

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

**ÉSTERES COMBUSTÍVEIS EM MOTOR DE CICLO
DIESEL SOB CONDIÇÕES DE PRÉ-AQUECIMENTO
E VARIAÇÃO NO AVANÇO DE INJEÇÃO**

TESE DE DOUTORADO

Paulo Romeu Moreira Machado

Santa Maria, RS, Brasil.

2008

**ÉSTERES COMBUSTÍVEIS EM MOTOR DE CICLO
DIESEL SOB CONDIÇÕES DE PRÉ-AQUECIMENTO
E VARIAÇÃO NO AVANÇO DE INJEÇÃO**

por

Paulo Romeu Moreira Machado

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

Orientador: **Prof. Dr. José Fernando Schlosser**

Santa Maria, RS, Brasil.

2008

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

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

**ÉSTERES COMBUSTÍVEIS EM MOTOR DE CICLO
DIESEL SOB CONDIÇÕES DE PRÉ-AQUECIMENTO
E VARIAÇÃO NO AVANÇO DE INJEÇÃO**

elaborada por
Paulo Romeu Moreira Machado

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. José Fernando Schlosser
(Presidente/Orientador)

Prof. Carlos Antonio da Costa Tillmann, Dr. (UFPEL)

Prof. Inácio da Fontoura Limberger, Dr. (UFSM)

Prof. Ademar Michels, Dr. (UFSM)

Prof. Arno Udo Dallmeyer, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 23 de abril de 2008.

Dedico à

meus filhos: *Gabriel, Amanda, Theo,*
Lucca e Enzo

e

à meus queridos pais *Admar e Geny* que, através de seu sacrifício me deixaram a sua maior herança: me deram a oportunidade de estudar.

AGRADECIMENTOS

Ao meu amigo e mestre orientador Prof. Dr. *José Fernando Schlosser*, pela paciência infinita e competência reconhecida.

Ao meu amigo *José Antonio Sala* pela ajuda nos ensaios e dedicação a este trabalho de pesquisa.

Aos acadêmicos do Curso de Engenharia Química, Flávio Dias Mayer e Seimur Tiago Serafini, que orientados pelo Prof. Ronaldo Hoffmann prestaram uma valiosa contribuição para viabilizar a realização dos ensaios de emissões residuais.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de afastamento para qualificação.

À estrela-guia, por tudo.

À Jumaida por cuidar dos nossos.

À Universidade Federal de Santa Maria, o melhor lugar para se trabalhar.

À meu Deus, pai e amigo velho.

“O motor Diesel pode ser alimentado com óleos vegetais e poderá ajudar consideravelmente o desenvolvimento da agricultura nos países onde ele funcionar. Isto parece um sonho do futuro, mas eu posso predizer com inteira convicção que esse modo de emprego do motor Diesel pode, num tempo dado, adquirir uma grande importância”.

Rudolphe Diesel, 1912.

RESUMO

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

ÉSTERES COMBUSTÍVEIS EM MOTOR DE CICLO DIESEL SOB CONDIÇÕES DE PRÉ-AQUECIMENTO E VARIAÇÃO NO AVANÇO DE INJEÇÃO

Autor: PAULO ROMEU MOREIRA MACHADO

Orientador: JOSÉ FERNANDO SCHLOSSER

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 23 de abril de 2008.

O renovado interesse por energia da biomassa é apoiado na necessidade de fontes alternativas de energia e de proteção ambiental. Recentemente, devido ao aumento dos preços do óleo cru, a limitação de seus recursos e as questões relacionadas ao ambiente, um renovado foco passou a existir sobre os óleos vegetais e gorduras animais para produção de um biodiesel combustível. O que é conhecido como biodiesel (éster metílico ou etílico) é um óleo vegetal ou gordura animal tratado quimicamente para substituir o combustível diesel tradicional. Parâmetros de desempenho e emissões de exaustão foram investigados para um motor diesel alimentado com ésteres etílicos de óleo de girassol e de sebo bovino e por uma mistura composta pelo éster etílico de óleo de girassol e pelo metílico de sebo bovino numa proporção volumétrica igual (50,0%+50,0%). Os ésteres estavam sujeitos ao pré-aquecimento segundo duas faixas de temperaturas, chamadas de T55 (50 a 60°C) e T75 (70 a 80°C), como forma de redução da viscosidade. Os testes foram conduzidos sob condição de carga máxima em um motor diesel de quatro cilindros, quatro tempos e de injeção indireta de combustível. Os ensaios de curta duração foram efetuados em uma faixa de rotações compreendida entre 1900 e 4400 *rpm*. O ponto de avanço de injeção foi atrasado em relação ao ponto original recomendado pelo fabricante. Os testes foram conduzidos utilizando o mesmo motor e os mesmos procedimentos de testes para permitir a comparação dos valores obtidos. Nos ensaios foram obtidos os valores de potência, torque, consumo específico de combustível e gases de exaustão. A análise dos resultados indica que o nível de pré-aquecimento tem influência sobre o desempenho dos ésteres utilizados. Os ensaios conduzidos à T55 mostraram melhores valores para torque (N.m), potência (kW) e consumo específico de combustível ($\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$) que os testes executados à T75. Os melhores resultados do experimento foram obtidos pelo éster etílico de girassol e pela mistura contendo 50,0% de éster etílico de girassol e 50% de éster metílico de sebo bovino, sob 2° (P2) de atraso no ponto de injeção e aquecidos na faixa de temperaturas de T55. Os resultados indicam que, pelo uso do biodiesel, as emissões prejudiciais (CO, HC e NO_x) podem ser reduzidas aos mesmos níveis do B2 através do ajuste apropriado do ponto de avanço da injeção e o pré-aquecimento do combustível.

Palavras-chave:

Biocombustíveis; biodiesel; éster etílico; sebo, girassol, pré-aquecimento; motor diesel.

ABSTRACT

Doctoral Thesis

Graduate program in agricultural engineering
Federal University of Santa Maria**ESTERS FUELS IN DIESEL ENGINES UNDER PRE-HEATING
CONDITIONS AND VARYING INJECTION TIMING**(Ésteres combustíveis em motor de ciclo diesel sob condições de pré-aquecimento
e variação no avanço de injeção)

Author: PAULO ROMEU MOREIRA MACHADO

Adviser: JOSÉ FERNANDO SCHLOSSER

Santa Maria, April 23th, 2008.

The renewed interest in energy for biomass is supported by the need for different energy sources and the need to protect the environment. Recently, because of increases in crude oil prices, limited resources of fossil oil and environmental concerns there has been renewed focus on vegetable oils and animal fats to make a biodiesel fuel. What is known as biodiesel (methyl or ethyl esters) is a vegetable oil or animal fat chemically treated to replace traditional diesel fuel. Performance parameters and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with sunflower and beef tallow ethyl esters and a blend of ethyl and methyl esters, subjected to pre-heating at two temperatures ranges, namely T55 (50 to 60°C) and T75 (70 to 80°C), in order to lower its viscosities, have been investigated. Tests were carried out at full load conditions in a four cylinders, four-stroke indirect injection diesel engine. Engine tests, short-term, were conducted at a range speed from 1900 to 4400 *rpm*. The injection timing was retarded from the manufacturer's recommended setting. The tests were carried out using the same engine and test procedures so that comparative assessments may be made. The tests data were used for evaluating the brake power, exhaust gas temperatures, specific fuel consumption and gaseous emissions. The analysis of the results determined that the level of pre-heating have influence on the performance for used esters. The tests performed at T55 showed the best values of torque (N.m), power (kW) and specific fuel consumption ($\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$) that the tests performed at T75. The bests experiments results were obtained with sunflower ethyl ester and the blend containing 50,0% sunflower ethyl ester and 50,0% beef tallow methyl ester, at -2° BTDC and T55 temperature range. The findings showed that, by using biodiesel, harmful emissions (CO , HC and NO_x) can be reduced to some extent of B2 by adjusting the injection pump timing properly and pre-heating of fuel.

Key-words:

Biofuels; biodiesel; ethyl ester; tallow; sunflower; preheating; diesel engine.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	Principais processos de conversão de biomassa	22
FIGURA 2 -	Fontes dos principais biocombustíveis líquidos para automotores	23
FIGURA 3 -	Representação esquemática do processo de transesterificação	34
FIGURA 4 -	A caracterização do jato combustível em injetores de orifício único	42
FIGURA 5 -	Dispositivo manual de teste de injetores	59
FIGURA 6 -	Grupos componentes da bomba distribuidora BOSCH VE	63
FIGURA 7 -	Disco de grau instalado no comando de válvulas	67
FIGURA 8 -	Detalhe do estator e do rotor do dinamômetro hidráulico utilizado	69
FIGURA 9 -	Motor de testes na bancada dinamométrica	70
FIGURA 10 -	Termopar tipo K utilizado para obtenção das temperaturas dos gases residuais de combustão	73
FIGURA 11 -	Termopar tipo T utilizado para obtenção da temperatura do fluido de arrefecimento	74
FIGURA 12 -	Psicrômetro de fluxo contínuo para anotação das temperaturas de bulbo seco e úmido (tbs/tbu)	75
FIGURA 13 -	Resistência elétrica para aquecimento dos combustíveis de teste..	80
FIGURA 14 -	Equipamento analisador de gases residuais	83
FIGURA 15 -	Sonda de gases instalada na tubulação de descarga do motor no dinamômetro	84
FIGURA 16 -	Exemplos de jatos produzidos pelos combustíveis nos testes (a) óleo diesel B2, TA; (b) éster etílico de sebo bovino, TA; (c) éster etílico de sebo bovino, T55; (d) éster etílico de sebo bovino, T75	93
FIGURA 17 -	Variação da densidade dos ésteres com a temperatura	95
FIGURA 18 -	Torque para o éster etílico de óleo de girassol, ponto original (PO), três temperaturas	97
FIGURA 19 -	Torque para o éster etílico de óleo de sebo bovino, ponto original (PO), três temperaturas	97
FIGURA 20 -	Torque para a mistura de ésteres, ponto original (PO), três temperaturas	98

FIGURA 21 - Torque para o éster etílico de girassol, ponto atrasado em 2° (P2), três temperaturas	101
FIGURA 22 - Torque para o éster etílico de sebo bovino, ponto atrasado em 2° (P2), três temperaturas	101
FIGURA 23 - Torque para a mistura de ésteres, ponto atrasado em 2° (P2), três temperaturas	102
FIGURA 24 - Torque para o éster etílico de girassol, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas	104
FIGURA 25 - Torque para o éster etílico de sebo bovino, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas	104
FIGURA 26 - Torque para a mistura de ésteres, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas	105
FIGURA 27 - Potência para o éster etílico de girassol, ponto original (PO), três temperaturas	108
FIGURA 28 - Potência para o éster etílico de sebo bovino, ponto original (PO), três temperaturas	108
FIGURA 29 - Potência para a mistura de ésteres, ponto original (PO), três temperaturas	109
FIGURA 30 - Potência para o éster etílico de girassol, ponto atrasado em 2° (P2), três temperaturas	110
FIGURA 31 - Potência para o éster de sebo bovino, ponto atrasado em 2° (P2), três temperaturas	110
FIGURA 32 - Potência para a mistura de ésteres, ponto atrasado em 2° (P2), três temperaturas	111
FIGURA 33 - Potência para o éster etílico de girassol, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas	113
FIGURA 34 - Potência para o éster de sebo bovino, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas	113
FIGURA 35 - Potência para a mistura de ésteres, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas	114
FIGURA 36 - Torque para os melhores resultados do experimento	116
FIGURA 37 - Potência para os melhores resultados do experimento	117
FIGURA 38 - Consumo específico de combustível, resultados para os melhores tratamentos	119
FIGURA 39 - Temperatura de gases de exaustão, melhores tratamentos	120
FIGURA 40 - Emissões residuais de combustão, melhores resultados, CO	122
FIGURA 41 - Emissões residuais de combustão, melhores resultados, HC	123
FIGURA 42 - Emissões residuais de combustão, melhores resultados, NOx	124

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Principais características dos combustíveis para motores diesel	29
QUADRO 2 – Propriedades complementares atribuídas ao biodiesel	32
QUADRO 3 – Problemas relacionados à utilização de ésteres metílicos como combustível em motores ICO	36
QUADRO 4 – Comparação entre o biodiesel etílico e o diesel convencional considerando as suas principais características relacionadas ao desempenho do motor	38
QUADRO 5 – Comparação entre rotas de produção de biodiesel	39
QUADRO 6 – Vantagens e desvantagens da utilização de metanol e etanol para produção de biodiesel	40
QUADRO 7 – Denominação dos combustíveis utilizados no experimento	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Dados de viscosidade para o biodiesel de alguns óleos e gorduras	26
TABELA 2 -	Variação das principais propriedades físicas de ésteres e suas misturas com diesel convencional a 80°C	45
TABELA 3 -	Especificações preliminares para o biodiesel utilizado no Brasil .	50
TABELA 4 -	Especificações para o óleo diesel padrão de ensaios de consumo e de emissões utilizado no Brasil	51
TABELA 5 -	Temperaturas de pré-aquecimento utilizadas	61
TABELA 6 -	Características técnicas originais do motor de ensaios	62
TABELA 7 -	Valores de avanço de injeção utilizados no experimento	64
TABELA 8 -	Rotações do motor para os ensaios de emissões residuais de combustão	68
TABELA 9 -	Rotações para determinação do consumo específico de combustível	78
TABELA 10 -	Tratamentos do experimento	82
TABELA 11 -	Especificações do fabricante para dados de desempenho do motor VW BE	90
TABELA 12 -	Desempenho obtido com o óleo diesel B2	91

LISTA DE REDUÇÕES

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AEHC – Álcool etílico hidratado combustível
- ANOVA – Análise da Variância
- ANP – Agência Nacional de Petróleo
- APMS – Anterior ao ponto morto superior do pistão
- ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning*
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- atm – Atmosfera (unidade de pressão = 101.325 Pa)
- bar, bars – Unidade de pressão (equivalente a $10^5 Pa$)
- B_{XX} – Nomenclatura para o percentual de biodiesel presente na mistura com diesel
- B2 – Óleo diesel em mistura, 98% de diesel de petróleo e 2% de biodiesel
- B3 – Óleo diesel em mistura, 97% de diesel de petróleo e 3% de biodiesel
- B4 – Óleo diesel em mistura, 96% de diesel de petróleo e 4% de biodiesel
- B50 – Óleo diesel em mistura, 50% de diesel de petróleo e 50% de biodiesel
- B100 – Biodiesel integral (puro, sem misturas)
- °C – Temperatura em grau *Celsius*
- CCR – Centro de Ciências Rurais da UFSM
- CENEA – Centro Nacional de Engenharia Agrícola
- CFR – Co-operative Fuel Research
- C_h – Consumo horário de combustível (em g.h⁻¹)
- CO – Monóxido de Carbono
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- C_s – Consumo específico de combustível (em g.kW⁻¹.h⁻¹ ou g.cv⁻¹.h⁻¹)
- cSt – Centistokes (unidade de viscosidade cinemática = mm².s⁻¹)

CT – Centro de Tecnologia da UFSM
cv – Cavalo-vapor (unidade de potência = 0,7355 kW)
DIN – Deutsches Institut für Normung
dm³ – Decímetro cúbico (Unidade de volume – SI, submúltiplo, equivalente a 1 litro)
D500 – Diesel metropolitano, teor de enxofre inferior a 0,05% (500 ppm)
N.m – Newton.metro, unidade de torque
EMOS – Éster metílico de óleo de soja
EPA – Environmental Protection Agency, EUA
ETGIR – Éster etílico de óleo de girassol
EUA – Estados Unidos da América do Norte
4T – Ciclo mecânico de quatro tempos (quatro cursos do pistão)
fa – Fator atmosférico para motores de ignição por compressão
FIE – Fuel Injection Equipment Manufacturers, USA.
Fm – Fator do motor para motores de ignição por compressão
FS – Fator de sensibilidade
g.cv⁻¹.h⁻¹ – Gramas por cv por hora (unidade de consumo específico)
g.kW⁻¹.h⁻¹ – Gramas por kW por hora (unidade de consumo específico)
HC – Hidrocarbonetos
HCl – Ácido clorídrico
H₂SO₄ – Ácido sulfúrico
HPN – Heptametilnonano
IC – Índice de cetano
ICMS – Imposto sobre circulação de mercadorias
ICO – Ignição por compressão
ICE – Ignição por centelha
IGM – Ispettorato Generale della Motorizzazione
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
Kd - Fator de redução para potência de motores de ciclo diesel
kgf – Quilograma-força (unidade de peso = 9,80665 N)
kgf/cm² – Quilograma-força por centímetro quadrado, unidade de pressão
kg/l – Densidade do combustível
kPa – Quilopascal, unidade de pressão – SI, múltiplo
kW – Unidade de potência no SI (equivale a 1 kJ.s⁻¹), múltiplo
lbf.ft – Libra-força . pé – Unidade de torque, unidades americanas

