RAMOS, L.P. Variação da qualidade do biodiesel em função da matéria prima de origem vegetal. In: AGRONEGÓCIO DE PLANTAS OLEAGINOSAS: MATÉRIAS PRIMAS PARA BIODIESEL, 2006, Piracicaba. **Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias-primas para biodiesel**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 193-225.

SANTOS, R.F.E.; SANTOS, A.M.; MARTINS, K.C.R.; SILVA, J.A. Análise de detonação, torque e potência em um motor de ignição por compressão turboalimentado por um sistema ternário de combustíveis – diesel, biodiesel e etanol. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 3., 2004, Belém. **Resumos ...** Belém, 2004.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de Qualidade do Ar 2003**. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 28 jan. 2005.

SCHUMACHER, L.G.; HIRES, W.G.; BORGELT, S.C. Fueling diesel engines with methyl-ester soybean oil. In: LIQUID FUELS FROM RENEWABLE RESOURCES, 1992, Nashville. **Proceedings ...** Nashville: ASAE, 1992. p. 27-29.

SCHUMACHER, L.G.; BORGELT, S.C.; RUSSELL, M.D.; HIRES, W.G. Fueling 5.9L and 7.3L navistar engines with biodiesel-20. In: 1995 ASAE SUMMER MEETING, 1995, Chicago. **Transactions ...** Atlanta: ASAE, 1995.

SCHUMACHER, L.G.; CLARK, N.N.; LYONS, D.W.; MARSHALL, W. Diesel engine exhaust emissions evaluation of biodiesel blends using a cummins I10e engine. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, p. 1461-1464, 2001a.

SCHUMACHER, L.G.; MARSHALL, W.; KRAHL, J.; WETHERELL, W.B.; GRABOWSKI, M.S. Biodiesel emissions data from series 60 ddc engines. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 44, p. 1465-1468, 2001b.

SEM, T.R. Effect of various lubricating oils on piston deposits in biodiesel fueled engines. In: WORLD CONGRESS & EXHIBITION, 2004, Detroit. **Abstracts ...** Troy, 2004a.

SEM, T.R. Investigation of injector tip deposits on transport refrigeration units running on biodiesel fuel. In: WORLD CONGRESS & EXHIBITION, 2004b, Detroit. **Abstracts ...** Troy, 2004b.

SENATORE, A.; CARDONE, M. Experimental characterization of a common rail engine fuelled with different biodiesel. In: SAE FUEL AND LUBRICANTS, 1., 2005, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SAE, 2005. 1 CD-ROM.

SOUZA, W.L.; FERRARI, R.A. Girassol como matéria prima para produção de biodiesel. In AGRONEGÓCIO DE PLANTAS OLEAGINOSAS: MATÉRIAS PRIMAS PARA BIODIESEL, 2006, Piracicaba. **Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias-primas para biodiesel.** Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 47-49.

STRONG, C.; ERICKSON, C.; SHUKLA, D. **Evaluation of biodiesel fuel:** literature review. Helena: Montana State University, Western Transportation Institute. Prepared for the Montana Department of Transportation – Research Section. Jan. 2004

SUPPORT for Biofuels Action. **AECC News**, Bruxelas, 1st mar 2006. p. 2.

SWCHARTZ, D.; NORRGARD, L.; CHRISTENSEN, M.; HEARLE, S. **Biodiesel engine testing.** Columbia: University of British Columbia, 2005. 23 p. (MECH-457 Final Report submitted to Jon Mikkelsen - University of British Columbia – UBC).

TEIXEIRA, L.C. Potencialidades de oleaginosas para produção de biodiesel. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 18-27, 2005a

TEIXEIRA, L.C. Produção de biodiesel. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 79-86, 2005b

TOLMASQUIM, M.T. **Fontes renováveis de energia no Brasil.** São Paulo: Interciência, 2003. 515 p.

TRAPEL, E.; MAYER, C.; SCHULZ, C.; ROTH, P. Effects of bio diesel injection in a di diesel engine on gaseous and particulate emission. In: SAE FUEL AND LUBRICANTS, 1., 2005, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SAE, 2005. 1 CD-ROM.

TSOLAKIS, A.; MEGARITIS, A. Exhaust gas assisted reforming of rapeseed methyl ester for reduced exhaust emissions of CI engines. **Biomass and Bioenergy**, New York, v. 27 p. 493–505, Apr. 2004.

USTA, N. An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester. **Energy Conversion and Management**, Denizli, v. 46, p. 2373–2386, Feb. 2005.

VALTRA. **Avaliação técnica e econômica de tratores movidos a B5 em lavoura canavieira.** Apresentação técnica da empresa (interna). 2005. 33 p.

VERHAEVEN, E.; PELKMANS, L.; GOVAERTS, L. Results of demonstration and evaluation projects of biodiesel from rapeseed and used frying oil on light and heavy duty vehicles. In: SAE FUEL AND LUBRICANTS, 1., 2005, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SAE, 2005. 1 CD-ROM.

WALSH, M.P.; BRANCO, G.M.; RYAN, J.; LINKE, R.R.A.; ROMANO, J.; MARTINS, M. H.R.B. Clean diesels: the key to clean air in São Paulo. In: SAE FUEL AND LUBRICANTS, 1., 2005, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SAE, 2005. 1 CD-ROM.