LII – Límpido e isento de impurezas
 λ – Relação entre a mistura ar/combustível utilizada (RAC) e a R_{est}
 MDL – Mecanismos de desenvolvimento limpo
 MHz – Megahertz , Unidade de frequência no SI
 MISTURA – Mistura de éster etílico/metílico (50%+50%)
 MJ/kg – Poder calorífico do combustível (energia por unidade de massa)
 MJ/m³ – Densidade de energia da mistura ar/combustível (por unidade de volume)
 mm – Milímetros
 mm².s⁻¹ – Unidade de viscosidade cinemática (cSt)
 MP – Material particulado
 M_t – Momento (torque – em daN.m ou kgf.m)
 n – Rotação (em *rpm*)
 N – Newton (unidade de força no SI = 1/9,80665 kgf)
 NaOH – Hidróxido de sódio
 NBR, NB – Norma Brasileira
 NC – Número de cetano
 N_e – Potência efetiva (em kW)
 N.m – Torque (unidade de momento no SI)
 NO_x – Óxidos de Nitrogênio
 O₂ – Oxigênio
 OD – Óleo diesel
 ONU – Organização das Nações Unidas
 p – pressão
 Pa – *Pascal* (unidade de pressão no SI equivalente a 1 N.m⁻²)
 pb – Pressão barométrica (pressão atmosférica)
 PCI – Poder calorífico inferior do combustível
 PCS – Poder calorífico superior do combustível
 PMI – Ponto morto inferior do pistão
 PMS – Ponto morto superior do pistão
 PPGEA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFSM
 ppm – Partes por milhão (0,01%)
 ps – Pressão do ar seco (em *kPa*)
 RAC – Relação ar/combustível que o motor utiliza em cada condição de funcionamento

R_{est} – Relação estequiométrica (relação ar/combustível ideal)

rpm – Rotações por minuto (velocidade angular do motor)

RS – Rio Grande do Sul

SAE – Society of Automotive Engineers

SEBO – Éster etílico de gordura bovina

SI – Sistema Internacional de Unidades

STD – Standard (padrão, original)

t – temperatura

TAG – Triacilgliceróis (triglicerídeos)

tbs – Temperatura de bulbo seco (°C)

tbu – Temperatura de bulbo úmido (°C)

TDP – Tomada de potência (máquinas agrícolas)

u – umidade

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

USA – United States of América

V – Volts (Unidade de tensão elétrica)

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Principais especificações técnicas dos ésteres combustíveis utilizados no experimento	135
TABELA A1 – Algumas especificações técnicas do éster etílico de óleo de girassol	136
TABELA A2 – Algumas especificações técnicas do éster etílico de óleo de sebo bovino	137
TABELA A3 – Algumas especificações técnicas da mistura de ésteres	138
TABELA A4 – Algumas especificações técnicas do éster metílico de sebo bovino	139
TABELA A5 – Especificações técnicas para o óleo diesel	140
ANEXO B – Variação da viscosidade dos ésteres com a temperatura	141
FIGURA B1 - Variação da viscosidade dos ésteres com a temperatura	142

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE REDUÇÕES	xiii
LISTA DE ANEXOS	xvii
1 INTRODUÇÃO	
1.1 O uso de biocombustíveis em motores diesel	01
1.2 Avaliação de desempenho do motor de ciclo diesel com diferentes combustíveis	05
1.3 Objetivo geral do trabalho de pesquisa	06
1.4 Objetivos específicos	07
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 Considerações iniciais	08
2.2 Tipos de motor de combustão interna – Motor Otto e Diesel	09
2.3 O processo de combustão em motores	09
2.3.1 Chama em pré-mistura e chama difusa	10
2.3.2 Controle de velocidade e carga dos motores diesel	12
2.3.3 Formação da mistura e auto-ignição	12
2.3.4 O atraso ou retardo de ignição	14
2.3.5 O complexo processo de combustão nos motores diesel	16
2.3.6 A batida no motor diesel	16
2.4 Combustíveis para motores diesel	18

2.4.1 Viabilidade de um combustível	18
2.4.2 A energia dos combustíveis – Calor de combustão, poder ou valor calorífico	19
2.4.3 O óleo diesel no Brasil	20
2.4.4 A energia da biomassa	21
2.4.5 Biocombustíveis importantes para o Brasil	22
2.5 Principais requisitos dos combustíveis considerados no trabalho	24
2.5.1 Viscosidade	25
2.5.2 Número de cetano – NC	26
2.5.3 Densidade	27
2.6 O biodiesel	30
2.7 O processo de transesterificação e suas matérias-primas	32
2.8 O biodiesel metílico	35
2.9 O biodiesel etílico	37
2.10 A importância do jato de injeção	41
2.11 A importância do avanço inicial de injeção	42
2.12 O uso de pré-aquecimento de biocombustíveis	43
2.13 As emissões residuais dos motores diesel	46
2.13.1 A formação de fumaça nos motores diesel	46
2.13.2 As emissões do biodiesel e de suas misturas com diesel de petróleo	47
2.14 Desempenho de motores alimentados com biodiesel	48
2.15 Especificações do biodiesel	49
2.16 Ensaio de um motor de combustão e suas curvas características	52
2.16.1 Dinamômetros e ensaios de motores	52
2.16.2 Curvas características de motores de combustão	54
3 MATERIAIS E METODOLOGIA	
3.1 Considerações iniciais	55
3.2 Local do experimento	56
3.3 Os combustíveis	57
3.3.1 O óleo diesel B2	57
3.3.2 Os ésteres combustíveis utilizados	57
3.4 Os testes de bicos injetores	59
3.5 Os valores de temperatura de pré-aquecimento dos combustíveis	60
3.6 O motor utilizado no experimento	61

3.7 A bomba injetora do motor diesel dos ensaios	63
3.8 Ajustes do ponto de avanço de injeção	64
3.9 Condições de carga de alimentação	67
3.10 Ensaio realizados em dinamômetro	68
3.10.1 O freio hidráulico de absorção	68
3.10.2 Montagem do motor na bancada	70
3.10.3 Relação entre os valores obtidos	71
3.10.4 O sistema de aquisição de dados	72
3.10.5 Cálculo dos fatores de redução de potência	74
3.11 Consumo específico de combustível	77
3.11.1 Método da balança	77
3.12 Sistema de aquecimento do combustível	79
3.13 Delineamento experimental	81
3.14 Avaliação dos gases residuais da combustão	83
3.15 A avaliação das variações de densidades com a temperatura	85
3.16 A observação dos jatos atomizados	85
3.17 A análise estatística dos resultados	86
3.17.1 Testes de normalidade da distribuição dos dados	86
3.17.2 Análise da variância e “não-paramétrica”	88
3.18 Considerações finais da seção	88

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Os ensaios com óleo diesel B2 (testemunha)	91
4.2 Os testes de injetores e a forma do jato pulverizado	91
4.3 Efeito do aquecimento sobre a densidade dos combustíveis	94
4.4 Influência da temperatura dos combustíveis sobre o desempenho	95
4.4.1 Ponto de avanço inicial da injeção (P0) – Resultados para a variável Torque	95
4.4.2 Ponto de avanço inicial da injeção (P2) – Resultados para a variável Torque	100
4.4.3 Ponto de avanço inicial da injeção (P4) – Resultados para a variável Torque	103
4.4.4 Ponto de avanço inicial da injeção (P0) – Resultados para a variável Potência	107
4.4.5 Ponto de avanço inicial da injeção (P2) – Resultados para a variável Potência	109

4.4.6. Ponto de injeção inicial da injeção (P4) – Resultados para a variável Potência	112
4.5 Análise dos melhores resultados	115
4.6 Consumo específico de combustível – Resultados expressivos	118
4.7 Temperatura de gases de exaustão	120
4.8 Emissões residuais de combustão – Resultados expressivos	121
4.8.1 Emissões de CO	121
4.8.2 Emissões de HC não-queimado	122
4.8.3 Emissões de NOx	123
5 CONCLUSÕES	125
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
7 ANEXOS	135

1 INTRODUÇÃO

1.1 O uso de biocombustíveis em motores diesel

A tendência do uso de biocombustíveis é consolidar-se ao longo dos próximos anos. De um sonho de ambientalistas há décadas, adquiriu recentemente o *status* de real agente redutor das emissões de gases tóxicos. Na pressão ambiental, centrada na necessidade de contenção das emissões tóxicas e de gases de efeito estufa, é que reside a efetiva motivação para o uso de combustíveis oriundos da biomassa em substituição aos derivados do petróleo. A biomassa se constitui além de fonte de suprimento alimentar, numa fonte continuamente renovável de energéticos.

Mais significativo que as sucessivas crises causadas pela possível depleção das reservas mundiais de petróleo foi o reconhecimento do potencial dos biocombustíveis como elementos menos agressivos ao ambiente do que os derivados de petróleo. Também, a rápida difusão dos conhecimentos gerados pela pesquisa com biocombustíveis, que continuamente favorece a minimização de seus custos de produção e de utilização, contribuiu para esse novo cenário mundial.

A contribuição do Brasil, para essa realidade emergente, não pode deixar de ser reconhecida, desde o pioneirismo de uso do etanol em larga escala e da consolidação do motor multicomcombustível (*flex*) até o recente avanço do biodiesel no país. O uso do etanol como combustível para motores de ciclo Otto, em substituição à gasolina, está consolidado no Brasil e ganha, agora, projeção mundial com os diversos acordos de cooperação comercial e tecnológica com outros países.

Em referência aos biocombustíveis destinados ao uso em motores de ciclo diesel, o Brasil busca alcançar, de forma rápida, o grau de desenvolvimento que outros países já atingiram para a utilização do biodiesel, que é a principal alternativa ao óleo diesel mineral reconhecida atualmente.

A aplicação de óleos vegetais *in natura* nos motores, também está conquistando seu espaço, mesmo que limitada por algumas de suas propriedades físicas e químicas, pois a

viscosidade elevada, a baixa volatilidade e o número de cetano reduzido, causam problemas funcionais que dificultam a combustão e produzem depósitos indesejáveis no motor.

Os óleos e as gorduras animais, quando utilizados como combustível em sua forma natural, apresentam as mesmas restrições que os óleos vegetais *in natura*. Dentre as estratégias utilizadas para redução de problemas funcionais, as misturas com óleo diesel em diferentes proporções, o pré-aquecimento de óleos e gorduras *in natura* e a transformação dos mesmos em ésteres combustíveis, são as preferenciais. As maiores razões para que os óleos e gorduras animais devam ser modificados, é a viscosidade, significativamente maior que a do óleo diesel mineral, a glicerina presente na sua composição e a acroleína produzida na combustão e emitida nos gases de exaustão.

O processo mais utilizado para a transformação dos óleos crus, adequando-os ao uso em motores diesel, é a reação de transesterificação, ou seja, um processo relativamente simples e que permite a obtenção de ésteres combustíveis com propriedades semelhantes às do diesel de petróleo. Na transesterificação, os óleos vegetais e gorduras animais reagem com um álcool de cadeia curta na presença de um catalisador, produzindo, assim, ésteres alquílicos e separando a glicerina.

Os ésteres combustíveis resultantes da transesterificação são reconhecidos mundialmente pela designação de biodiesel. O biodiesel pode ser produzido a partir de variadas matérias-primas. O fator geográfico é o de maior influência para a seleção, dentre as múltiplas possibilidades. As maiores frações do biodiesel produzido no mundo derivam do óleo de soja, ao utilizar-se o metanol como álcool de processo e um catalisador alcalino. Porém, todos os óleos vegetais ou gorduras animais classificadas como óleos fixos ou triglicerídeos, podem ser transformados em biodiesel com outros tipos de álcoois e de catalisadores.

O tipo de álcool utilizado na transesterificação determina o tipo de éster alquílico correspondente. É um éster metílico, se produzido com metanol, ou um éster etílico, se produzido com etanol. Como exemplos mundiais, devem ser citados os casos dos Estados Unidos, onde o óleo de soja e os resíduos de cocção são as principais fontes de produção de ésteres metílicos. Também a União Européia, onde os óleos de base para a obtenção do biodiesel são originários da colza e do girassol. Na Alemanha, em particular, se utiliza o óleo de colza para a produção de um éster metílico, que pode ser comercializado de forma pura, isento de qualquer mistura ou aditivação.

Quase a totalidade do biodiesel produzido no mundo caracteriza-se por ser um éster metílico e, para o caso brasileiro, o processo de obtenção desse biocombustível, deverá

utilizar a soja, a mamona, o dendê e o girassol. Atualmente, são as oleaginosas de maior potencial para produção de um biodiesel, que deverá ser etílico.

Como o etanol já é produzido em larga escala, o domínio e evolução constante da tecnologia de transesterificação etílica podem tornar o processo produtivo de biodiesel totalmente independente do petróleo, caracterizando-o como um combustível nacional de natureza agrícola completa.

A criação do Programa Brasileiro de Biodiesel, no contexto de um programa maior de incentivo à produção e utilização de biocombustíveis, é um claro indicativo de que haverá novamente uma alteração nas características da cadeia produtiva e de abastecimento de combustíveis no Brasil.

Com a implantação do Programa, cuja base contempla também a utilização do biodiesel etílico, o contínuo aperfeiçoamento dos motores multicompostíveis e a recente demanda mundial por biocombustíveis podem transformar o biodiesel no elemento catalisador de consolidação mundial, tanto do etanol como do próprio biodiesel como combustíveis “ambientalmente corretos”.

Num cenário otimista, o Brasil potencializa-se para tornar-se o líder mundial de desenvolvimento e de utilização de biocombustíveis num reduzido período de tempo. Assim, é imperiosa a necessidade de maiores investigações relacionadas à aplicação final dos biocombustíveis já conhecidos, por meio de testes de laboratório e de aplicações a campo, sem arrefecer a busca por novas alternativas.

A maior parte das pesquisas envolvendo ensaios com óleos *in natura* puros, modificados e em misturas com o diesel convencional, tem produzido resultados atrativos em motores de máquinas agrícolas, de ônibus e caminhões. Paralelamente, criou-se um extenso campo de pesquisa cujo tratamento das diferenças existentes entre as propriedades físico-químicas dos ésteres combustíveis, dos óleos *in natura* e do óleo diesel mineral, seja o objeto principal.

A combustão nos motores de ignição por compressão é uma condição ímpar. Isso, pelo fato de não existir aporte de faísca para início do processo de combustão, a exemplo do que ocorre nos motores Otto. Nos motores de ignição por compressão, a combustão depende das condições de temperatura e pressão, as quais se encontram no ar que foi admitido e comprimido na câmara de combustão no instante em que o combustível é nela pulverizado pelo sistema de injeção.

A injeção do combustível na câmara visa à formação de uma mistura gasosa com o ar e em condições suficientes de sustentação da queima contínua, sendo tal processo suscetível à

viscosidade do combustível e às pressões de trabalho do motor que, conjugados tais fatores, determinam a forma com que o combustível penetra na câmara de combustão.

As principais características do jato emergente do bico injetor e que determinam a eficiência do processo de queima, são a profundidade (alcance do jato) e a difusão (distribuição) do combustível no ar comprimido, presente na câmara de combustão. Em consequência, estabelecem-se as condições de liberação da energia do combustível, de desenvolvimento de potência e torque, o regime potencial de rotações do motor e os possíveis teores de elementos nocivos que estarão presentes nos gases de exaustão.

Além da viscosidade dos óleos vegetais *in natura* e do biodiesel serem superiores às usuais do óleo diesel convencional, em torno de dez vezes e de duas vezes respectivamente, o número de cetano é também significativamente diferente.

O retardo da ignição de um combustível para motores de ignição por compressão (ICO), é caracterizado pelo número de cetano (NC) do mesmo. Os valores característicos de NC para os óleos vegetais *in natura*, são inferiores àqueles do óleo diesel de petróleo e, para o biodiesel, apresentam-se significativamente superiores. Os sistemas de injeção de combustível para motores ICO, comercializados até hoje, foram projetados para produzir as melhores condições de injeção e de pulverização do óleo diesel de petróleo e não de um combustível com viscosidade superior ou com número de cetano diferenciado.

Assim, a maior parte dos sistemas de injeção dos motores ICO existentes, não são apropriados para promover a pulverização de combustíveis que apresentem características distintas àquelas do óleo diesel de petróleo. Se existem diferenças significativas de propriedades físico-químicas entre os combustíveis, devem ser realizados ajustes ou modificações no sistema de formação de mistura, quando se objetiva a maior eficiência possível do motor.

Como forma de obtenção de uma melhor condição de funcionamento, especial atenção foi dispensada, nesse trabalho, a alguns fatores vitais para a produção de energia em motores diesel, principalmente à busca de adequação da viscosidade dos combustíveis ao sistema injetor disponível, a partir do monitoramento das características do jato de combustível, e pela introdução dos ajustes possíveis no ponto de injeção.

A utilização do biodiesel no mundo, com raras exceções, se dá na forma de misturas com o óleo diesel mineral e cujos teores não ultrapassam os 20,0%, que são reconhecidas pela designação de B20, ou em frações ainda mais reduzidas de 2,0% (B2) até 4,0% (B4). Sob tais níveis percentuais de mistura com o óleo diesel, as diferenças de viscosidade e de número de cetano não produzem efeitos sensíveis sobre o desempenho do motor ou alterações

significativas nos níveis de emissão de gases tóxicos, não justificando ajustes criteriosos no sistema injetor.

A partir de uma situação previsível, na qual os produtores de oleaginosas, grandes consumidores de óleo diesel, passarão a produzir artesanalmente seu próprio biodiesel, a exemplo do consumo ocorrido de óleos *in natura*, faz-se necessário a continuidade de investigações abrangentes que envolvam, principalmente, a aplicação final desse combustível.

A maior parte das pesquisas com biodiesel, trata da avaliação de ésteres metílicos e suas misturas com o óleo diesel mineral, tornando-se assim, relativamente escassos os resultados com ésteres etílicos utilizados puros. São ainda mais raras as pesquisas que focalizam as sutis diferenças existentes entre as propriedades físicas dos ésteres etílicos e as do óleo diesel convencional.

Ainda não foram obtidas informações acerca da utilização de biodiesel etílico puro, submetido ao pré-aquecimento e de seus possíveis efeitos sobre o sistema injetor e sobre as principais curvas características de desempenho dos motores diesel ou níveis de emissões residuais de motores que operam sob tais condições.

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

O principal diferencial desse trabalho é o tratamento das diferenças existentes entre o biodiesel etílico e o óleo diesel convencional de petróleo, através do controle da temperatura dos mesmos antes da bomba injetora e do ajuste do ponto de avanço da injeção em função características do jato combustível. Nele, trata-se, efetivamente, como “diferentes”, combustíveis que são na realidade “diferentes”.

1.2 Avaliação de desempenho do motor de ciclo diesel com diferentes combustíveis

Nessa pesquisa buscou-se reunir o maior volume possível de informações relativas ao uso de dois tipos de ésteres etílicos e de uma mistura de ésteres, produzidos por empresas certificadas pela ANP e sem quaisquer misturas com o óleo diesel mineral, ou seja, utilizou-se sempre o biodiesel 100% puro (B100) ou uma mistura de dois ésteres numa proporção volumétrica de 50%/50%.

Como parâmetro, utilizou-se o desempenho do motor alimentado com óleo diesel contendo 2% de biocombustível (B2), com as regulagens e ajustes originais recomendados pelo fabricante do motor. Como dados de desempenho do motor, foram obtidos os valores de torque (N.m), de potência (kW) e de consumo específico de combustível ($\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$), utilizando-se um banco dinamométrico com freio hidráulico específico para ensaios de motores. Para os diferentes combustíveis considerados, foi conduzida uma análise dos gases residuais de combustão, para três regimes de rotação do motor, previamente, definidos.

Para obtenção do melhor aproveitamento do combustível, inicialmente foram realizadas avaliações do formato do jato de injeção para os ésteres utilizados no experimento, considerando-se sempre a qualidade da injeção, que se reflete na forma com que se desenvolve o processo de combustão. Tais observações preliminares permitiram a determinação das melhores condições de temperatura de pré-aquecimento dos biocombustíveis, que foram utilizados nos ensaios, como forma de obtenção de um perfil do jato atomizado considerado adequado para o tipo de motor utilizado. Observou-se, também, a capacidade de vedação dos bicos injetores, quando os diferentes biocombustíveis foram submetidos ao pré-aquecimento.

A natureza do B100 e suas formas de aplicação nos motores diesel em substituição completa ao óleo diesel convencional, considerando-os sempre como combustíveis de origem e características diferentes, foi o tema principal desse trabalho de pesquisa. Na verdade, ele é a seqüência de uma linha de pesquisa característica do Laboratório de Motores de Combustão Interna do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia (CT) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) do Centro de Ciências Rurais (CCR) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), que visa à investigação de biocombustíveis em suas mais diversas formas.

1.3 Objetivo geral do trabalho de pesquisa

De forma sintética, o objetivo geral do trabalho realizado nessa Tese e os resultados que nela constam, foi avaliar em ensaios de dinamômetro diferentes tipos de biodiesel, obtidos a partir de óleo de girassol e gordura animal (sebo bovino) por meio da rota de transesterificação etílica, e uma mistura de ésteres (etílico/metílico), sob condição de pré-aquecimento. Reuniram-se, assim, num mesmo trabalho, ensaios de dois ésteres de origem

diferenciada (biomassa vegetal e animal) e que apresentam potencial para produção de biodiesel em substituição ao já tradicional éster metílico de óleo de soja.

1.4 Objetivos específicos

- Avaliar nos ensaios realizados, a potência, o torque, o consumo específico de combustível e os principais gases residuais de combustão, produzidos por um motor diesel, quando alimentado com os diferentes ésteres sob condição de pré-aquecimento;
- Comparar os resultados obtidos com o desempenho apresentado pelo óleo diesel convencional de petróleo. Atualmente, o óleo diesel aditivado (B2);
- Comparar os resultados obtidos pelos ésteres aquecidos com o desempenho apresentado pelos mesmos à temperatura ambiente (sem aquecimento);
- Avaliar os efeitos da introdução de diferentes ajustes no ponto de avanço da injeção, por meio dos recursos permitidos pelo sistema injetor original do motor, sobre o desempenho dos ésteres combustíveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

O princípio de funcionamento do motor de combustão é suficientemente conhecido há muito tempo. A difusão desse conhecimento é promovida com muito mais agilidade pelos meios de comunicação eletrônica atuais. O motor de combustão interna, é uma utilidade presente no dia-a-dia de qualquer sociedade organizada, seja no meio rural ou urbano, e constitui-se numa das mais importantes máquinas transformadoras de energia empregadas pela humanidade ao longo de sua história.

O consumo de energia, há muito, adquiriu *status* de sinônimo de desenvolvimento econômico e social, e o motor de combustão interna se estabeleceu, neste contexto, devido à sua grande mobilidade, simplicidade e custo relativamente reduzido. Desde a sua concepção e posterior desenvolvimento, o motor de combustão coexiste com paradoxos, nos quais se confrontam a sua utilidade e o seu rendimento, a origem e os custos dos combustíveis que utiliza com a emissão de gases poluentes.

Principalmente, nos últimos vinte anos, no Brasil, os motores de combustão interna alcançaram um grau de evolução que até o início da década de oitenta não se apresentava como fundamental para sua utilização. A grande contribuição da indústria brasileira, para a evolução dos motores, foi a efetiva afirmação dos combustíveis não-convencionais, principalmente originários da biomassa, como fonte energética.

O desenvolvimento dos biocombustíveis, acelera-se cada vez mais. Esse desenvolvimento é fortalecido pelos incentivos emprestados por dirigentes de várias nações que, pressionados pelas questões ambientais, anseiam por uma nova matriz energética mundial, a qual todos esperam, finalmente, vê-la estabelecida.

As atuais discussões referentes ao aquecimento global estão colocando ainda mais em evidência o papel desempenhado pelo motor de combustão interna na sociedade, seja como instrumento de desenvolvimento, seja como agente produtor de poluentes atmosféricos.

Os biocombustíveis apresentam-se como potenciais redutores dos níveis de emissão de gases nocivos ao ser humano e de gases participantes do efeito estufa.

2.2 Tipos de motores de combustão interna – Motor Otto e Diesel

O motor de ignição por compressão fundamenta-se nos trabalhos de Rudolphe Diesel, quando construiu seus primeiros motores, no ano de 1892. Este motor caracteriza-se pela realização da combustão à pressão constante, segundo um ciclo que assumiu o nome de seu inventor (Giacosa, 1964).

Van Gerpen (2006) explica que os motores de ignição por centelha queimam uma mistura de ar e combustível, química e corretamente dosada, comprimida e que somente entra em combustão pela ação de uma faísca elétrica. Os motores diesel são distintos, pois apenas o ar é admitido nos cilindros e sofre compressão sob taxas mais elevadas que os motores Otto. As condições de pressão alcançadas na câmara de combustão elevam a temperatura do ar a valores suficientes para promover a auto-ignição do combustível que é injetado em alta velocidade e, finalmente, pulverizado nesta atmosfera.

Segundo Stone (1999), os motores diesel apresentam eficiência térmica superior aos motores de ignição por faísca, pois usam taxas de compressão mais elevadas e porque, durante a fase inicial da compressão, apenas o ar está presente no cilindro. A dosagem realizada pelo sistema injetor deve buscar sempre uma mistura mais fraca que a estequiométrica, como forma de alcançar a combustão mais completa possível e, como o motor diesel é projetado para operar em baixas rotações, as perdas por atrito são menores.

2.3 O processo de combustão em motores

Heywood (1988) diz que a combustão da mistura no interior do motor é um dos processos que controlam a potência, a eficiência e a produção de gases poluentes e é muito diferente para os dois principais tipos de motores de combustão interna conhecidos.

No motor Otto o combustível é misturado com o ar no sistema de admissão, formando uma mistura homogênea que, após ser comprimida, entra em combustão pela ação de uma

descarga elétrica. Uma chama se desenvolve desde o foco inicial criado e se propaga através do cilindro até as paredes da câmara de combustão. Ao atingir as paredes, a chama se extingue, tanto pela transferência de calor para as paredes como pela extinção das espécies químicas ativas.

Um fenômeno indesejável, nos motores, é a ignição espontânea de frações de mistura não-queimada antes que a frente de chama possa alcançá-la e propagar-se através da mesma. A fração final da mistura a ser queimada é reconhecida, tecnicamente, como *end-gas* e é onde esta auto-ignição pode se processar.

No motor de ignição por centelha elétrica (ICE), a auto-ignição é uma combustão anormal, chamada de detonação e que, devido às altas pressões e temperaturas geradas, pode ocasionar danos ao motor. No motor de Diesel, como o combustível é injetado no cilindro no interior da massa de ar com pressão e temperatura previamente elevadas, ocorre a auto-ignição de porções da mistura resultante da injeção e da vaporização do combustível no ar quente. Segue-se um processo de combustão que se expande, rapidamente, ao longo da câmara de combustão.

Assim, a diferença fundamental entre os processos de combustão dos motores ICE e dos motores diesel é que, nos primeiros, existe uma frente de chama propagando-se através de uma mistura de ar e combustível pré-formada, enquanto nos diesel, o que se identifica é uma difusão da chama, sem pré-mistura.

2.3.1 Chama em pré-mistura e chama difusa

Define Turns (1996) que a combustão pode ocorrer com ou sem a presença de frente de chama. A frente de chama é uma fina zona de intensa reação química que divide a câmara de combustão em gases já queimados e mistura por queimar. Existindo a frente de chama, podem-se reconhecer as categorias de chama em pré-mistura e de chama difusa.

A diferença é que, com pré-mistura, se pode observar a zona de reação química a propagar-se ao longo da massa de mistura não-queimada. Com a chama se deslocando através da câmara de combustão, a temperatura e a pressão aumentam no gás não queimado e, sob certas condições, podem ocorrer rápidas reações de oxidação em alguns pontos da mistura.

Os eventos ocorrem com rapidez, liberando calor num processo quase a volume constante, caracterizando a detonação, pois a pressão se eleva rapidamente produzindo um

ruído facilmente reconhecível. A detonação é indesejável nos motores de combustão. Porém, por característica de projeto, a auto-ignição inicia o processo de combustão nos motores de ciclo Diesel.

As duas classes de chama, com pré-mistura e difusa, estão relacionadas ao estado de miscibilidade dos reagentes, como sugerido pelas suas designações. Numa combustão em pré-mistura, o combustível e o oxidante são misturados em nível molecular, antes do início da ocorrência de qualquer reação química significativa.

O motor de ignição por centelha é o exemplo característico de ocorrência da combustão em pré-mistura.

O motor diesel é caracterizado pela existência da chama difusa, porque os reagentes estão inicialmente separados, com a mistura e as reações químicas ocorrendo somente na interface entre o combustível e o ar. Na prática, nos motores diesel os dois tipos de chama podem ocorrer em diferentes graus, apresentando quantidades significativas de chama em pré-mistura e chama difusa.

Guibet (1999) explica que nos motores diesel o combustível é dosado pela bomba e injetado à alta pressão na câmara de combustão e sob a forma de um jato pulverizado, que vaporiza e se mistura com o ar. A combustão ocorre por auto-ignição em um ou em diversos pontos da câmara onde, as condições de temperatura, pressão e dosagem de mistura são suficientes para iniciar uma reação química. A pressão aumenta rapidamente e resulta no ruído característico da combustão dos motores diesel, cuja progressão passa a ser controlada somente pela variação da quantidade de combustível que está sendo injetado.

A chama da combustão é identificada como difusa, pois a mistura se forma enquanto a combustão ocorre por auto-ignição, resultando num gradiente de elevação de pressão na câmara de combustão. É prática preferencial que o combustível não seja injetado sobre as paredes da câmara de combustão, para garantir facilidade de mistura com o ar.

A duração do tempo de combustão deve ser controlada de forma precisa, para produzirem-se baixos níveis de emissões tóxicas e otimização da utilização do combustível, sendo o tempo de combustão a soma da duração da injeção, acrescida de um curto período entre o início da injeção e a auto-ignição, chamado de retardo de ignição.

Com a auto-ignição, o combustível, que foi acumulado durante o retardo, queima-se rapidamente, num período chamado de combustão em pré-mistura e, enquanto ocorre o consumo da mistura preparada durante o retardo, o combustível restante queimará a uma taxa determinada pela relação de mistura dosada, numa fase que é conhecida como combustão em mistura controlada (Van Gerpen, 2006).

2.3.2 Controle de velocidade e carga dos motores diesel

Explica Giacosa (1964) que, no motor diesel, a regulagem de carga se efetua somente sobre o combustível, com os requerimentos do motor podendo ser facilmente atendidos através da variação do volume de combustível dosado pela bomba injetora. Devem ser tomadas precauções relativas à velocidade de injeção, que está ligada ao gradiente de pressão do combustível e, em consequência, à forma de pulverização. Quando o motor gira em regimes mínimos, a velocidade de saída do combustível, através dos orifícios do bico injetor, é mais baixa e a pulverização é deficiente. Em regimes intermediários, melhoram as condições de funcionamento do motor, pois a velocidade de saída do combustível é suficientemente elevada para promover uma boa pulverização, desde que o tempo disponível para a combustão não seja demasiadamente curto. Como o rendimento volumétrico do motor é elevado, pois não existe o elemento obturador, existe certa flexibilidade de dosagem do combustível, que pode ser aproveitada para adequar as curvas de torque e de potência dos motores às classes de trabalho a que se destinam variando-se a relação de mistura.

Van Gerpen (2006) diz que a rotação de um motor de ignição por faísca e, portanto, a potência desenvolvida, é controlada pela variação do volume de uma mistura homogênea de ar e combustível que entra no cilindro, através de um elemento obturador controlado pelo acelerador, a válvula de borboleta. Em um motor diesel, a rotação e a potência produzida são controladas somente pela variação do volume de combustível que é injetado no ar comprimido na câmara de combustão. O volume de combustível a ser injetado é controlado pelo operador do motor através do acelerador.

2.3.3 Formação da mistura e auto-ignição

Obert (1971) diz que no motor diesel, o ar atmosférico é comprimido e sua temperatura eleva-se significativamente. Quando um ou mais jatos de combustível são introduzidos na câmara de combustão, eles se desintegram em um núcleo de combustível cercado por um envelope vaporizado de ar e combustível. Este envelope é criado tanto pela pulverização do combustível como pela turbulência do ar que passa através do jato e desnuda as partículas de combustível do seu núcleo.

A mistura no motor diesel não é homogênea como num motor de ignição por faísca, mas sim completamente heterogênea. Após a injeção, existem na câmara de combustão algumas regiões onde podem ser identificadas gotículas isoladas de combustível, apenas vapores de combustível, apenas o ar comprimido ou misturas de ar e combustível vaporizado.

Segundo Bosch (2005), nos processos heterogêneos, a formação de mistura é decisiva para determinar a qualidade da combustão que se seguirá à injeção. Por consequência, a mistura definirá a eficiência com a qual o ar de combustão admitido será utilizado e determinará os níveis de pressão média efetiva. Nos motores diesel a relação de mistura varia desde o ar puro na periferia da pulverização até o combustível puro no núcleo do jato. Como a combustão heterogênea, ocorre em uma faixa relativamente estreita de mistura, as massas necessárias para gerar tais misturas devem ser eficientemente transportadas através da câmara.

A eficiência deste transporte repousa na difusão do combustível e na turbulência do ar no interior do cilindro. Quando a ignição se dá em regiões que contenham misturas de combustível e ar apropriadas, a chama só se propagará se estas regiões de mistura forem contínuas. Regiões adjacentes, à beira da auto-ignição, podem queimar pela ação do calor transferido das regiões queimadas. É muito difícil, entretanto, fazer distinção entre uma propagação de chama e um processo de auto-ignição, que é auxiliado pelas altas temperaturas que estão sendo geradas na câmara durante a queima.

Giacosa (1964) explica que o grau de mistura entre o combustível e o ar, depende da pulverização do líquido e da movimentação do ar na câmara. A injeção do combustível inicia antes que o pistão atinja o ponto morto superior (PMS) e se prolonga num curto intervalo de tempo, durante o qual o virabrequim percorre um arco de círculo de até 35 graus. A duração do tempo de injeção depende da rotação utilizada e da cilindrada do motor. À medida que as partículas de combustível penetram na câmara de combustão, misturam-se com o ar de uma forma não totalmente homogênea, podendo variar muito de uma região para outra.