WILLIAMSON, A.N.; BADR, O. Assessing the viability of using Rape Methyl Ester (RME) as an alternative to mineral diesel fuel for powering road vehicles in the UK. **Applied Energy**, London, v. 59, p. 187-214, 1998

XIAOMING, L.; YUNSHAN, G.; SIJIN, W.; XIUKUN, H. An experimental investigation on combustion and emissions characteristics of turbocharged di engines fueled with blends of biodiesel. In: SAE FUEL AND LUBRICANTS, 1., 2005, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SAE, 2005. 1 CD-ROM.

YANMAR AGRITECH. **Eficiência e versatilidade fazem a diferença**: série TC. Indaiatuba, 2005a. 1 folder.

YANMAR AGRITECH. **Linha de produtos NSB**. Indaiatuba, 2005b. 1 folder.

YANMAR AGRITECH. **Manual de instruções**: série NSB. Indaiatuba, 2005c. 52 p.

YUAN, W.; HANSEN, A.C.; TAT, M.E.; VAN GERPEN, J.H.; TAN, Z. Spray, ignition, and combustion modeling of biodiesel fuels for investigating nox emissions. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v. 48 p. 933-939, 2005.

ZIEJEWSKI, M.; KAUFMAN, K.R.; SCHWAB, A.W.; PRYDE, E.H. Diesel engine evaluation of a nonionic sunflower oil – aqueous ethanol microemulsion. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, Urbana, v. 61, n. 10, p. 1620-1626, 1984.

APÊNDICE

Certificado de análise dos combustíveis.

Ceralit
S.A. INDUSTRIAS CONERGO

CERTIFICADO DE ANÁLISE N° 4.512-5

CLIENTE: DELPHI AUT SISTEMAS
NT. FISCAL: 59 446
PRODUTO: ÉSTER ETILICO DE ÓLEO VEGETAL
CODIGO CERALIT: N/A
CÓDIGO CLIENTE: N/A
EECC N°: N/A

DATA: 24/11/05
QUANTIDADE: 400 L
EMBALAGEM: 02 tambores / 200 L

ANÁLISE	MÉTODOS	ESPECIF.	LOTES		
			5-0122	5-0129	
Aspecto	Visual	Límpido e isento de impurezas	OK	OK	
Massa específica a 20 °C, g/cm ³	ASTM D – 1298	Típico: 0,870	0,877	0,879	
Viscosidade Cinética a 40 °C, mm ² /s	ASTM D – 445	1,9 – 6,0	5,8	5,8	
Água, %	Karl Fisher	Max.: 0,050	0,05	0,04	
Ponto de Fulgor, °C	ASTM D – 92	Min.: 100,0	177,0	176,0	
Cinzas sulfatadas, %	ASTM D – 874	Max.: 0,020	0,006	0,001	
Índice de Acidez (mg KOH/g)	AOCS Cd 3a – 63	Max.: 0,8	0,3	0,2	
Quantidade:			01	01	
DATA DE FABRICAÇÃO:			11/11/05	23/11/05	
PRAZO DE VALIDADE:			12 MESES		
OBS.: -

CONTROLE DE QUALIDADE
ZENILDE M. T. PIROGINI
C.R.Q. 044208

SETOR: L.C.Q.
VISTO: TAS
DATA: 07/06
VER.: 00

SGQ 002
REVISÃO 02

ANEXOS

ANEXO A – Tabelas de Dados

Torque Corrigido [Nm]									
Rotação rpm	Diesel Padrão	Soja 2 %	Soja 5 %	Soja 10 %	Soja 20 %	Nabo 2 %	Nabo 5 %	Nabo 10 %	Nabo 20 %
1600	33,5	33,3	33,0	32,5	32,6	32,8	33,4	32,5	33,1
1700	33,7	33,9	33,9	33,0	33,3	33,2	33,6	33,1	33,3
1800	34,1	34,0	34,5	32,5	33,4	33,5	33,8	33,6	33,3
1900	33,6	33,9	34,5	33,3	33,7	33,9	33,4	33,6	33,5
2000	33,8	34,2	34,4	33,3	33,7	33,8	33,7	33,6	33,6
2100	33,7	34,0	34,2	32,9	33,3	33,4	33,9	33,5	33,5
2200	33,6	33,7	34,0	32,9	33,4	33,4	34,0	33,7	33,1
2300	33,2	33,5	33,5	32,7	33,2	33,1	33,4	33,2	32,8
2400	33,0	33,1	33,4	32,2	32,6	33,2	32,9	32,9	33,0

Potencia Corrigida [kW]									
Rotação [rpm]	Diesel Padrão	Soja 2 %	Soja 5 %	Soja 10 %	Soja 20 %	Nabo 2 %	Nabo 5 %	Nabo 10 %	Nabo 20 %
1600	5,6	5,6	5,5	5,4	5,5	5,5	5,6	5,5	5,5
1700	6,0	6,0	6,0	5,9	5,9	5,9	6,0	5,9	5,9
1800	6,4	6,4	6,5	6,1	6,3	6,3	6,4	6,3	6,3
1900	6,7	6,8	6,9	6,6	6,7	6,8	6,6	6,7	6,7
2000	7,1	7,2	7,2	7,0	7,1	7,1	7,1	7,0	7,0
2100	7,4	7,5	7,5	7,2	7,3	7,3	7,5	7,4	7,4
2200	7,7	7,8	7,8	7,6	7,7	7,7	7,8	7,8	7,6
2300	8,0	8,1	8,1	7,9	8,0	8,0	8,1	8,0	7,9
2400	8,3	8,3	8,4	8,1	8,2	8,4	8,3	8,3	8,3