Como o ar comprimido encontra-se em uma temperatura superior à de ignição do combustível, a combustão pode se iniciar em qualquer ponto da câmara em que existam condições de queima ou simultaneamente em diversos pontos. Um sistema injetor eficaz deve dosar, para cada cilindro e em cada ciclo, a quantidade exata de combustível necessária ao atendimento das condições de carga e rotação do motor. No instante exato, deve dividir o combustível em gotículas uniformes, para produzir uma boa pulverização. Facilitando, assim, o processo de combustão.

As gotículas de combustível devem ter energia cinética suficiente para penetrar na massa de ar comprimido e dispersar-se, uniformemente, de forma que cada uma delas tenha

possibilidade de reagir com o oxigênio do ar de combustão. Tal possibilidade está relacionada ao alcance do jato atomizado e à difusão do combustível na massa de ar comprimido.

Desantes *et al* (2006) explicam que a eficiência da combustão do combustível e, portanto, o rendimento do motor diesel, depende da qualidade da mistura formada de ar e combustível. Em sistemas de combustão convencionais, onde o combustível é injetado diretamente no ar, é necessário providenciar condições adequadas para uma boa macroestrutura da mistura na câmara de combustão. Para atingir tal condição, o combustível deve ser uniformemente distribuído na câmara de combustão no intervalo de tempo disponível para formação da mistura, ou seja, num intervalo de tempo muito curto. O processo de mistura é fortemente influenciado pelo comportamento do jato de combustível emergente do injetor que, por sua vez, depende de diversos parâmetros relacionados ao sistema de injeção utilizado e com o ambiente no qual o jato combustível é injetado. Também, está relacionado com as propriedades físico-químicas do combustível utilizado.

2.3.4 O atraso ou retardo de ignição

Ao tempo transcorrido entre o início da injeção e o instante em que se atingem condições de haver uma reação química, dá-se o nome de atraso ou retardo físico da combustão. Durante esse período de atraso, o combustível é atomizado, vaporizado, misturado com o ar e tem sua temperatura elevada. No período seguinte, chamado de atraso ou retardo químico, uma reação inicia lentamente e depois se acelera até o instante em que se dá a auto-ignição. Em algum ponto do envelope vaporizado, formar-se-á uma mistura de ar e combustível passível de queima, tornando a oxidação iminente. O termo atraso de ignição é consignado ao tempo consumido pelos atrasos físico e químico. Para combustíveis mais leves, o atraso físico é pequeno e, para os mais viscosos, o atraso físico pode ser o fator limitante e controlador da combustão.

O atraso físico pode ser significativamente reduzido através do uso de elevadas pressões de injeção e pela turbulência do ar no interior do motor, pois essas facilitam a desintegração do jato de combustível. Em algum ponto da câmara de combustão, ou em vários pontos ao mesmo tempo, surge uma chama sem uma propagação ordenada e sem frente de chama definida e áreas inteiras podem explodir ou queimar devido ao acúmulo de combustível na câmara durante o período de retardo da combustão (Obert, 1971).

Segundo Giacosa (1964), num motor diesel o combustível não queima imediatamente após ser injetado no cilindro e sim depois de um pequeníssimo intervalo de tempo. Durante este período, cada gota de combustível sofre transformações que tornam possível o início da combustão propriamente dita, sem que a pressão no cilindro aumente mais do que aumentaria sem combustão. Durante o tempo de retardo da combustão, pode-se distinguir uma fase na qual o combustível entra no cilindro, vaporiza e se mistura com o ar aquecido e uma segunda fase, muito mais extensa que a primeira, quando se desenvolvem ações intermoleculares que preparam a mistura para a ignição. O retardo de combustão é muito importante em motores de ignição por compressão. Ele influi sobre o modo que se realizará a combustão, a partida do motor e a produção dos gases de escape. Dentre as variáveis que influem sobre o retardo da combustão e sobre o trabalho que será produzido pelo motor, além do número de cetano (NC) do combustível, devem ser citados o efeito da pulverização, o alcance do jato combustível, a turbulência do ar, a taxa de compressão e as temperaturas do ar e do fluido de arrefecimento.

As condições ideais de pulverização, que devem ser buscadas, são as de mínimo diâmetro das gotas, para melhorar a combustão localizada e facilitar a partida, e o máximo número possível das gotas de diâmetro mínimo para possibilitar a uniformização da mistura e regularizar a combustão. A penetração do jato de combustível na câmara deve estar em equilíbrio com a pulverização porque, se a última for excessiva, pode reduzir o alcance do jato e provocar uma má distribuição do combustível na massa de ar.

O aumento da taxa de compressão reduz o retardo de ignição, pois resulta no aumento da densidade do ar comprimido, baixando a temperatura mínima de auto-ignição devido ao contato mais direto que ocorre entre as moléculas, acelerando a reação de combustão. Se a temperatura do ar de admissão aumenta, aumenta também a do ar comprimido e o retardo de ignição decresce. Com o aumento da temperatura do fluido de arrefecimento, o retardo de ignição diminui devido à redução do calor removido do ar através das paredes da câmara de combustão. Isso, portanto, resulta na elevação da temperatura final do ar comprimido.

Heywood (1988) explica que durante o atraso de ignição alguns processos químicos e físicos tomam lugar antes que frações significativas do conteúdo energético do combustível sejam liberadas. Os processos físicos incluem a pulverização do combustível líquido, a vaporização das gotas e a mistura deste vapor com o ar aquecido que se encontra no cilindro. Os processos químicos são as reações de pré-combustão entre o vapor de combustível, o ar comprimido e os gases residuais misturados, e que conduzem à condição de auto-ignição. Tais processos são afetados pelo projeto do motor, variáveis de operação e características do combustível.

2.3.5 O complexo processo de combustão nos motores diesel

Para Guibet (1999), o controle e a progressão da combustão dos motores diesel são extremamente complexos devido à mistura de ar e combustível ser heterogênea, por não existir propagação e sim, difusão da chama e ainda, por diversos parâmetros aerodinâmicos ligados aos detalhes de projeto da câmara de combustão.

A combustão num motor diesel é um processo físico-químico que se inicia com a injeção do combustível e que se encerra na exaustão dos gases queimados. A razão para esta complexidade do processo é que a combustão é influenciada por fatores como o tempo e pressão de injeção, dinâmica de formação da mistura, temperatura do ar e do combustível, entre outros.

A própria vaporização do combustível é um processo complexo devido à variedade de compostos presentes.

Bosch (2005) definindo os principais parâmetros que influenciam de forma expressiva o processo de combustão dos motores diesel, citou que a energia cinética da pulverização varia em função da diferença de pressão existente nos orifícios do injetor, da geometria do bico injetor e da velocidade de saída do combustível. A liberação de calor em um motor diesel depende da forma com que se dá o próprio processo de combustão e, particularmente é influenciado pelo início da injeção, taxa de injeção e pressão máxima utilizada. Nos motores de injeção direta, o número de orifícios do injetor é um fator crucial.

2.3.6 A batida no motor diesel

Giacosa (1964) explica que durante o atraso de ignição das primeiras partículas de combustível injetado, também penetram na câmara de combustão outras partículas. Se o retardo de ignição é curto, característico de combustíveis com alto NC, as primeiras gotículas começam a queimar-se imediatamente após um curto período de tempo e a quantidade de combustível que entra na câmara, nesse tempo, é pequena.

Quando se inicia a combustão, a taxa de variação da pressão não é elevada em demasia e a ação sobre o pistão se dá de uma forma gradual. Se o retardo de ignição é maior, característico de combustíveis de baixo NC, uma quantidade maior de combustível se

acumula na câmara e, quando queimada, produz-se um forte gradiente de pressão e um funcionamento mais rude do motor.

Quando o retardo de combustão é demasiado, pode ocorrer um acúmulo exagerado de combustível no cilindro, resultando num aumento de pressão quase instantâneo e com violentas variações de pressão e vibrações na massa de gás, próprias de uma detonação, e que são chamadas de batida ou picado. O fenômeno é análogo ao dos motores de ignição por centelha. Porém, nestes, a detonação ocorre no final da combustão e nos motores diesel ocorre no início.

Obert (1971) explica que com a auto-ignição, um processo de combustão inicialmente ordenado, pode tornar-se descontrolado e produzir um violento aumento de pressão. A liberação de energia pode efetuar-se em uma velocidade muito maior do que a prevista pelo projeto do motor, fazendo surgir uma batida característica e facilmente identificável. Num motor Otto, a batida se caracteriza pela auto-ignição súbita de uma fração de carga quase no final da combustão. Neste caso, as porções finais da mistura são as responsáveis pela auto-ignição.

Num motor diesel, durante o atraso de ignição, mais e mais combustível está sendo injetado na câmara. E, devido a esse acúmulo de combustível, a combustão quando inicia assume velocidades de queima elevadas, e o impacto da taxa de variação da pressão na câmara pode fazer o motor vibrar.

A batida no motor diesel é caracterizada pela auto-ignição súbita da mistura no início do processo de combustão, apesar de ser heterogênea e de se identificar a auto-ignição, continua em cada estágio do processo.

Diz Stone (1999) que, como forma de evitar um longo período de combustão rápida, o início da injeção do combustível deve ser cuidadosamente controlado. Um período exagerado de combustão rápida pode produzir a batida característica dos motores diesel, causada pelo súbito aumento de pressão, devido à auto-ignição de uma quantidade excessiva de combustível acumulado e que ocorre tardiamente.

Em exata oposição às características necessárias a um combustível para motores de ignição por centelha, estabelece-se, para os combustíveis destinados aos motores diesel, que eles devem entrar em combustão por auto-ignição e queimar fácil e rapidamente.

A batida em um motor diesel pode ser minimizada pelo uso de altas taxas de compressão, gerando altas temperaturas e pressões durante o segundo curso que reduzem o retardo da combustão, e evitando-se a injeção de grandes quantidades de diesel muito rapidamente.

2.4 Combustíveis para motores diesel

Destaca Agarwal (2007) que, quando Rudolphe Diesel inventou o motor de ignição por compressão, o fez para funcionar com uma grande quantidade de combustíveis, incluindo emulsão de carvão pulverizado em água, óleos minerais pesados e óleos vegetais *in natura*. Algumas de suas primeiras experiências foram catastróficas mas, com o passar do tempo, seu motor funcionou com óleo de amendoim como o fez na tradicional Exposição de Paris, no ano de 1900.

Diesel estabeleceu, já em 1912, que o uso de óleos vegetais como combustível para motores de ignição por compressão poderia não ser significativo à época, mas com o passar do tempo, tornar-se-iam tão importantes como eram o petróleo e carvão, principalmente em países de grande potencial agrícola. Entre 1930 e 1940, os óleos vegetais foram utilizados como combustível, somente, em situações de emergência.

Recentemente, devido ao aumento dos preços do petróleo e seus derivados, à depleção de suas reservas e aos problemas ambientais relacionados, iniciou-se uma nova focalização sobre os óleos vegetais e gorduras animais para produção de um biodiesel. O crescente uso de derivados do petróleo intensifica a poluição do ar, ampliando os problemas do aquecimento global causado pelo dióxido de carbono. Neste cenário, o biodiesel surge com potencial para reduzir o nível de elementos poluentes e de potenciais carcinogênicos.

2.4.1 Viabilidade de um combustível

Baskákov (1985) afirma que o aproveitamento de um combustível deve ser economicamente racional em quaisquer condições consideradas. Assim, o conceito de combustível é uma categoria não somente técnica, mas também econômica e seus conceitos econômicos variam à medida que a técnica se desenvolve.

A viabilidade técnica dos combustíveis destinados aos motores diesel, segundo Parente (2003), deve ser vista sob os aspectos de combustibilidade, de impacto ambiental das emissões, de compatibilidade de uso e de manuseio. A combustibilidade de um combustível diesel é definida como a facilidade de se produzir a combustão no equipamento utilizado e da forma desejada. A combustibilidade é função do poder calorífico e do número de cetano, da

viscosidade e da tensão superficial, pois definem a qualidade da injeção. Atualmente, o impacto ambiental é um fator primordial para definir a viabilidade de um combustível. Isso, pelo fato de o teor de enxofre e hidrocarbonetos aromáticos, juntamente com a combustibilidade, serem características que se refletem diretamente nas emissões gasosas.

A compatibilidade ao manuseio está relacionada ao transporte, à estabilidade de armazenamento e à distribuição do combustível, onde corrosividade, toxidez e ponto de fulgor são as principais propriedades. A compatibilidade ao uso diz respeito à vida útil do motor e de seus componentes e está representada pela lubrificidade e pela corrosividade, que são ligadas ao teor de enxofre e ao grau de acidez do combustível.

2.4.2 A energia dos combustíveis – Calor de combustão, poder ou valor calorífico

Erokhin *et al* (1986) citam que uma das mais importantes características de um combustível é o seu calor de combustão, que é definido como sendo a quantidade de calor liberado em condições de combustão total de uma massa de combustível líquido ou sólido ou por volume de gás. Na prática, o calor de combustão é determinado por medida direta em instrumentos denominados calorímetros. Certa quantidade de combustível é queimada num vaso fechado e imerso em água no interior do calorímetro. O calor liberado durante a combustão é transferido para uma massa de água conhecida, através das paredes do vaso, e como a capacidade calorífica do material do vaso e a diferença de temperatura da água antes e depois da combustão, que também são conhecidas. O calor de combustão do combustível pode ser então, calculado.

Segundo Obert (1971) sempre que um carburante contenha hidrogênio, um dos produtos da combustão será a água, que existirá como um líquido, vapor ou uma mistura das duas fases. Se a água formada na combustão puder ser condensada, o calorímetro registrará uma quantidade de calor maior do que a água na fase de vapor. Assim, definem-se o valor calorífico alto, ou bruto, que é obtido quando a água dos gases residuais é completamente condensada no teste, e o valor calorífico baixo, ou líquido, considerado quando a água na combustão existe inteiramente na fase de vapor. A diferença entre os dois valores caloríficos é igual à energia latente de vaporização da água na temperatura do ensaio.

Segundo Parente (2003), o poder calorífico do biodiesel é muito próximo daquele do óleo diesel mineral e a diferença média em favor do petrodiesel, situa-se na ordem de cinco

por cento (5,0%), mas como produz uma combustão mais completa, o biodiesel pode apresentar um consumo específico equivalente ao diesel de petróleo.

Explica Van Gerpen (2006) que apenas o poder calorífico inferior é significativo para os combustíveis que geram água como um dos produtos da combustão. Os combustíveis oxigenados, como álcoois, éteres ou ésteres de ácidos graxos apresentam um valor calorífico mais baixo do que os hidrocarbonetos puros, pois o oxigênio ligado aos mesmos não contribui para o processo de combustão.

Bosch (2005) explica que o valor calorífico da mistura de ar e combustível determina o rendimento do motor e, para uma relação estequiométrica constante, este número permanece basicamente o mesmo para todos os combustíveis líquidos e gases liquefeitos, aproximadamente entre 3,5 e 3,7 MJ.m⁻³ de mistura.

2.4.3 O óleo diesel de petróleo no Brasil

Segundo a Petrobrás (2007), desde 1994 são produzidos dois tipos de óleo diesel para comercialização no Brasil. O diesel metropolitano, conhecido como D500 e com teor de enxofre menor, que é destinado às regiões com necessidade de controle apurado das emissões de material particulado, e o óleo diesel interior, que é consumido nas demais regiões. O óleo diesel metropolitano comercializado atualmente, possui, desde maio de 2006, um teor de enxofre máximo de 0,05% (500 ppm) e que objetiva reduzir as emissões de material particulado. A partir de 2005 a Petrobrás passou a fornecer o D500 nas regiões metropolitanas dos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. O óleo diesel interior é comercializado nas regiões do país onde não existe o diesel metropolitano, e possui um teor de enxofre máximo de 0,2% (2000 ppm).

Dentro dos dois tipos de combustível citados, existe o óleo diesel aditivado que se caracteriza por possuir um pacote de aditivos detergentes, dispersantes, emulsificantes, antiespumantes e anticorrosivos, que lhe conferem características diferenciadas e o óleo diesel de inverno, que foi desenvolvido para alcançar o desempenho necessário em regiões do Brasil com temperaturas ambientes de até 5°C. É também comercializado no país um diesel especial (*podium*) que oferece um número de cetano de 51, maior que os demais comercializados e que apresentam um NC de 42, e um teor de enxofre de 200 ppm contra 500 ou 2000 ppm dos demais óleos diesel. A Resolução da Agência Nacional de Petróleo (ANP) n° 36, de 24 de

novembro de 2004, estabelece as especificações para o óleo diesel ou para a mistura chamada de B2, voltados ao uso como combustível automotivo em todo o território nacional. Na Resolução ficou definido que a mistura B2 é um combustível composto por 98,0% de óleo diesel e 2,0% de biodiesel, em volume, e que deve atender as demais especificações do óleo diesel-base da mistura, interior ou metropolitano.

2.4.4 A energia da biomassa

Conforme Silva *et al* (2004), sob o ponto de vista energético, a biomassa é toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada para produzir energia. Assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta da energia solar, convertida em energia química através da fotossíntese, que é a base dos processos biológicos de todos os seres vivos. Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente pela combustão. O século XX ficará conhecido como o século dos combustíveis fósseis, pois carvão, petróleo e gás natural dominaram o sistema energético de quase todos os países industrializados. A tendência mundial foi, praticamente, esquecer que até a metade no século XIX, mais de 85,0% do total da energia usada era oriunda da biomassa nas formas de lenha, resíduos da agricultura e de animais.