Consumo Especifico de Combustivel [g/kWh]									
Rotação [rpm]	Diesel padrão	Soja 2 %	Soja 5 %	Soja 10 %	Soja 20 %	Nab 2 %	Nabo 5 %	Nabo 10 %	Nabo 20 %
1600	457,15	453,75	454,23	468,80	463,13	436,99	468,15	472,83	470,21
1700	451,73	458,60	433,36	471,16	487,20	476,54	463,64	467,29	482,00
1800	448,53	454,90	442,39	491,65	487,89	461,32	480,82	469,94	495,38
1900	469,14	478,52	459,53	495,55	487,68	467,10	488,14	488,05	499,41
2000	485,36	481,11	485,04	505,42	501,23	495,74	492,29	500,00	505,27
2100	478,22	487,64	479,59	507,87	481,31	499,78	493,62	504,13	491,58
2200	475,60	488,03	494,78	492,45	481,49	508,16	492,65	494,41	500,39
2300	483,10	500,39	468,06	498,51	528,92	508,12	499,82	488,84	512,65
2400	499,84	419,42	387,17	514,54	504,97	497,80	509,06	500,10	513,50

Rotação [rpm]	Diesel padrão	CO ₂ (%)							
		Soja 2 %	Soja 5 %	Soja 10 %	Soja 20 %	Nabo 2 %	Nabo 5 %	Nabo 10 %	Nabo 20 %
1600	8,4	8,3	8,6	8,4	8,7	8,5	8,4	8,4	8,4
1700	8,3	8,3	8,4	8,2	8,6	8,3	8,3	8,3	8,3
1800	8,2	8,1	8,3	8,1	8,3	8,2	8,3	8,1	8,2
1900	8,1	8,0	8,0	7,9	8,0	8,1	8,0	7,9	7,9
2000	7,9	8,0	7,9	7,8	8,0	7,9	7,9	7,8	7,8
2100	7,9	7,9	7,8	7,8	7,9	8,1	8,2	7,8	7,8
2200	8,1	8,1	8,0	8,0	8,2	8,1	8,2	8,1	8,0
2300	8,1	8,2	8,3	8,2	8,3	8,2	8,3	8,2	8,1
2400	8,0	8,3	8,7	8,2	8,2	8,1	8,2	8,2	8,0

Rotação [rpm]	Diesel padrão	O ₂ (%)							
		Soja 2 %	Soja 5 %	Soja 10 %	Soja 20 %	Nabo 2 %	Nabo 5 %	Nabo 10 %	Nabo 20 %
1600	1,3	1,0	0,9	0,7	0,9	0,8	0,7	1,0	1,2
1700	1,1	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,9	1,0
1800	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,8	0,9
1900	0,8	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,7	0,8
2000	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,8
2100	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7
2200	0,8	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6
2300	0,6	0,5	0,4	0,4	0,6	0,4	0,4	0,5	0,6
2400	0,6	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,6	0,6

Rotação [rpm]	Diesel padrão	CO (%)							
		Soja 2 %	Soja 5 %	Soja 10 %	Soja 20 %	Nabo 2 %	Nabo 5 %	Nabo 10 %	Nabo 20 %
1600	6,4	6,8	6,4	7,0	6,5	6,7	6,8	6,7	6,6
1700	6,7	7,0	6,8	7,3	6,8	7,0	7,1	6,9	7,0
1800	7,0	7,4	7,1	7,6	7,3	7,3	7,2	7,5	7,1
1900	7,3	7,7	7,6	7,9	7,7	7,5	7,6	7,8	7,7
2000	7,8	7,7	7,8	8,0	7,8	7,8	7,8	8,1	7,8
2100	7,7	7,8	8,0	8,2	7,8	7,6	7,4	8,2	7,8
2200	7,6	7,6	7,8	7,9	7,5	7,6	7,5	7,6	7,7
2300	7,7	7,5	7,5	7,6	7,5	7,6	7,5	7,4	7,5
2400	7,7	7,4	6,9	7,7	7,6	7,7	7,5	7,1	7,5

Rotação [rpm]	Diesel padrão	NO _x [ppm]							
		Soja 2 %	Soja 5 %	Soja 10 %	Soja 20 %	Nabo 2 %	Nabo 5 %	Nabo 10 %	Nabo 20 %
1600	210,7	224,8	233,8	217,4	226,4	216,4	226,2	216,9	231,1
1700	213,8	224,9	227,8	213,5	230,3	223,6	228,7	218,3	227,1
1800	212,1	216,6	229,9	212,3	226,5	221,3	229,3	213,4	216,2
1900	204,7	214,7	221,6	204,3	217,5	218,4	222,4	208,1	209,3
2000	205,8	215,2	218,8	200,4	212,8	212,1	221,1	203,4	209,1
2100	217,5	212,0	212,5	201,3	216,0	219,8	233,0	204,4	207,6
2200	218,7	218,1	223,4	207,7	220,4	223,7	233,2	211,1	211,1
2300	218,5	222,5	232,3	208,9	225,4	226,7	239,6	214,6	216,3
2400	222,7	233,4	253,3	208,6	223,2	227,0	236,4	214,9	215,1

Rotação [rpm]	Diesel padrão	HC [ppm]							
		Soja 2 %	Soja 5 %	Soja 10 %	Soja 20 %	Nabo 2 %	Nabo 5 %	Nabo 10 %	Nabo 20 %
1600	2036,4	2403,3	2537,1	2647,1	2477,5	2960,2	2940,1	2652,2	2440,7
1700	2053,9	2601,4	2227,6	2750,9	2485,6	2804,8	2907,4	2851,4	2484,8
1800	2306,8	2836,1	2528,6	3297,3	2766,1	2903,7	3085,6	3007,9	3192,9
1900	2571,9	3133,7	2890,6	3726,8	3031,7	3352,8	3445,2	3379,6	3229,6
2000	2930,6	3408,8	3140,8	3769,4	3358,1	3561,5	3847,6	3624,0	3603,2
2100	2730,7	3471,2	3527,1	3929,9	3631,3	3466,4	3812,3	4112,4	3990,2
2200	2663,4	3435,3	3377,8	3730,9	3559,6	3650,4	3872,8	4179,5	3713,7
2300	2959,4	3518,2	3596,3	3898,8	4026,1	3889,5	4094,5	4237,6	3993,4
2400	3408,5	2357,1	1912,5	3437,1	4345,7	4164,9	4537,8	2566,2	3901,4

ANEXO B - Comparação Estatística

Variáveis Analisadas

Grandezas:

- Torque Corrigido;
- Potência Corrigida;
- CO₂;
- CO (%);
- NO (ppm);
- O₂ (%);
- HC (ppm);
- CEC – Consumo específico de combustível (g/kVh).

Variável Resposta:

- Rotação (rpm)

Metodologia Utilizada

Aplicar um teste t para analisar descritivamente o efeito da variável Rotação para as grandezas citadas;

Avaliar graficamente o efeito da variável Rotação para as grandezas citadas.

Torque**Rotação = 1600**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-4,13118
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,003293
Média Amostral	32,96667
Hipótese Alternativa: média diferente de	33,5
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	32,66896
Limite Superior	33,26437

A média das medições (32,96) do nível 1600 para a grandeza Torque é significativamente diferente de 33,5 ($P\text{-valor} = 0,0032 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 33,5.

Torque**Rotação = 1700**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-2,25805
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,053886
Média Amostral	33,44444
Hipótese Alternativa: média diferente de	33,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	33,18346
Limite Superior	33,70543

A média das medições (33,44) do nível 1700 para a grandeza Torque é igual a 33,7 ($P\text{-valor} = 0,053 > 0,05$) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 33,7.

Torque**Rotação = 1800**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-2,45576
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,039579
Média Amostral	33,63333
Hipótese Alternativa: média diferente de	34,1
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	33,19513
Limite Superior	34,07154

A média das medições (33,63) do nível 1800 para a grandeza Torque é significativamente diferente de 34,1 ($P\text{-valor} = 0,039 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 34,1.

Torque**Rotação = 1900**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	0,929479
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,379833
Média Amostral	33,71111
Hipótese Alternativa: média diferente de	33,6
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	33,43545
Limite Superior	33,98677

A média das medições (33,71) do nível 1900 para a grandeza Torque é igual a 33,6 ($P\text{-valor} = 0,379 > 0,05$) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 33,6.

Torque**Rotação = 2000**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,10114
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,921925
Média Amostral	33,78889
Hipótese Alternativa: média diferente de	33,8
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	33,53557
Limite Superior	34,04221

A média das medições (33,78) do nível 2000 para a grandeza Torque é igual a 33,8 (P-valor = 0,921 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 33,8.

Torque**Rotação = 2100**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,75593
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,471362
Média Amostral	33,6
Hipótese Alternativa: média diferente de	33,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	33,29494
Limite Superior	33,90506

A média das medições (33,6) do nível 2100 para a grandeza Torque é igual a 33,7 (P-valor = 0,471 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 33,7.

Torque

Rotação = 2200

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,53452
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,607511
Média Amostral	33,53333
Hipótese Alternativa: média diferente de	33,6
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	33,24572
Limite Superior	33,82094

A média das medições (33,53) do nível 2200 para a grandeza Torque é igual a 33,6 (P-valor = 0,607 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 33,6.

Torque

Rotação = 2300

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,23652
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,818969
Média Amostral	33,17778
Hipótese Alternativa: média diferente de	33,2
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	32,96112
Limite Superior	33,39443

A média das medições (33,17) do nível 2300 para a grandeza Torque é igual a 33,2 (P-valor = 0,818 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 33,2.

Torque

Rotação = 2400

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
<i>DADOS DO PROCESSO</i>	
T	-0,66818
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,522823
Média Amostral	32,92222
Hipótese Alternativa: média diferente de	33
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	32,6538
Limite Superior	33,19065

A média das medições (32,92) do nível 2400 para a grandeza Torque é igual a 33,0 (P-valor = 0,522 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 33,0.

Potência

Rotação = 1600

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
<i>DADOS DO PROCESSO</i>	
T	-3,5
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,008079
Média Amostral	5,522222
Hipótese Alternativa: média diferente de	5,6
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	5,470978
Limite Superior	5,573467

A média das medições (5,52) do nível 1600 para a grandeza Potência é significativamente diferente de 5,6 (P-valor = 0,008 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 5,6.

Potência

Rotação = 1700

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-3,16228
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,013349
Média Amostral	5,944444
Hipótese Alternativa: média diferente de	6
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	5,903932
Limite Superior	5,984957

A média das medições (5,94) do nível 1700 para a grandeza Potência é significativamente diferente de 6,0 ($P\text{-valor} = 0,013 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 6,0.

Potência

Rotação = 1800

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-1,78885
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,111434
Média Amostral	6,333333
Hipótese Alternativa: média diferente de	6,4
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	6,247394
Limite Superior	6,419273

A média das medições (6,3) do nível 1800 para a grandeza Potência é igual a 6,4 ($P\text{-valor} = 0,111 > 0,05$) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 6,4.