Demirbas (2007) relata que os recursos naturais são mais uniformemente distribuídos que as fontes fósseis e nucleares e que todo material oriundo da biomassa pode ser convertido em energia através de processos biológicos e termoquímicos. Os fluxos de energia de fontes renováveis são, em ordem de magnitude, três vezes maior do que o consumo atual de energéticos. O modelo de sistema energético atualmente praticado é insustentável devido às implicações ambientais, econômicas e geopolíticas que terão implicações no futuro.

Em Comissão Europeia (2004, p. 115), registra-se que a utilização de energias renováveis, particularmente as de origem na biomassa, apresenta vantagens como a redução das emissões de gases de efeito estufa, o aumento da oferta de energia, a produção de energia sustentável em longo prazo, a criação de oportunidades de emprego, o desenvolvimento econômico localizado e a redução das importações de combustíveis convencionais. Tais vantagens provocaram a expansão do uso das energias renováveis, principalmente no que se refere à produção de biocombustíveis.

Segundo Bonomi (2007), os biocombustíveis podem, em princípio, ser definidos como aqueles combustíveis produzidos a partir da biomassa agrícola que, por serem renováveis, podem substituir os combustíveis fósseis e reduzir a emissão de gases de efeito estufa em função da absorção do CO₂ atmosférico, que ocorre na produção da biomassa. A Figura 1 apresenta os principais processos de conversão da biomassa para fins industriais e energéticos.

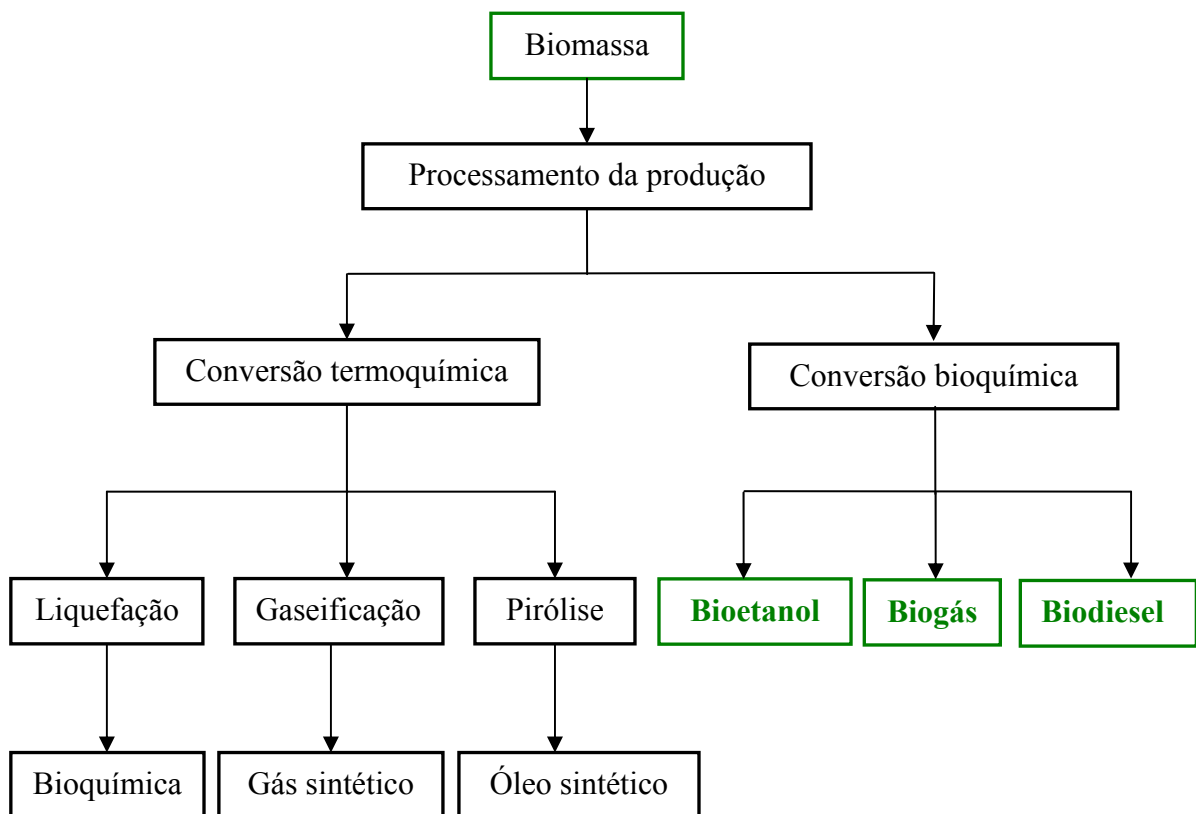


Figura 1 - Principais processos de conversão da biomassa (Adaptado de Demirbas, 2007)

2.4.5 Biocombustíveis importantes para o Brasil

Agarwal (2007) relembra que as reservas petrolíferas são finitas e altamente concentradas em algumas regiões do mundo e os países que não possuem reservas ficam suscetíveis às crises de fornecimento de energia, em função da necessidade de importação do petróleo cru e seus derivados. Assim, uma atenção especial aos combustíveis alternativos

deve ser dispensada, principalmente aos que podem ser produzidos a partir de fontes disponíveis localmente como o etanol, o biodiesel e os óleos vegetais.

O etanol é uma alternativa interessante, pois além de ser uma fonte renovável é um combustível oxigenado, potenciando-se como elemento redutor das emissões de particulados pelos motores de ignição por compressão. O etanol reveste-se de maior importância à medida que pode ser tratado como insumo para produção do biodiesel.

O biodiesel é constituído por ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos oriundos de óleos vegetais virgens ou usados, alimentares ou não, ou de gorduras animais. O biodiesel pode ser misturado em quaisquer proporções com o óleo diesel mineral, para criar misturas combustíveis ou pode ser utilizado em sua forma pura. Exatamente como o diesel mineral, o biodiesel opera em motores de ignição por compressão. Requer poucas, ou nenhuma, modificações no motor, pois suas propriedades são similares às do diesel mineral. O termo biocombustível é referenciado aos combustíveis líquidos voltados ao setor de transportes e que são, predominantemente, produzidos a partir de elementos originários da biomassa. Na Figura 2 estão representadas as principais fontes de combustíveis líquidos para veículos automotores.

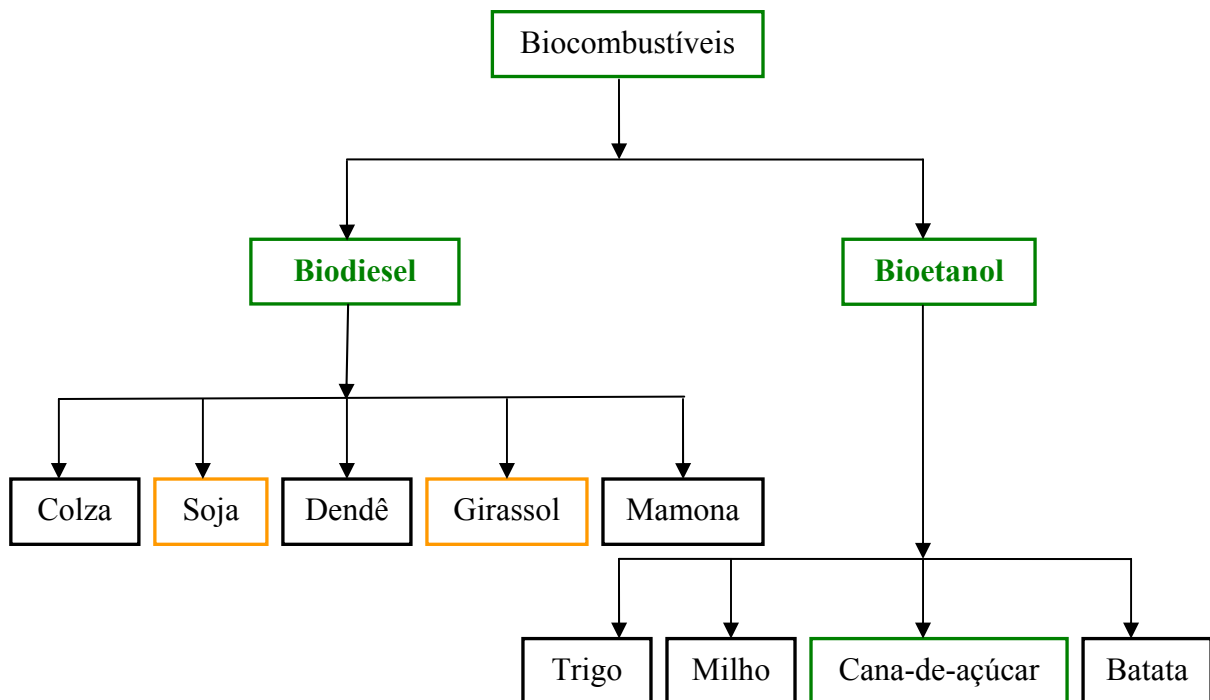


Figura 2 – Fontes dos principais biocombustíveis líquidos para automotores (Adaptado de Demirbas, 2007)

Destaca Maziero *et al* (2005) que em algumas matérias sobre o assunto biocombustíveis, a nomenclatura utilizada pode ser fonte de confusão ou mesmo de posições equivocadas. Por vezes, usam-se indistintamente os termos biocombustível, biodiesel e óleos vegetais como sinônimos.

Na Comunidade Européia onde a utilização de biocombustíveis está bem estabelecida, entende-se que biocombustível é todo combustível líquido ou gasoso que pode ser produzido a partir da biomassa. Considera-se biomassa a fração biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura, da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos.

São considerados importantes biocombustíveis, o bioetanol, o biodiesel, o biogás, o biometanol, o biohidrogênio e os óleos vegetais puros, produzidos a partir de plantas oleaginosas. Na Europa, se admite o óleo vegetal puro como combustível, quimicamente inalterado, somente quando a sua utilização for compatível com o tipo de motor e atender os respectivos requisitos relativos às emissões de exaustão. Na Alemanha, é permitido o uso de óleos vegetais *in natura*, assim como o uso do B100.

2.5 Principais requisitos dos combustíveis considerados no trabalho

Resume Leontsinis (1988) que um bom combustível para motores diesel deverá apresentar características que permitam uma boa partida, aquecimento uniforme, aceleração suave e operação suave do motor. Não deve apresentar problemas de detonação e corrosão, minimizar o desgaste e a produção de fumaça. Deve promover a limpeza dos injetores e da câmara de combustão e também permitir longa vida aos filtros. Deve proporcionar a máxima autonomia possível em termos de consumo e, por fim, evitar a excessiva diluição do óleo lubrificante.

Assim, os combustíveis para motores diesel devem estar de acordo com especificações técnicas que venham a garantir um desempenho satisfatório dos motores, com o custo mais baixo possível de sua adequabilidade para os vários tipos de motores em suas diferentes condições de operação.

Dentre as especificações técnicas exigidas de um bom combustível destinado aos motores de ignição por compressão, a seguir são destacadas aquelas que estão mais diretamente relacionadas ao objetivo principal deste trabalho de pesquisa.

2.5.1 Viscosidade

Explica Guibet (1999) que a viscosidade necessita de especificações precisas, pois tem efeito direto na operação do motor. Um combustível viscoso em demasia aumenta as perdas por bombeamento na bomba injetora e nos injetores, resultando numa pulverização deficiente, que afeta o processo de combustão. Em contraponto, uma redução excessiva de viscosidade resultará no incremento das perdas internas da bomba injetora, por vazamento, reduzindo-se o volume liberado para o injetor e retardando a abertura da agulha do injetor. A viscosidade insuficiente pode causar o emperramento da bomba injetora devido à má lubrificação dos seus elementos.

Parente (2003) complementa dizendo que as características físico-químicas do biodiesel, independentemente de sua origem, são semelhantes entre si e não dependem da matéria-prima ou do seu agente de transesterificação, se etanol ou metanol. As propriedades fluidodinâmicas de um óleo diesel, mais importantes para a injeção e para a circulação do combustível, são a viscosidade e a densidade. Tais propriedades do biodiesel assemelham-se às daquelas do diesel mineral, indicando que “não é necessária qualquer adaptação ou ajuste no sistema de injeção dos motores”. O biodiesel oriundo do óleo de mamona foge um pouco dessa regra no quesito viscosidade, sempre mais elevada, mas mantendo equivalência para as demais propriedades.

Segundo Van Gerpen (2006), nos sistemas de injeção diesel mais utilizados, o combustível a ser injetado no cilindro é comprimido por uma bomba de elementos em cilindros (sistema Bosch). As folgas entre os elementos e os cilindros são da ordem de milésimos de milímetro nos sistemas de injeção atuais e, apesar desta folga reduzida, uma quantidade significativa de combustível vaza durante a compressão do combustível. Se a viscosidade do combustível é baixa, os vazamentos são significativos e provocam uma queda de potência do motor. Com viscosidade elevada a bomba injetora não é capaz de fornecer combustível suficiente para a câmara de bombeamento e o efeito final também será uma redução de potência. A faixa de viscosidade do biodiesel é superior à faixa do diesel de petróleo e se a viscosidade é excessiva, como no caso de óleos vegetais *in natura*, ocorre a degradação da pulverização do óleo no interior da câmara de combustão, reduzindo-se a eficiência de pulverização e de formação da mistura. A deficiência de pulverização promove a contaminação do óleo lubrificante e aumenta a produção de fumaça preta pelo escapamento.

Na Tabela 1 são apresentados dados de viscosidade para alguns tipos de biodiesel.

Tabela 1 – Dados de viscosidade para o biodiesel de alguns óleos e gorduras

Tipo de biodiesel	Viscosidade (mm².s⁻¹) @ 40°C
Éster metílico de óleo de mamona	11,58
Éster metílico de óleo de soja	4,08
Éster metílico de óleo de algodão	4,20
Éster metílico de óleos residuais	4,08
Éster metílico de óleo de girassol	4,24
Éster etílico de óleo de girassol	4,40 - 4,55
Éster etílico de óleo de soja	4,57
Éster etílico de gordura animal	4,20 – 6,00

Fonte: Adaptado de Silva *et al* (2004), Demirbas (2008), Bueno *et al* (2008) e Lang *et al* (2004).

Segundo Ejim *et al* (2007) os resultados de uma análise da influência das propriedades físicas do combustível sobre a pulverização, mostraram que a viscosidade responde pela maior contribuição, com cerca de 90,0% nas mudanças no tamanho das gotas, enquanto que a densidade contribui minimamente, causando menos de 2,0% de mudanças. Em pesquisas com combustíveis alternativos, a redução da viscosidade deve ser eleita a primeira opção entre as propriedades físicas, como forma de melhorar a pulverização nos injetores.

2.5.2 Número de cetano - NC

Bosch (2005, p. 321) explica que a qualidade de ignição traduz a adequação do combustível para a combustão espontânea em um motor de ignição por compressão. O número de cetano é um valor adimensional, que exprime a qualidade da ignição de um combustível diesel. Quanto maior for o seu valor, maior será a sua aptidão para a ignição. O número de cetano é obtido em motores normalizados, onde os combustíveis são ensaiados e comparados com certos padrões estabelecidos em normas internacionais. Um NC de valor igual a 100 (cem) foi atribuído ao n-hexadecano (cetano), um padrão de ignição muito fácil, enquanto que a naftalina metílica (alfametilnaftaleno), que apresenta queima muito lenta, recebeu o valor 0 (zero). Um NC superior a 50 é desejável para que se garanta uma boa operação dos motores modernos, cujo funcionamento deve ser uniforme e com baixos níveis

de emissão de escapamento. Números de cetano superiores aos obtidos, comercialmente, de derivados de petróleo podem produzir uma combustão incompleta com emissão de fumaça preta pelo escapamento, se o período de retardo de ignição é demasiado curto para permitir uma mistura apropriada de ar e combustível durante o tempo disponível para a combustão, advertem Liljedhal *et al* (1984).

Explica Parente (2003) que o número de cetano de um combustível está para o óleo diesel da mesma forma que o número de octano está para os combustíveis de motores de ignição por centelha. Portanto, quanto maior for o número de cetano de um combustível, mais facilmente entrará em combustão num motor de ignição por compressão. O número de cetano médio do biodiesel é 60. Enquanto que, para o diesel convencional, situa-se entre 48 e 52, indicando que o biodiesel queima mais facilmente num motor diesel do que óleo diesel mineral.

Conforme Van Gerpen (2006), os combustíveis com elevados números de cetano terão pequenos retardos de ignição e pequenas quantidades de combustível estarão presentes na fase de combustão em pré-mistura, em função do reduzido tempo de preparo da mistura para a combustão. Muitos tipos de biodiesel apresentam NC superiores ao do óleo diesel de petróleo e a prática demonstra que o número de cetano de um biodiesel depende, fundamentalmente, das matérias-primas de origem. Um biodiesel produzido com elementos saturados apresenta um número de cetano mais elevado que aqueles produzidos a partir de matérias-primas menos saturadas. O biodiesel de soja apresenta um NC entre 48 e 52, enquanto que o biodiesel de gordura animal, contendo mais ésteres saturados apresenta um valor entre 60 e 65.