Potência

Rotação = 1900

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	0,685994
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,512103
Média Amostral	6,722222
Hipótese Alternativa: média diferente de	6,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	6,647521
Limite Superior	6,796923

A média das medições (6,72) do nível 1900 para a grandeza Potência é igual a 6,7 (P-valor = 0,512 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 6,7.

Potência

Rotação = 2000

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,4264
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,681057
Média Amostral	7,088889
Hipótese Alternativa: média diferente de	7,1
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,028799
Limite Superior	7,148978

A média das medições (7,08) do nível 2000 para a grandeza Potência é igual a 7,1 (P-valor = 0,681 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 7,1.

Potência**Rotação = 2100**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,31623
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,759923
Média Amostral	7,388889
Hipótese Alternativa: média diferente de	7,4
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,307864
Limite Superior	7,469914

A média das medições (7,38) do nível 2100 para a grandeza Potência é igual a 7,4 (P-valor = 0,759 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 7,4.

Potência**Rotação = 2200**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	0,8
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,446813
Média Amostral	7,722222
Hipótese Alternativa: média diferente de	7,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,658167
Limite Superior	7,786278

A média das medições (7,72) do nível 2200 para a grandeza Potência é igual a 7,7 (P-valor = 0,446 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 7,7.

Potência**Rotação = 2300**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	0,426401
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,681057
Média Amostral	8,011111
Hipótese Alternativa: média diferente de	8
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,951022
Limite Superior	8,071201

A média das medições (8,01) do nível 2300 para a grandeza Potência é igual a 8,0 (P-valor = 0,681 > 0,05) e porque o intervalo de confiança contém o valor 8,0.

Potência**Rotação = 2400**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,35921
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,728734
Média Amostral	8,288889
Hipótese Alternativa: média diferente de	8,3
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	8,21756
Limite Superior	8,360218

A média das medições (8,28) do nível 2400 para a grandeza Potência é igual a 8,3 (P-valor = 0,728 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 8,3.

CO₂

Rotação = 1600

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	1,3484
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,214459
Média Amostral	8,455556
Hipótese Alternativa: média diferente de	8,4
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	8,360546
Limite Superior	8,550565

A média das medições (8,45) do nível 1600 para a grandeza CO₂ é igual a 8,4 (P-valor = 0,214 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 8,4.

CO₂

Rotação = 1700

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	0,894427
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,397204
Média Amostral	8,333333
Hipótese Alternativa: média diferente de	8,3
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	8,247394
Limite Superior	8,419273

A média das medições (8,33) do nível 1700 para a grandeza CO₂ é igual a 8,3 (P-valor = 0,397 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 8,3.

CO₂

Rotação = 1800

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	0
Graus de Liberdade	8
P-Valor	1
Média Amostral	8,2
Hipótese Alternativa: média diferente de	8,2
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	8,133431
Limite Superior	8,266569

A média das medições (8,2) do nível 1800 para a grandeza CO₂ é igual a 8,2 (P-valor = 1 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 8,2.

CO₂

Rotação = 1900

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-4,26401
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,002746
Média Amostral	7,988889
Hipótese Alternativa: média diferente de	8,1
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,928799
Limite Superior	8,048978

A média das medições (7,98) do nível 1900 para a grandeza CO₂ é significativamente diferente de 8,1 (P-valor = 0,0027 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 8,1.

CO₂

Rotação = 2000

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,4264
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,681057
Média Amostral	7,888889
Hipotese Alternativa: média diferente de	7,9
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,828799
Limite Superior	7,948978

A média das medições (7,88) do nível 2000 para a grandeza CO₂ é igual a 7,9 (P-valor = 0,681 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 7,9.

CO₂

Rotação = 2100

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	0,229416
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,824302
Média Amostral	7,911111
Hipotese Alternativa: média diferente de	7,9
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,799426
Limite Superior	8,022796

A média das medições (7,91) do nível 2100 para a grandeza CO₂ é igual a 7,9 (P-valor = 0,824 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 7,9.

CO₂

Rotação = 2200

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,4264
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,681057
Média Amostral	8,088889
Hipótese Alternativa: média diferente de	8,1
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	8,028799
Limite Superior	8,148978

A média das medições (8,08) do nível 2200 para a grandeza CO₂ é igual a 8,1 (P-valor = 0,681 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 8,1.

CO₂

Rotação = 2300

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	4,264014
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,002746
Média Amostral	8,211111
Hipótese Alternativa: média diferente de	8,1
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	8,151022
Limite Superior	8,271201

A média das medições (8,21) do nível 2300 para a grandeza CO₂ é significativamente diferente de 8,1 (P-valor = 0,0027 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 8,1.

CO₂

Rotação = 2400

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	3,820092
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,005089
Média Amostral	6,655556
Hipótese Alternativa: média diferente de	6,4
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	6,501289
Limite Superior	6,809822

A média das medições (8,21) do nível 2400 para a grandeza CO₂ é significativamente diferente de 8,0 (P-valor = 0,016 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 8,0.

CO

Rotação = 1600

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	3,820092
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,005089
Média Amostral	6,655556
Hipótese Alternativa: média diferente de	6,4
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	6,501289
Limite Superior	6,809822

A média das medições (6,65) do nível 1600 para a grandeza CO é significativamente diferente de 6,4 (P-valor = 0,005 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 6,4.