Relembra Knothe (2006) que se os valores de número de cetano forem muito altos, ou muito baixos, podem causar problemas operacionais no motor. Se muito elevado, a combustão pode iniciar antes que o combustível e o ar estejam apropriadamente misturados. Resultando, assim, numa combustão incompleta e emissão de fumaça preta pelo escapamento. Por outro lado, se o número de cetano for muito baixo, o motor pode falhar e trepidar, demorar a aquecer e surgirem fenômenos característicos da combustão incompleta.

2.5.3 Densidade

Segundo Guibet (1999), a densidade de um combustível para motores diesel é uma propriedade fundamental, pois a bomba injetora e os injetores são construídos para dosar

volumes pré-determinados de um combustível-padrão, enquanto que o fator determinante na câmara de combustão é a relação entre massas de ar e de combustível. Assim, mudanças na densidade do combustível produzem efeitos sobre a combustão.

Alguns desses efeitos, como as variações no poder calorífico e na taxa de energia equivalente, são bem conhecidos. Porém outros, como as variações que ocorrem nas características das emissões, são mais difíceis de serem determinados.

Para Bosch (2005) existe uma correspondência razoavelmente constante entre o valor calorífico de um combustível e sua densidade. Combustíveis de densidade mais elevada apresentam um valor calorífico mais alto. Se os volumes de injeção são constantes, o uso de combustíveis com densidades diferentes em um dado sistema injetor, provoca variações nos coeficientes de mistura, derivando em flutuações do valor calorífico.

Combustíveis mais densos causam aumento na emissão de particulados, enquanto que densidades mais baixas diminuem o rendimento do motor.

Explica Van Gerpen (2006) que uma alta densidade pode compensar o baixo conteúdo energético por unidade de massa de um combustível. Como a bomba injetora dosa volumes, um combustível com baixo conteúdo energético (por unidade de volume) causará redução na potência produzida pelo motor.

O biodiesel não contém compostos aromáticos, mas contém alguns ésteres insaturados, que têm baixo conteúdo energético por unidade de massa, mas como apresenta alta densidade, têm mais energia por unidade de volume.

Como exemplo, o biodiesel metílico de óleo de soja apresenta um PCI de $37,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$ contra $42,6 \text{ MJ.kg}^{-1}$ do diesel fóssil. Por unidade de massa, o nível energético é 12,5% menor, mas como é mais denso, a diferença se reduz para cerca de 8,0% por unidade de volume ($32,9 \text{ MJ.dm}^{-3}$ contra $36,0 \text{ MJ.dm}^{-3}$ do petrodiesel).

Assim, motores diesel com o mesmo volume de injeção e operando com biodiesel, apresentarão perda de potência da ordem de 8,0%. Em alguns casos a perda de potência verificada pode ser ainda menor, pois a maior viscosidade do biodiesel reduz as perdas por vazamento interno na bomba de injeção e aumenta a quantidade de combustível que passa a ser injetado.

Testes têm mostrado que a eficiência real de conversão da energia do combustível, em potência, é a mesma para o biodiesel e o diesel de petróleo (Van Gerpen, 2006).

As principais características exigidas de um combustível diesel estão resumidas no Quadro 1.

Característica	Observações
Número de cetano (NC).	Medida de qualidade de ignição de um combustível diesel; NC elevado implica em reduzido tempo de atraso da ignição; Compostos com elevado peso molecular apresentam elevado NC; Influência sobre as emissões gasosas e de particulados; O valor do índice de cetano (IC) é bastante aproximado do NC, é calculado com base nas temperaturas de destilação (10,0%, 50,0% e 90,0%) e na densidade do combustível; Combustíveis com elevada temperatura de auto-ignição estão mais suscetíveis à detonação no motor diesel.
Faixa de destilação.	Influencia o rendimento do combustível e a segurança de uso; Importante para a partida do motor e para a fase de aquecimento; A presença de componentes de elevada temperatura de ebulição afetam o grau de formação de depósitos de sólidos de combustão; É necessária para determinação do índice de cetano.
Densidade.	É necessária para a conversão de volumes medidos em volumes, à temperatura padrão de 15°C; Usada para determinar o índice de cetano.
Calor de combustão.	Medida da energia disponível no combustível; Propriedade crítica para combustíveis destinados a uso em veículos de peso limitado.
Ponto de fulgor.	Indicativo da presença de componentes altamente voláteis e inflamáveis; Medida da tendência de formação de uma mistura inflamável com o ar; Usado para avaliar os riscos de inflamabilidade do combustível.
Viscosidade.	A viscosidade do combustível deve ser apropriada para a correta operação de um motor diesel; Importante para o fluxo do óleo através das canalizações, filtros, bicos injetores e orifícios de passagem; A efetiva pulverização do combustível nos cilindros requer uma faixa limitada de viscosidade, para evitar pressões de bombeamento excessivas.
Ponto de névoa, ponto de fluidez, ponto de entupimento de filtros.	Medidas de desempenho do combustível sob condições de baixa temperatura.
Material particulado.	Indica o potencial de emissões de material particulado; Conteúdo de partículas primárias de carbono; Fuligem (partículas carbonosas formadas na combustão), partículas que absorvem e carregam materiais carcinogênicos emitidas para o meio ambiente e que podem causar prejuízos à saúde humana. Excesso de partículas de fuligem pode causar obstrução das válvulas de escape; Inviabiliza o uso de catalisadores no sistema de exaustão.

Quadro 1 – Principais características dos combustíveis para motores diesel (Adaptado de Srivastava, 2000)

2.6 O biodiesel

É brasileiro um dos mais ricos acervos bibliográficos do mundo relacionados aos biocombustíveis. Todo o trabalho desenvolvido por grupos de pesquisa e por pesquisadores isolados contribuiu, sobremaneira, para a rápida evolução de uma tecnologia genuinamente brasileira e relacionada a toda a cadeia de utilização dos biocombustíveis, desde a sua produção até a avaliação dos impactos ambientais decorrentes. Também, em nível mundial, existe uma extensa bibliografia contendo registros de iniciativas de pesquisadores que buscaram nos biocombustíveis alternativas à utilização dos combustíveis fósseis, e que se encontra atualmente disponível.

No Brasil, qualquer referência ao biodiesel deve remeter aos trabalhos conduzidos pelo professor Expedito Parente, da Universidade Federal do Ceará, o pioneiro e batalhador incansável em defesa do seu biodiesel e é dele a primeira referência constante deste item.

Segundo Parente (2003), o que tem sido denominado de biodiesel é um combustível renovável e biodegradável, ambientalmente correto, e sucedâneo ao óleo diesel mineral, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol respectivamente.

Para Vicente *et al* (2004), o biodiesel é definido como um éster metílico ou etílico de ácidos graxos, originários de óleos vegetais ou gorduras animais, que são usados como combustível para motores diesel e sistemas de aquecimento. O biodiesel oferece como principais vantagens o fato de constituir-se numa alternativa ao óleo diesel de petróleo. Oferecer um balanço energético favorável, ser renovável, não-tóxico, biodegradável e auxiliar na redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se com os acordos firmados no Protocolo de Kyoto.

Observam Oliveira *et al* (2002) que o biodiesel é uma evolução do objetivo de substituição do óleo diesel mineral por derivados da biomassa, iniciado pelo aproveitamento de óleos vegetais *in natura*. O biodiesel é obtido através da reação de óleos vegetais ou gorduras animais com um intermediário ativo, formado pela reação de um álcool com um catalisador, segundo um processo conhecido como transesterificação. Como produtos do processo, obtêm-se os ésteres, constituintes do biodiesel, que apresentam características físico-químicas muito semelhantes às do óleo diesel de petróleo e o glicerol conforme demonstram experiências realizadas em diversos países.

Segundo Faria *et al* (2003), os compostos comumente classificados como biodiesel são os ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, que podem ser utilizados como combustível para motores diesel, sem que sejam requeridas alterações mecânicas significativas. Uma vantagem importante associada a seu uso, é o fato de que o biodiesel é obtido da biomassa, promovendo uma significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa. Sob o aspecto mecânico, um biodiesel apresenta propriedades de lubrificação superiores ao diesel fóssil e índices de cetano com valores maiores que 50, significativamente superiores ao mínimo requerido pela legislação brasileira, que é de 42 para o óleo diesel.

Em Brasil (2005), define-se que o biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis e que pode ser produzido pelos processos de craqueamento ou esterificação, a partir de gorduras animais ou de óleos vegetais obtidos de centenas de espécies com potencial de utilização no Brasil. O biodiesel visa substituir total ou parcialmente o óleo diesel mineral em motores de ciclo diesel automotivos ou estacionários, pode ser usado puro ou em misturas com o diesel em diversas proporções. Uma mistura contendo 2,0% de biodiesel, em volume, no diesel mineral é chamada de B2 e assim sucessivamente até que apenas o biodiesel puro reste na mistura que é reconhecida como B100. É importante frisar que o biodiesel pode ser usado em qualquer motor de ciclo diesel, com pouca ou nenhuma necessidade de adaptações.

Para Meirelles (2003), tecnicamente o biodiesel é definido como um éster alquílico de ácidos graxos, obtido a partir de um processo químico de transesterificação de um triglicerídeo com um álcool de cadeia curta. O processo consiste na reação química de um óleo vegetal ou animal com um álcool, na presença de um catalisador ácido (HCl) ou básico (NaOH). Como produtos, obtêm-se a glicerina e o éster metílico ou etílico, em acordo com o álcool utilizado.

Portanto, a transesterificação nada mais é do que a separação da glicerina do óleo vegetal, que visa a redução dos problemas funcionais causados pelo uso de óleos *in natura*, originários da biomassa como combustível de motores ICO.

Observam Faria *et al* (2003, p. 943) que o biodiesel é produzido majoritariamente pela transesterificação de óleos vegetais e gorduras animais por catálise básica homogênea, de onde se obtêm o biodiesel e o glicerol. O processo é extremamente simples e permite o uso de baixas temperaturas e de catalisadores de baixo custo, com conversões próximas aos 100,0%.

A transesterificação apresenta como inconvenientes o fato de que a separação do glicerol pode ser demorada e exige que os óleos utilizados devam apresentar baixos teores de ácidos graxos livres (inferior a 1,0%).

O custo associado aos óleos vegetais e gorduras utilizadas como matéria-prima é relativamente elevado e representa cerca de 80,0% do custo total de produção de biodiesel. No Quadro 2, estão reunidas as propriedades ditas complementares, que são normalmente atribuídas ao uso do biodiesel em motores diesel.

Atributo	Propriedades complementares
Características químicas apropriadas.	É biodegradável, livre de enxofre e de compostos aromáticos, apresenta alto número de cetano, ponto de combustão é apropriado, a lubricidade é excelente, não é tóxico.
Ambientalmente benéfico.	Nível de toxicidade comparável ao sal ordinário, com diluição tão rápida quanto à do açúcar.
Menos poluente.	Reduz sensivelmente as emissões de particulados, monóxido de carbono, óxidos sulfúricos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos.
Economicamente competitivo.	Complementa todas as novas tecnologias do diesel com desempenho similar e sem a exigência de instalações de infra-estrutura ou de políticas especiais de treinamento.
Reduz o aquecimento global.	O gás carbônico liberado é absorvido pelas oleaginosas durante o crescimento, o que equilibra o balanço negativo gerado pela sua emissão na atmosfera.
Economicamente atraente.	Permite a valorização de subprodutos de atividades agro-industriais, o aumento da arrecadação regional de ICMS, aumenta a fixação do homem no campo e os investimentos complementares em atividades rurais.
Regionalização.	Pequenas e médias plantas para a produção de biodiesel podem ser implantadas em diferentes regiões do país, aproveitando a matéria-prima disponível localmente.

Quadro 2 – Propriedades complementares atribuídas ao biodiesel (Fonte: Costa Neto *et al*, 2000)

2.7 O processo de transesterificação e suas matérias-primas

Em IEA (2000) verifica-se que o processo de esterificação permite, com baixo custo, a transformação das moléculas de óleos vegetais em moléculas similares aos hidrocarbonetos do óleo diesel, embora o custo do biodiesel seja superior. Com propriedades muito semelhantes àquelas do diesel fóssil, o biodiesel pode ser diretamente utilizado nos veículos diesel existentes ou misturado ao óleo diesel em quaisquer proporções.

O seu conteúdo de energia é cerca de 8,0% inferior ao diesel mineral, mas como apresenta maior densidade e melhores qualidades de ignição com seu número de cetano superior, pode-se alcançar a equivalência. O processo é relativamente simples, sob o aspecto técnico, devendo-se utilizar como catalisador o hidróxido de potássio (geralmente) e comercializar a glicerina residual que tem boa aceitação comercial.

Silva *et al* (2004) explicam que a transesterificação é um processo químico que consiste na reação de óleos vegetais com um produto intermediário ativo (metóxido ou etóxido), oriundo da reação entre um álcool (metanol ou etanol) e uma base (hidróxido de sódio ou de potássio). Como produtos dessa reação química, obtêm-se a glicerina e uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos, que é conhecida por biodiesel e apresenta características físico-químicas semelhantes às do óleo diesel tradicional.

O biodiesel pode ser usado diretamente em motores de combustão interna, voltados ao uso veicular ou estacionário. Como fontes de matérias-primas para a produção de biodiesel, podem ser consideradas as gorduras animais, todos os óleos vegetais enquadrados na categoria de óleos fixos e os óleos e gorduras residuais. Os óleos e gorduras de animais possuem estruturas químicas semelhantes às dos óleos vegetais.

Como moléculas triglicerídicas de ácidos graxos, que podem ser transformadas em biodiesel, destacam-se o sebo bovino, os óleos de peixes, o óleo de mocotó e a banha de porco, entre tantas outras de origem animal. Também podem ser usados óleos e gorduras residuais resultantes de processamentos domésticos, comerciais e industriais, que praticam frituras de alimentos como amêndoas, tubérculos, salgadinhos, e várias outras modalidades de petiscos.

Domingos *et al* (2004) observam que, por apresentar teores de óleo elevados (40,0% a 54,0%), boas características agrônômicas e ampla adaptação territorial, o girassol pode ser considerado uma matéria-prima extremamente interessante para a produção de biodiesel. O alto teor de óleo permite que sua obtenção seja realizada por extração mecânica, com a obtenção de uma torta de excelente valor nutricional. Apesar de apresentar uma aparente inviabilidade econômica, devido ao seu atual valor de mercado, o óleo bruto de girassol pode, enquanto matéria-prima, simplificar o processo de produção de biodiesel e diminuir o capital necessário para a implantação de unidades de produção em regiões mais remotas. Resultados de laboratório demonstraram que é possível produzir-se ésteres etílicos de qualidade a partir da etanolise de óleo bruto de girassol. Quando as condições reacionais tendem a razões molares etanol:óleo mais elevadas, temperaturas mais brandas e percentuais de catalisador próximos ao nível máximo, a separação dos ésteres da fase glicerínica se dá espontaneamente.

Rochael (2004) explica que a produção de biodiesel tem como principais insumos um óleo vegetal, um álcool e um catalisador. Entre as demais entradas necessárias ao processo encontram-se eletricidade, água, calor de processo e a mão-de-obra.

A grande influência do custo do grão da oleaginosa no custo final do biodiesel indica que a sua viabilidade econômica está ligada aos custos de produção e aquisição desta matéria-prima. Uma análise do processamento de biodiesel, a partir do óleo de girassol, indicou que a comercialização dos subprodutos é economicamente tão importante quanto a venda do próprio combustível.

A necessidade de venda dos subprodutos ficou evidenciada com o farelo de girassol, agregando um bom valor comercial e a glicerina bruta que, após ser destilada e purificada, constitui-se num produto de considerável valor de mercado. O processo de transesterificação para produção de biodiesel está representado na Figura 3.

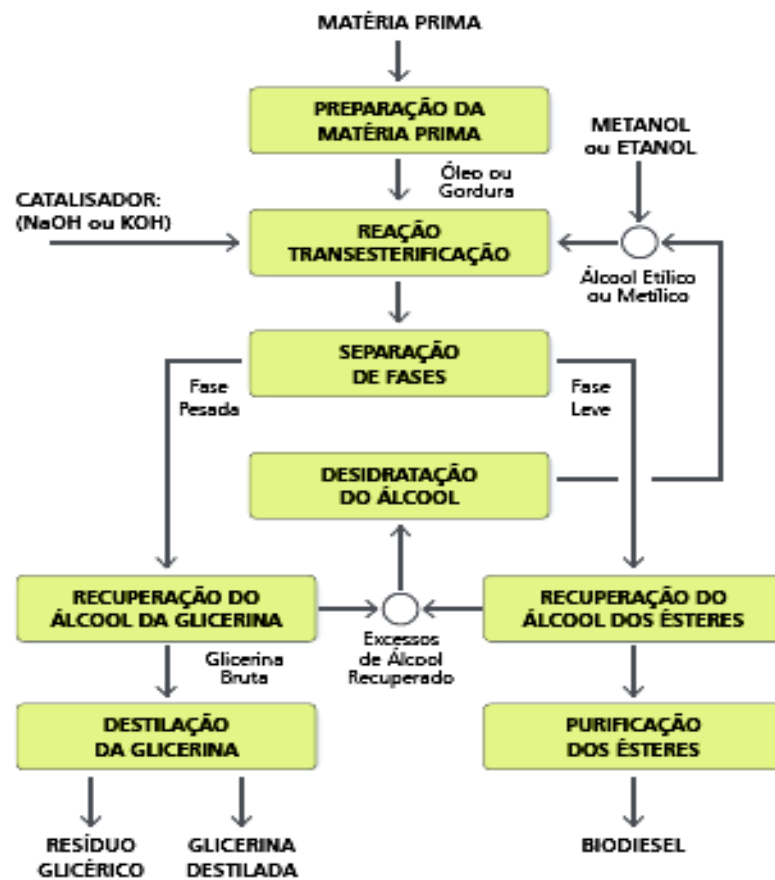


Figura 3 – Representação esquemática do processo de transesterificação (Fonte: Parente, 2003)

Para Agarwal (2007), as variáveis mais importantes que afetam a produção do biodiesel por transesterificação metílica incluem: temperatura de reação, taxa molar, tipo de catalisador, tempo de reação, presença de umidade e teor de ácidos graxos livres.

A taxa de conversão de óleos vegetais e gorduras animais em ésteres metílicos, para utilização como combustível, é fortemente influenciada pela temperatura da reação que, em geral, é conduzida próxima ao ponto de ebulição do metanol (entre 60 e 70°C) e à pressão atmosférica.

2.8 O biodiesel metílico

Destacam Riva *et al* (1994) que, com o processo de transesterificação, as características dos óleos vegetais se aproximam muito das do óleo diesel mineral. Para obtenção de um éster é necessária a reação do óleo bruto com álcool e um catalisador apropriado.

O álcool utilizado, na maioria dos casos, é o metanol.

A viscosidade dos ésteres metílicos fica entre 6,0 e 7,0 mm².s⁻¹ a 20°C, aproximada daquela do óleo diesel mineral. As características de fluidez a frio são tais, que o fazem apropriado a qualquer tipo de clima.

O número de cetano do éster metílico aumenta entre 12 e 15 pontos em relação ao diesel fóssil.

A experiência tem mostrado que os problemas advindos do uso de ésteres metílicos puros estão relacionados ao ataque a alguns polímeros usados no sistema de alimentação, à contaminação e diluição do óleo lubrificante, à formação de depósitos na câmara de combustão e ao emperramento dos anéis do pistão.

Em geral, tais problemas são pouco importantes e corrigíveis com a seleção apropriada de materiais e de lubrificantes ou com a alteração do cronograma de manutenção do motor.

A diluição do éster metílico no óleo diesel mineral em teores aproximados de 5,0% reduz, notavelmente, os efeitos adversos (Riva *et al*, 1994).

No Quadro 3 estão reunidas as recomendações dos Fabricantes de Equipamentos para Injeção (FIE) dos Estados Unidos da América do Norte (EUA), acerca dos possíveis problemas advindos do uso de ésteres metílicos como combustível de motores de ignição por compressão.

Particularidades	Efeitos	Tipo de falha
Éster metílico de ácidos graxos (geral).	Causam sobre alguns elastômeros, incluindo borracha nitrílica, dilatação, amolecimento ou endurecimento e quebra.	Vazamentos de combustível.
Metanol livre no éster.	Corrosão do alumínio e do zinco.	Corrosão do sistema injetor.
Processo químico do éster metílico.	Componentes sólidos de potássio ou sódio.	Bloqueio dos injetores.
Água dissolvida no éster.	Reversão do éster em ácido graxo.	Bloqueio de filtros.
Água livre em misturas.	Corrosão, manutenção de bactérias e aumento da condutividade elétrica do combustível.	Corrosão do sistema injetor; Formação de sedimentos.
Glicerina livre.	Corrosão de metais não ferrosos, encharcamento de filtros de celulose, formação de sedimentos e de lacas.	Bloqueio de filtros; Carbonização de injetores.
Ácidos graxos livres.	Corrosão do zinco, formação de sais de ácidos orgânicos e de alguns componentes orgânicos.	Corrosão dos componentes do sistema injetor; Bloqueio de filtros; Sedimentos localizados.
Alta viscosidade a baixas temperaturas.	Geração de calor excessivo localizado em bombas de distribuidor rotativo e elevada solitação dos componentes.	Redução da vida útil; Pulverização deficiente, jato combustível não apropriado; Trancamento da bomba injetora.
Impurezas sólidas.	Potenciais problemas de lubrificação.	Redução da vida útil.
Envelhecimento do éster		
Ácidos corrosivos (fórmico e acético).	Corrosão de todas as partes metálicas.	Corrosão do sistema injetor.
Ácidos orgânicos de elevado peso molecular.	Similar aos ácidos graxos livres.	
Produtos da polimerização.	Depósitos de misturas combustíveis.	Bloqueio de filtros; Formação de lacas em áreas quentes.

Quadro 3 – Problemas relacionados à utilização de ésteres metílicos como combustível em motores ICO (Adaptado de Norman *et al*, 2000)

2.9 O biodiesel etílico

Dantas (2006), num experimento de obtenção de biodiesel de óleo de milho obteve um índice de conversão de ésteres superior a 97,0%, tanto a partir da rota metílica como da etílica. A viscosidade dos ésteres apresentou-se com valores maiores que a do óleo diesel de petróleo, numa faixa sempre superior a $6,0 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Quando utilizados em misturas, os ésteres marcaram propriedades próximas às do diesel mineral, com uma significativa redução do teor de enxofre e mostrando sua eficácia ambiental.

Al-Widyan *et al* (2002) também experimentaram um éster etílico de óleos residuais, utilizado integral e em misturas com o óleo diesel convencional e observaram que a presença do éster produziu, em todos os ensaios, valores de potência superiores aos observados com o diesel fóssil. As maiores potências foram atribuídas ao maior fluxo de massa de combustível que ocorre em virtude das maiores densidade e viscosidade do éster etílico. O consumo específico observado foi inferior ao do óleo diesel de petróleo em todas as faixas de rotação do motor. Explicaram que os combustíveis mais densos promovem um maior fluxo de massa, pois as bombas injetoras dosam volumes de combustível a ser injetados e que, com maior viscosidade, se reduzem as perdas internas (vazamentos) da bomba injetora.

Maziero *et al* (2005) avaliaram o uso de éster etílico de óleo de girassol, em substituição completa ao óleo diesel e observaram uma redução de desempenho do motor ensaiado, numa média de 7,6 % para potência, com um aumento de 9,8% no consumo específico de combustível. As disparidades foram atribuídas às diferenças entre os valores de poderes caloríficos do éster etílico de girassol e do óleo diesel.

Korus *et al* (1994) destacam que os testes de desempenho têm demonstrado que o biodiesel é um combustível similar ao óleo diesel. Em geral, os valores de torque e potência são similares ao diesel de petróleo. O problema de carbonização de injetores é maior para ésteres etílicos e, em geral, as propriedades físicas e químicas e o desempenho nos ensaios de motores dos ésteres etílicos são comparáveis aos apresentados pelos metílicos.

Tanto os ésteres etílicos como os metílicos apresentam conteúdos de energia muito aproximados. Porém, a viscosidade dos etílicos é ligeiramente superior e o ponto de fluidez é mais baixo que o dos ésteres metílicos. Os testes de motores demonstram que o éster metílico produz valores de torque e potência ligeiramente superiores aos do éster etílico e valores praticamente idênticos para consumo específico de combustível.

Os atributos desejáveis em combustíveis ICO, vantajosos dos ésteres etílicos sobre os ésteres metílicos, são a opacidade (densidade de fumaça), significativamente menor, e as temperaturas de exaustão mais baixas. Algumas conclusões importantes referentes aos dados de caracterização de óleos combustíveis mostram algumas similaridades e diferenças entre o biodiesel etílico e o óleo diesel de petróleo, que estão resumidas no Quadro 4.

Característica/desempenho	Biodiesel
Densidade.	Maior que a do diesel convencional de petróleo, em torno de 5,0%.
Calor de combustão.	Menor, em cerca de 10,0%.
Viscosidade.	1,3 - 2,1 vezes maior, em função do material de origem.
Ponto de fluidez.	1° a 25°C maior do que o óleo diesel.
Conteúdo de enxofre.	De 20,0 a 50,0% do valor do diesel de petróleo.
Opacidade (densidade de fumaça).	Menor em cerca de 75,0%.
Carbonização dos injetores.	Maior que com o óleo diesel convencional.
Potência do motor.	Menor, 5,0% em média.
Consumo de combustível.	Em base de massa, 7,0% maior; Em base volumétrica, 6,0% maior.
Eficiência térmica.	Igual à do diesel de petróleo.
Potência/torque/rotação.	Ocorre convergência entre as curvas de torque e de potência produzidas pelo motor alimentado com biodiesel em rotações elevadas do motor.

Quadro 4 – Comparação entre o biodiesel etílico e o diesel convencional, considerando as suas principais características relacionadas ao desempenho do motor

Encinar *et al* (2007) explicam que no processo de transesterificação, os álcoois de cadeia curta, mais frequentemente empregados, são o metanol, etanol e o butanol. Embora o uso de álcoois diferentes apresente algumas diferenças relativas à cinética da reação química, o alcance final de produção de ésteres é quase inalterável. Dessa forma, a seleção do álcool é baseada em considerações de custo de obtenção e de rendimento. Como o etanol pode ser produzido a partir de fontes renováveis e agricultáveis, faz com que possa ser alcançada a independência total dos produtos originados no petróleo.

Assim, a produção de ésteres etílicos em vez dos metílicos reveste-se de considerável interesse. Pois além da natureza inteiramente agrícola do etanol, a presença de um átomo extra de carbono na sua molécula promove um ligeiro incremento de conteúdo energético e do número de cetano do éster.

Outra importante vantagem do uso de etanol para a produção de biodiesel é que o éster etílico apresenta ponto de névoa e de fluidez menores que os dos ésteres metílicos, propriedades ligadas à facilidade de partida a frio do motor.

O Quadro 5 apresenta uma comparação entre os aspectos mais importantes relativos à produção de ésteres, segundo as rotas etílica ou metílica.

Características	Rota etílica	Rota metílica
Tecnologia.	Ainda em desenvolvimento.	Amplo conhecimento.
Complexidade.	Um pouco maior.	Menor.
Disponibilidade.	Excedentes no Brasil.	Material importado.
Toxidez e riscos.	Baixos.	Elevados.
Sustentabilidade ambiental.	Total.	Parcial.
Investimentos.	Altos.	Baixos.

Quadro 5 – Comparação entre rotas de produção de biodiesel (Adaptado de: Carvalho *et al*, 2007)

Ramos *et al* (2003) destacam que a importância de se produzir ésteres etílicos pode ser relacionada aos fatos de ser um combustível biodegradável e não agressivo ao meio ambiente, apresentar um potencial de redução de fuligem em até 50,0%, podendo ser usado puro e em misturas com o diesel de petróleo e apresentando alta lubricidade sem enxofre na composição.

Os ésteres etílicos podem ser utilizados imediatamente sem qualquer exigência, quanto à tecnologia de motores, principalmente se utilizados em misturas. A produção de ésteres etílicos compõe um balanço de carbono em ciclo praticamente fechado, pois é obtido de produtos renováveis e que pode ser utilizada como projeto de seqüestro de carbono (Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, MDL).

As vantagens e desvantagens das principais rotas de obtenção do biodiesel para o Brasil, foram resumidas no Quadro 6.

USO DO METANOL	
Vantagens	Desvantagens
O consumo de metanol na transesterificação é cerca de 45,0% menor do que o etanol anidro.	Apesar de poder ser produzido a partir da biomassa, é tradicionalmente um produto fóssil.
O preço do metanol é quase a metade do preço do etanol no exterior.	É bastante tóxico.
É mais reativo no processo de obtenção.	Por ser mais volátil, apresenta um maior risco de incêndios e a chama é invisível.
Para as mesmas taxa de conversão e condições operacionais, o tempo de reação é de menos da metade do que para o etanol.	O transporte é controlado pela Polícia Federal, por tratar-se de matéria-prima utilizada na extração de algumas drogas.
O consumo de vapor de processo e de eletricidade é menor do que para o etanol.	Apesar de ser ociosa, a capacidade atual de produção brasileira de metanol só garantiria o estágio inicial de um programa de âmbito nacional.
USO DO ETANOL	
Vantagens	Desvantagens
Produção de álcool etílico no Brasil já está consolidada.	Os ésteres etílicos possuem maior afinidade com a glicerina, dificultando a separação.
Produce biodiesel com maior índice de cetano e de maior lubrificidade que o biodiesel metílico.	Apresenta azeotropia quando em água. Com isso, sua desidratação requer maiores gastos energéticos e de investimentos em equipamentos.
Gera mais ocupação e renda no meio rural.	Os equipamentos do processo de uma planta com rota metílica é cerca de 25,0% do volume necessário para a rota etílica, para uma mesma produtividade e qualidade.
Gera ainda mais economia de divisas.	Dependendo do preço da matéria-prima, os custos de produção de biodiesel etílico podem ser até 100% maiores que o metílico.
Não é tóxico como o metanol.	
Apresenta menor risco de incêndios.	

Quadro 6 – Vantagens e desvantagens da utilização de metanol e etanol para produção de biodiesel (Adaptado de Costa *et al*, 2006)

Candeia *et al* (2006) na realização de um trabalho de obtenção de biodiesel a partir de diferentes rotas, destacaram um maior rendimento do biodiesel metílico: 98,1% em relação ao biodiesel etílico cuja conversão foi de 96,0%. Em relação ao tempo necessário para a conclusão do processo, o metanol apresentou vantagens, pois o etanol necessitou do dobro de tempo para a finalização da conversão. Porém, em termos econômicos e de toxicidade, o biodiesel etílico é mais favorável que o metílico. Concluíram o trabalho afirmando que cada

rota produz um tipo de biodiesel com características particulares, as quais, muitas vezes, são favoráveis sob alguns critérios e em outros não o são. Como o Brasil possui uma grande oferta de etanol, a viabilidade de opção pela rota etílica deverá ser mais vantajosa.

2.10 A importância do jato de injeção

Pollini Filho (1988) ressalta que a pulverização é o principal fator a ser considerado, para se alcançar uma boa combustão. Para os óleos combustíveis é necessário conhecer-se a variação da viscosidade do óleo com a variação de sua temperatura, para determinação das faixas onde se obtém uma bombeabilidade econômica, avaliando os níveis de pré-aquecimento necessários. A viscosidade deve estar adequada ao atomizador, pois se for elevada em demasia, pode ocorrer dificuldades de bombeamento, pelo aumento da perda de carga na tubulação, exigindo mais potência da bomba, diminuindo a vazão de óleo para o bico injetor, que pode acarretar pulverização deficiente (se o óleo não estiver pré-aquecido).

Em um trabalho de Wu *et al* (2006) observou-se que o jato pulverizado de um combustível oxigenado (éster metílico de óleo de colza) assemelha-se a uma estrutura de guarda-chuvas, diferentemente da estrutura coniforme observada para a injeção do óleo diesel convencional. Comparado ao leque de injeção produzido pelo óleo diesel, o ângulo de cone do combustível oxigenado é mais obtuso e com penetração do jato mais curta, com gotas emergentes do injetor de menor dimensão. A intensidade do vórtice produzido na saída da agulha do injetor é maior e mais violenta.

A viscosidade de combustíveis oxigenados produz um efeito significativo sobre o comportamento da injeção. A pulverização de misturas contendo combustíveis oxigenados incrementa, à medida que incrementa a quantidade destes na mistura, e isso fica mais evidente em misturas contendo proporções maiores que 75,0% de ésteres na mistura.

Para Kegl (2008), as diferenças de propriedades do óleo diesel e de um B100 modificam as características da injeção, produzindo diferentes jatos de combustível atomizado. Uma comparação entre os jatos de combustível produzidos pelo óleo diesel de petróleo e um B100, mostra que o jato do biodiesel é mais estreito e com maior alcance. As diferenças são atribuídas a baixa vaporização e pulverização deficiente, em consequência de maiores tensão superficial e viscosidade do B100, levando a uma maior penetração do jato combustível e maior tamanho médio de gotas pulverizadas.

Os ensaios para avaliar a influência do uso do B100 sobre as características de um motor sob plena carga, mostraram que o torque e a potência decrescem cerca de 5,0%, com consumo maior em 10,0%. A temperatura dos gases de exaustão decresce em torno de 30°C devido ao menor poder calorífico do B100.

Para Lee *et al* (2002, p. 414) a avaliação do jato combustível obtido sob elevadas pressões e temperaturas com combustíveis leves, mostram que uma baixa densidade e baixa tensão superficial do combustível levam à maior pulverização e melhor mistura combustível. A pulverização e a evaporação são, efetivamente, afetadas pela pressão de vapor do combustível. A Figura 4 apresenta a caracterização do jato pulverizado por um bico injetor de orifício único, característico dos motores diesel de injeção indireta.