CO

Rotação = 1700

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	4,234643
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,002858
Média Amostral	6,955556
Hipótese Alternativa: média diferente de	6,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	6,816391
Limite Superior	7,09472

A média das medições (6,95) do nível 1700 para a grandeza CO é significativamente diferente de 6,7 ($P\text{-valor} = 0,002 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 6,7.

CO

Rotação = 1800

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	4,195907
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,003013
Média Amostral	7,277778
Hipótese Alternativa: média diferente de	7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,125115
Limite Superior	7,43044

A média das medições (7,27) do nível 1800 para a grandeza CO é significativamente diferente de 7,0 ($P\text{-valor} = 0,003 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 7,0.

CO

Rotação = 1900

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	5,938523
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000346
Média Amostral	7,644444
Hipótese Alternativa: média diferente de	7,3
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,510692
Limite Superior	7,778197

A média das medições (7,64) do nível 1900 para a grandeza CO é significativamente diferente de 7,3 (P-valor = 0,0003 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 7,3.

CO

Rotação = 2000

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	1,07872
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,31216
Média Amostral	7,844444
Hipótese Alternativa: média diferente de	7,8
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,749435
Limite Superior	7,939454

A média das medições (7,84) do nível 2000 para a grandeza CO é igual a 7,8 (P-valor = 0,312 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 7,8.

CO

Rotação = 2100

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	1,511858
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,16902
Média Amostral	7,833333
Hipótese Alternativa: média diferente de	7,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,629963
Limite Superior	8,036704

A média das medições (7,83) do nível 2100 para a grandeza CO é igual a 7,7 (P-valor = 0,169 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 7,7.

CO

Rotação = 2200

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	1
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,346594
Média Amostral	7,644444
Hipótese Alternativa: média diferente de	7,6
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	7,541955
Limite Superior	7,746934

A média das medições (7,64) do nível 2200 para a grandeza CO é igual a 7,6 (P-valor = 0,346 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 7,6.

NO

Rotação = 1600

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	4,673155
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,001596
Média Amostral	222,6333
Hipótese Alternativa: média diferente de	210,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	216,7447
Limite Superior	228,5219

A média das medições (222,63) do nível 1600 para a grandeza NO é significativamente diferente de 210,7 ($P\text{-valor} = 0,0015 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 210,7.

NO

Rotação = 1700

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	4,372672
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,002372
Média Amostral	223,1111
Hipótese Alternativa: média diferente de	213,8
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	218,2007
Limite Superior	228,0215

A média das medições (213,8) do nível 1700 para a grandeza NO é significativamente diferente de 213,8 ($P\text{-valor} = 0,0023 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 213,8.

NO**Rotação = 1800**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	3,164043
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,013314
Média Amostral	219,7333
Hipótese Alternativa: média diferente de	212,1
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	214,17
Limite Superior	225,2966

A média das medições (219,73) do nível 1800 para a grandeza NO é significativamente diferente de 212,1 ($P\text{-valor} = 0,013 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 212,1.

NO**Rotação = 1900**

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	3,732783
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,005765
Média Amostral	213,4444
Hipótese Alternativa: média diferente de	204,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	208,0424
Limite Superior	218,8465

A média das medições (213,44) do nível 1900 para a grandeza NO é significativamente diferente de 204,7 ($P\text{-valor} = 0,0057 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 204,7.

NO

Rotação = 2000

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
<i>DADOS DO PROCESSO</i>	
T	2,232296
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,056096
Média Amostral	210,9667
Hipótese Alternativa: média diferente de	205,8
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	205,6294
Limite Superior	216,3039

A média das medições (210,96) do nível 2000 para a grandeza NO é igual a 205,8 (P-valor = 0,056 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 205,8.

NO

Rotação = 2100

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
<i>DADOS DO PROCESSO</i>	
T	-1,18084
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,271582
Média Amostral	213,7889
Hipótese Alternativa: média diferente de	217,5
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	206,5416
Limite Superior	221,0362

A média das medições (213,78) do nível 2100 para a grandeza NO é igual a 217,5 (P-valor = 0,271 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 217,5.

NO

Rotação = 2200

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,03806
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,970572
Média Amostral	218,6
Hipótese Alternativa: média diferente de	218,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	212,5413
Limite Superior	224,6587

A média das medições (218,6) do nível 2200 para a grandeza NO é igual a 218,7 (P-valor = 0,970 > 0,05) e porque o intervalo de confiança contém o valor 218,7.

NO

Rotação = 2300

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	1,34974
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,214046
Média Amostral	222,7556
Hipótese Alternativa: média diferente de	218,5
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	215,485
Limite Superior	230,0261

A média das medições (222,75) do nível 2300 para a grandeza NO é igual a 218,5 (P-valor = 0,214 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 218,5.

NO

Rotação = 2400

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
<i>DADOS DO PROCESSO</i>	
T	0,74441
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,477923
Média Amostral	226,0667
Hipótese Alternativa: média diferente de	222,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	215,6375
Limite Superior	236,4958

A média das medições (226,06) do nível 2400 para a grandeza NO é igual a 222,7 (P-valor = 0,477 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 222,7.

Estatísticas Descritivas –O₂

Rotação = 1600

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
<i>DADOS DO PROCESSO</i>	
T	-5,15727
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000867
Média Amostral	0,944444
Hipótese Alternativa: média diferente de	1,3
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	0,785462
Limite Superior	1,103426

A média das medições (0,944) do nível 1600 para a grandeza O₂ é significativamente diferente de 1,3 (P-valor = 0,0008 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 1,3.

Estatísticas Descritivas –O₂

Rotação = 1700

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-5,36339
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000675
Média Amostral	0,811111
Hipótese Alternativa: média diferente de	1,1
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	0,686903
Limite Superior	0,93532

A média das medições (0,811) do nível 1700 para a grandeza O₂ é significativamente diferente de 1,1 (P-valor = 0,0006 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 1,1.

Estatísticas Descritivas –O₂

Rotação = 1800

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-4,3589
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,002416
Média Amostral	0,688889
Hipótese Alternativa: média diferente de	0,9
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	0,577204
Limite Superior	0,800574

A média das medições (0,688) do nível 1800 para a grandeza O₂ é significativamente diferente de 0,9 (P-valor = 0,0024 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 0,9.

Estatísticas Descritivas –O₂

Rotação = 1900

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-4,47214
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,002077
Média Amostral	0,633333
Hipótese Alternativa: média diferente de	0,8
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	0,547394
Limite Superior	0,719273

A média das medições (0,633) do nível 1900 para a grandeza O₂ é significativamente diferente de 0,8 (P-valor = 0,0020 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 0,8.

Estatísticas Descritivas –O₂

Rotação = 2000

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-3,57771
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,007212
Média Amostral	0,566667
Hipótese Alternativa: média diferente de	0,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	0,480727
Limite Superior	0,652606

A média das medições (0,566) do nível 2000 para a grandeza O₂ é significativamente diferente de 0,7 (P-valor = 0,0072 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 0,7.

Estatísticas Descritivas –O₂

Rotação = 2100

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-6,48745
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000191
Média Amostral	0,555556
Hipótese Alternativa: média diferente de	0,8
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	0,468666
Limite Superior	0,642445

A média das medições (0,555) do nível 2100 para a grandeza O₂ é significativamente diferente de 0,8 (P-valor = 0,0001 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 0,8.

Estatísticas Descritivas –O₂

Rotação = 2200

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-6,82793
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000134
Média Amostral	0,511111
Hipótese Alternativa: média diferente de	0,8
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	0,413544
Limite Superior	0,608678

A média das medições (0,511) do nível 2200 para a grandeza O₂ é significativamente diferente de 0,8 (P-valor = 0,0001 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 0,8.

Estatísticas Descritivas –O₂

Rotação = 2300

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-3,59211
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,007063
Média Amostral	0,488889
Hipotese Alternativa: média diferente de	0,6
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	0,41756
Limite Superior	0,560218

A média das medições (0,488) do nível 2300 para a grandeza O₂ é significativamente diferente de 0,6 (P-valor = 0,007 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 0,6.

Estatísticas Descritivas –O₂

Rotação = 2400

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-3,77297
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,005443
Média Amostral	0,477778
Hipotese Alternativa: média diferente de	0,6
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	0,403077
Limite Superior	0,552479

A média das medições (0,477) do nível 2400 para a grandeza O₂ é significativamente diferente de 0,6 (P-valor = 0,005 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 0,6.

Estatísticas Descritivas –HC

Rotação = 1600

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	5,615038
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000501
Média Amostral	2566,067
Hipótese Alternativa: média diferente de	2036,4
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	2348,541
Limite Superior	2783,592

A média das medições (2566,06) do nível 1600 para a grandeza HC é significativamente diferente de 2036,4 ($P\text{-valor} = 0,0005 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 2036,4.

Estatísticas Descritivas –HC

Rotação = 1700

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	5,355075
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000682
Média Amostral	2574,2
Hipótese Alternativa: média diferente de	2053,9
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	2350,148
Limite Superior	2798,252

A média das medições (2574,2) do nível 1700 para a grandeza HC é significativamente diferente de 2053,9 ($P\text{-valor} = 0,0006 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 2053,9.

Estatísticas Descritivas –HC

Rotação = 1800

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	5,449342
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000609
Média Amostral	2880,556
Hipótese Alternativa: média diferente de	2306,8
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	2637,759
Limite Superior	3123,352

H0 = 2306,8 Conf: 0,95 Hipótese: diferente de 2306,8

A média das medições (2880,5) do nível 1800 para a grandeza HC é significativamente diferente de 2306,8 (P-valor = 0,0006 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 2306,8.

Estatísticas Descritivas –HC

Rotação = 1900

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	5,528313
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000555
Média Amostral	3195,767
Hipótese Alternativa: média diferente de	2571,9
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	2935,536
Limite Superior	3455,998

H0 = 2571,9 Conf: 0,95 Hipótese: diferente de 2571,9

A média das medições (3195,7) do nível 1900 para a grandeza HC é significativamente diferente de 2571,9 (P-valor = 0,0005 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 2571,9.

Estatísticas Descritivas –HC

Rotação = 2000

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	5,49563
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000577
Média Amostral	3471,556
Hipótese Alternativa: média diferente de	2930,6
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	3244,567
Limite Superior	3698,544

H0 = 2930,6 Conf: 0,95 Hipótese: diferente de 2930,6

A média das medições (3471,5) do nível 2000 para a grandeza HC é significativamente diferente de 2930,6 (P-valor = 0,0005 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 2930,6.

Estatísticas Descritivas –HC

Rotação = 2100

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	6,551957
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000178
Média Amostral	3630,167
Hipótese Alternativa: média diferente de	2730,7
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	3313,593
Limite Superior	3946,74

H0 = 2730,7 Conf: 0,95 Hipótese: diferente de 2730,7

A média das medições (3630,1) do nível 2100 para a grandeza HC é significativamente diferente de 2730,7 (P-valor = 0,0001 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 2730,7.

Estatísticas Descritivas –HC

Rotação = 2200

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	6,560583
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000177
Média Amostral	3575,933
Hipótese Alternativa: média diferente de	2663,4
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	3255,184
Limite Superior	3896,683

H0 = 2663,4 Conf: 0.95 Hipótese: diferente de 2663,4

A média das medições (3575,9) do nível 2200 para a grandeza HC é significativamente diferente de 2663,4 ($P\text{-valor} = 0,0001 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 2663,4.

Estatísticas Descritivas –HC

Rotação = 2300

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	6,49073
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,00019
Média Amostral	3801,533
Hipótese Alternativa: média diferente de	2959,4
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	3502,343
Limite Superior	4100,724

H0 = 2959,4 Conf: 0.95 Hipótese: diferente de 2959,4

A média das medições (3801,5) do nível 2300 para a grandeza HC é significativamente diferente de 2959,4 ($P\text{-valor} = 0,0001 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 2959,4.

Estatísticas Descritivas –HC

Rotação = 2400

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-0,01612
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,987536
Média Amostral	3403,467
Hipótese Alternativa: média diferente de	3408,5
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	2683,301
Limite Superior	4123,633

H0 = 3408.5 Conf: 0.95 Hipótese: diferente de 3408.5

A média das medições (3403,4) do nível 2400 para a grandeza HC é igual a 3408,5 (P-valor = 0,987 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 3408,5.

Estatísticas Descritivas –CEC

Rotação = 1600

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	0,907715
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,390552
Média Amostral	460,5822
Hipótese Alternativa: média diferente de	457,15
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	451,8628
Limite Superior	469,3016

H0 = 457.15 Conf: 0.95 Hipótese: diferente de 457.15

A média das medições (460,58) do nível 1600 para a grandeza CEC é igual a 457,15 (P-valor = 0,390 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 457,15.

Estatísticas Descritivas –CEC

Rotação = 1700

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	2,547095
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,03433
Média Amostral	465,7244
Hipótese Alternativa: média diferente de	451,73
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	453,0546
Limite Superior	478,3943

H0 = 451,73 Conf: 0.95 Hipótese: diferente de 451,73

A média das medições (465,72) do nível 1700 para a grandeza CEC é significativamente diferente de 451,73 ($P\text{-valor} = 0,034 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 451,73.

Estatísticas Descritivas –CEC

Rotação = 1800

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	3,332852
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,01034
Média Amostral	470,3133
Hipótese Alternativa: média diferente de	448,53
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	455,2414
Limite Superior	485,3852

H0 = 448,53 Conf: 0.95 Hipótese: diferente de 448,53

A média das medições (470,31) do nível 1800 para a grandeza CEC é significativamente diferente de 448,53 ($P\text{-valor} = 0,010 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 448,53.

Estatísticas Descritivas –CEC

Rotação = 1900

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	2,703172
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,026941
Média Amostral	481,4578
Hipotese Alternativa: média diferente de	469,14
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	470,9498
Limite Superior	491,9657

H0 = 469,14 Conf: 0,95 Hipótese: diferente de 469,14

A média das medições (481,45) do nível 1900 para a grandeza CEC é significativamente diferente de 469,14 ($P\text{-valor} = 0,026 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 469,14.

Estatísticas Descritivas –CEC

Rotação = 2000

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	3,032498
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,016248
Média Amostral	494,6067
Hipotese Alternativa: média diferente de	485,36
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	487,5752
Limite Superior	501,6381

H0 = 485,36 Conf: 0,95 Hipótese: diferente de 485,36

A média das medições (494,60) do nível 2000 para a grandeza CEC é significativamente diferente de 485,36 ($P\text{-valor} = 0,016 < 0,05$) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 485,36.

Estatísticas Descritivas –CEC

Rotação = 2100

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	3,687674
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,006151
Média Amostral	491,5267
Hipótese Alternativa: média diferente de	478,22
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	483,2056
Limite Superior	499,8477

H0 = 478.22 Conf: 0.95 Hipótese: diferente de 478.22

A média das medições (491,52) do nível 2100 para a grandeza CEC é significativamente diferente de 478,22 (P-valor = 0,0061 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 478,22.

Estatísticas Descritivas –CEC

Rotação = 2200

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	5,111148
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,000917
Média Amostral	491,9956
Hipótese Alternativa: média diferente de	475,6
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	484,5983
Limite Superior	499,3928

H0 = 475.6 Conf: 0.95 Hipótese: diferente de 475.6

A média das medições (491,99) do nível 2200 para a grandeza CEC é significativamente diferente de 475,62 (P-valor = 0,0009 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 475,6.

Estatísticas Descritivas –CEC

Rotação = 2300

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	2,660079
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,028802
Média Amostral	498,7122
Hipótese Alternativa: média diferente de	483,1
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	485,1781
Limite Superior	512,2464

A média das medições (498,71) do nível 2300 para a grandeza CEC é significativamente diferente de 483,1 (P-valor = 0,028 < 0,05) e também porque o intervalo de confiança não contém o valor 483,1.

Estatísticas Descritivas –CEC

Rotação = 2400

TESTE T - AMOSTRA ÚNICA	
DADOS DO PROCESSO	
T	-1,0968
Graus de Liberdade	8
P-Valor	0,304641
Média Amostral	482,9333
Hipótese Alternativa: média diferente de	499,84
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	447,3875
Limite Superior	518,4792

A média das medições (482,93) do nível 2400 para a grandeza CEC é igual a 499,84 (P-valor = 0,306 > 0,05) e também porque o intervalo de confiança contém o valor 499,84.