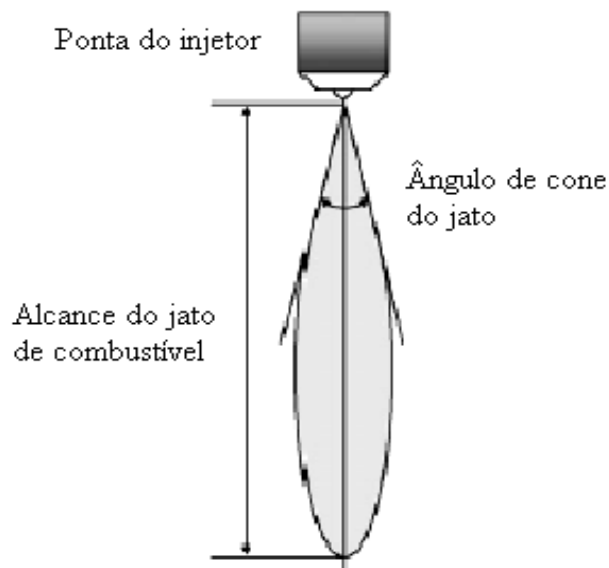


Figura 4 – A caracterização do jato combustível em injetores de orifício único (Adaptado de: Suh *et al*, 2007)

2.11 A importância do avanço inicial de injeção

“Devido a atrasos mecânicos, hidráulicos, químicos e de inflamação, o motor diesel necessita de um avanço do início da injeção para que esta se efetue antes que o pistão chegue ao ponto morto superior (PMS)” (Boulangier *et al*, 1978).

Um experimento conduzido por Kegl (2008), ao avaliar o uso de B100 em motores diesel, mostrou que, nas condições de ensaio, o mínimo consumo específico de combustível foi obtido com um retardo do avanço de injeção de 23° para 19°, antes do ponto morto superior (APMS). Isso, pode ser explicado pela natureza do sistema de combustão do motor ensaiado, com pré-câmara e injetor único, que produz a melhor condição de turbulência para formação da mistura otimizada, quando a injeção do B100 é avançada em apenas 19°APMS. Nessa condição de avanço, a pressão máxima no cilindro é menor que com 23°APMS, baixando a temperatura máxima e reduzindo as emissões de NO_x e as temperaturas dos gases de exaustão. O avanço de injeção de 19°APMS, para o biodiesel, oferece o compromisso de melhor acerto do motor com o bom desenvolvimento de todas as características dele, sob as suas diferentes cargas e regimes de rotação. Os resultados dos ensaios mostraram que o motor alimentando pelo B100 e com um avanço de injeção de 19° APMS contra os 23°APMS originais, mostraram que os níveis de emissões de HC e de NO_x foram reduzidos em todos os regimes de rotação e carga considerados.

A emissão de fumaça, somente, foi maior em regime de marcha lenta e a emissão de CO foi maior, apenas, em alguns regimes. O uso do biodiesel num motor de injeção indireta e com o ponto de avanço da injeção otimizado resultou em redução das emissões de CO, HC, NO_x e fumaça em 25,0%, 30,0%, 25,0% e 50,0%, respectivamente. Uma análise das características de injeção mostra que aumenta pulverização, duração e ponto de injeção, taxa média de combustível injetado e a pressão de injeção do biodiesel em diversos regimes de operação do motor. A elevada velocidade de injeção e as maiores viscosidade e densidade levam à redução do atraso de ignição e ao avanço do ponto de injeção.

Dominguez (1995) cita o caso dos motores do Grupo SLH, em que o desenvolvimento do sistema de injeção de combustível, visando reduzir as perdas ocasionadas pelo uso de ésteres, conduziu a um sistema que incrementa a quantidade de combustível injetado e antecipa em 1° (além do original) a injeção no torque máximo e em 2° na máxima potência.

2.12 O uso de pré-aquecimento de biocombustíveis:

Quase a totalidade dos trabalhos que envolvem aquecimento de biocombustíveis é referente à utilização de óleos vegetais ou animais *in natura*. Em geral, quando se fazem referências a aquecimento de combustíveis, o foco principal das pesquisas é a formação do

jato pulverizado ou avaliação das características físicas dos biocombustíveis, com pouquíssimos registros de utilização de biodiesel aquecido diretamente em motores. Mais raros são dados de desempenho do biodiesel aquecido em ensaios de motores em dinamômetro. Assim, neste item, o foco principal da revisão de literatura é, inevitavelmente, a utilização de óleos vegetais ou animais *in natura*.

Ogura *et al* (2002) afirmam que o maior efeito de difusão e a maior velocidade de formação do jato de combustível nos primeiros estágios da injeção de óleo diesel foram obtidos com um combustível em temperaturas mais elevadas. Enquanto o jato de combustível pulverizado, que se forma a temperaturas mais baixas tem a forma de um guarda-chuva com um vazio no seu interior, em temperaturas elevadas, a forma é também de um guarda-chuva, porém completamente preenchido. A maior difusão do experimento foi alcançada quando se utilizou a temperatura de 100°C, em comparação a um jato dos mesmos combustíveis a 30°C.

Peterson *et al* (1983), afirmam que: “Aquecer o combustível para aumentar a temperatura do mesmo na bomba injetora não resulta em um incremento correspondente na temperatura do injetor, que se situa em torno de 85°C e é considerada típica de motores ICO”. Ao avaliar a viscosidade e a tensão superficial de óleos vegetais a 85°C, concluíram que há influência significativa do ponto de injeção sobre a adequada execução do jato de pulverização do óleo combustível. Para que se consiga a otimização dos combustíveis oriundos da biomassa, é necessário introduzir algumas modificações nos motores, tornando-os capazes de operar com tais combustíveis.

Segundo Nwafor (2004) um motor diesel alimentado por óleo de colza *in natura* apresenta um consumo específico de combustível maior que o do óleo diesel de petróleo e, sob uma condição de aquecimento a 80°C, o consumo é similar ao óleo diesel convencional. Os resultados dos ensaios indicam o incremento na temperatura de exaustão quando se utiliza o óleo aquecido e observa-se, também, uma redução no período de retardo em relação ao óleo *in natura* sem aquecimento.

O óleo não aquecido e o óleo diesel mostram um incremento na produção de CO, à medida que a carga é aumentada e as concentrações de HC não-queimado na exaustão foram maiores quando operando apenas com o óleo diesel. Os resultados mostram, conclusivamente, que o óleo diesel consome mais O₂ que o biocombustível e que o aquecimento do biocombustível é benéfico nas condições de baixas velocidades e cargas parciais de operação.

Ejim *et al* (2007) avaliaram a variação de algumas propriedades físicas de alguns ésteres combustíveis e suas misturas em diferentes proporções com o óleo diesel de petróleo,

quando submetidos ao aquecimento na temperatura de 80°C e os principais resultados de seu trabalho estão reunidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Variação das principais propriedades físicas de ésteres e suas misturas com diesel convencional a 80°C

Combustível	Composição (%)	Densidade (kg/ℓ)	Tensão Superficial (m.N/m)	Viscosidade cinemática (mm ² .s ⁻¹)
Óleo diesel interior	100	0,801 ± 0,5%	25,21 ± 2,0%	1,40 ± 1,4%
Amendoim	B100	0,837 ± 2,5%	26,93 ± 5,9%	2,11 ± 1,9%
Canola	B100	0,841 ± 2,8%	27,21 ± 6,9%	2,09 ± 2,0%
Colza	B100	0,841 ± 2,5%	27,82 ± 5,8%	2,58 ± 2,1%
Coco	B100	0,823 ± 2,3%	24,01 ± 5,2%	1,41 ± 2,3%
Dendê	B100	0,830 ± 2,6%	26,16 ± 6,0%	2,08 ± 3,1%
Soja	B100	0,841 ± 2,6%	27,15 ± 6,0%	2,01 ± 1,5%
Algodão	B100	0,837 ± 2,7%	26,81 ± 6,2%	2,01 ± 1,9%
Colza + OD	B20	0,809 ± 0,7%	25,72 ± 1,6%	1,58 ± 1,2%
Coco + OD	B20	0,805 ± 0,6%	24,97 ± 1,6%	1,40 ± 1,2%
Dendê + OD	B20	0,807 ± 0,7%	25,40 ± 1,6%	1,52 ± 1,4%
Soja + OD	B20	0,807 ± 0,7%	25,59 ± 1,6%	1,50 ± 1,2%
Algodão + OD	B20	0,808 ± 0,7%	25,52 ± 1,6%	1,50 ± 1,2%
Colza + OD	B5	0,803 ± 0,5%	25,34 ± 1,9%	1,44 ± 1,3%
Coco + OD	B5	0,802 ± 0,5%	25,15 ± 1,9%	1,40 ± 1,3%
Dendê + OD	B5	0,802 ± 0,5%	25,26 ± 1,9%	1,43 ± 1,3%
Soja + OD	B5	0,803 ± 0,5%	25,30 ± 1,9%	1,43 ± 1,3%
Algodão + OD	B5	0,803 ± 0,5%	25,29 ± 1,9%	1,43 ± 1,3%

Fonte: Ejim *et al* (2007).

Num trabalho conduzido por Tate *et al* (2006) ficou determinado que os ésteres metílicos de óleo de canola e de óleo de soja e o éster etílico de óleo de peixe, sob aquecimento, reduzem significativamente sua viscosidade e observa-se um decréscimo linear de densidade à medida que a temperatura aumenta. Com a temperatura, o valor de redução de densidade temperatura estimado foi de 1,23 g.dm⁻³.°C⁻¹, para uma faixa de temperaturas entre 20 e 300°C.

2.13 As emissões residuais dos motores diesel

2.13.1 A formação de fumaça nos motores diesel

Obert (1971) explica que devido às características de formação de mistura e da combustão heterogênea no motor diesel, pode aparecer fumaça nos gases de descarga, que pode ser classificada ou como fumaça quente ou fumaça fria.

A fumaça fria consiste em uma névoa de partículas de combustível líquido não-queimado ou de óleo lubrificante e resulta do resfriamento da combustão, especialmente em marcha lenta ou carga leve, quando a relação de mistura ar e combustível é elevada.

Essa fumaça fria é agravada pela mistura intensa de pequenas quantidades de combustível, em carga leve e com o ar frio, ou por contato do combustível com as paredes frias da câmara. A fumaça fria é de cor branca. Quando ocorre a combustão, em regiões de mistura super-ricas, aparecem partículas de fuligem (carbono), que podem não encontrar ar até que a temperatura do cilindro tenha se reduzido abaixo do nível de combustão.

A fumaça quente são partículas carbonáceas de combustível e apresenta-se como cinza-clara ou negra. A fuligem forma-se diretamente pela deficiência de ar. Como a escassez de ar para a combustão completa, apresenta-se em altos regimes e altas cargas, a fumaça aparece quando o motor é super solicitado.

Reduzindo-se a carga ou otimizando a mistura, a fumaça quente pode ser eliminada e, de maneira correspondente, pode-se eliminar a fumaça fria através do aumento da taxa de compressão ou usando combustíveis de número de cetano mais elevado.

Para Van Gerpen (2005), as condições heterogêneas da relação de mistura de ar com o combustível presente no cilindro durante o processo de combustão, contribuem para a formação de partículas de fumaça.

As partículas são formadas em regiões da câmara de combustão, onde as temperaturas são altas e a mistura é excessivamente rica e constituem-se, principalmente, de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio e compostos inorgânicos.

O material particulado, presente na exaustão do motor, compõe-se de partículas de fumaça e de hidrocarbonetos com alto peso molecular (fração orgânica solúvel) que as adsorvem e reduzem a temperatura durante o curso de expansão e também no duto de escape.

2.13.2 As emissões do biodiesel e de suas misturas com diesel de petróleo

Para Kegl (2007), em todas as condições de ensaios consideradas em seus experimentos, as emissões de NO_x crescem usando um B100, exceto na marcha lenta. A maior formação de NO_x é uma conseqüência do avanço de injeção inapropriado, pois foi usado aquele do diesel de petróleo e, devido ao fato do biocombustível possuir um maior conteúdo de oxigênio que acaba por reagir com o nitrogênio do ar circundante.

Os níveis de fumaça, as emissões de CO e HC não-queimados são reduzidos quando se utiliza um B100, devido ao fato de que o biocombustível contém maiores teores de oxigênio, que auxilia na oxidação dos produtos da combustão no interior do cilindro. As emissões de HC são menores que para o óleo diesel de petróleo, exceto à plena carga onde ocorre o oposto. Para redução das emissões danosas, especialmente de NO_x , a influência do ponto de injeção é significativa.

Al-Widyan *et al* (2002) determinaram as emissões produzidas por misturas de ésteres etílicos de óleos residuais com o diesel convencional em variadas proporções e observaram que todas as misturas e o éster puro resultaram em menores valores das emissões de CO e HC, principalmente em regimes de rotação elevados, denotando uma melhor preparação e combustão da mistura nestas condições. A tendência observada foi atribuída à presença de oxigênio no éster, que facilita a combustão.

Maziero *et al* (2005) destacam que nos valores das emissões ponderadas, produzidas por ésteres etílicos de óleo de girassol puro, houveram diferenças percentuais de 32,2 % para as emissões de CO (redução), 4,8% para CO_2 (redução); 5,7% para NO_x (aumento), 31,0% para HC (redução) e 41,0% para MP (redução).

Puhan *et al* (2005) obtiveram um biodiesel de óleo não-alimentar extraído da Mahua (*Madhuca indica*) por meio da transesterificação com etanol na presença de H_2SO_4 na temperatura de ebulição do etanol. O éster foi ensaiado em um motor monocilíndrico, a 4 tempos e de injeção direta, apresentando melhores resultados que os do óleo diesel de petróleo, em termos de desempenho, e de emissões residuais.

O éster queima mais facilmente que o petrodiesel e as emissões de CO, HC, NO_x e fumaça preta decresceram em 58,0%, 63,0%, 12,0% e 70,0%, respectivamente, em relação ao ensaio com diesel convencional, sugerindo que o éster de óleo de Mahua pode ser usado como substituto do óleo diesel em motores de ignição por compressão.

2.14 Desempenho de motores alimentados com biodiesel

Ferrari *et al* (2005) avaliaram um biodiesel etílico de óleo de soja num gerador de energia elétrica em misturas com o óleo diesel comercial em diferentes proporções. Nessa avaliação, os resultados mostraram uma redução de consumo específico de combustível pelo equipamento, quando a mistura continha até 20,0% de éster (B20). Ao manterem o teor de biodiesel na mistura sempre acima de 20,0%, ocorreu uma elevação significativa no consumo de combustível.

Maziero *et al* (2005) destacaram que a utilização do éster etílico de óleo de girassol, como combustível de motores diesel, mostrou-se viável, com uma pequena redução de desempenho do motor. A potência ponderada produzida pelo motor alimentado pelo biodiesel de girassol, foi reduzida em torno de 10,0%, com um aumento do consumo específico de combustível de até 21,0%.

Silva *et al* (2006) em experimentos com biodiesel de óleos residuais e suas misturas com óleo diesel de petróleo, observaram uma redução de potência do motor para 91,3% a 97,0% da potência com diesel, respectivamente, para o uso de um B100 e de uma mistura B50. Da mesma forma, o torque do motor foi reduzido para 93,8% e 97,1%, respectivamente, com o uso do B100 e do B50, em relação do torque produzido quando se utilizaram do óleo diesel. O consumo do B100 foi, praticamente, o mesmo do diesel mineral. Portanto, foi verificado um consumo de 7,6% maior, quando se utilizaram do B50.

Canakci (2007, p. 1173) ao caracterizar os efeitos das propriedades do éster metílico de soja sobre as características de combustão, desempenho e emissões de um motor diesel sem modificação, concluiu que o consumo específico do biodiesel (B100) foi maior que todos os combustíveis testados. Atribuiu o maior consumo apresentado pelo biocombustível ao seu menor conteúdo energético.

O biodiesel produz significativas reduções nas emissões de CO, HC e fumaça, se comparadas ao óleo diesel tradicional. As emissões de NO_x são maiores para o biodiesel e as temperaturas dos gases de exaustão são menores que as do óleo diesel mineral, indicando que o B100 tem a combustão antecipada e com um longo período de expansão. O início da injeção do B100 ocorreu antecipadamente, provavelmente devido à combinação das diferentes propriedades físicas do combustível e da mudança nas quantidades de combustível dosado pelos padrões volumétricos da bomba injetora. O período de retardo da combustão do biodiesel foi mais curto do que para o combustível mineral.

A combinação da injeção antecipada e o curto período de retardo da combustão causam antecipação do início da combustão. Assim, indicam, claramente, que o ponto de avanço da injeção deve sofrer ajustes.

Costa *et al* (2006) dizem que o biodiesel possui um poder calorífico menor do que o diesel de petróleo, mas esse inconveniente é compensado pelo maior número de cetano. Isso, quer dizer que o biodiesel possui uma combustão mais fácil e aproveita melhor o seu conteúdo energético, de forma que os consumos específicos dos dois combustíveis se equivalem, com testes de aplicabilidade, ao demonstrarem que não há redução significativa na potência e nem no torque do motor.

Com o biodiesel dentro das especificações adequadas, a vida útil do motor não deve ser alterada relativamente àquela do óleo diesel. Os gases de combustão produzidos pelo biodiesel puro apresentam uma redução média de 35,0% dos hidrocarbonetos não-queimados, 55,0% dos materiais particulados, 78,0 a 100% dos gases de efeito estufa e 100,0% dos compostos sulfurados e aromáticos. Os gases de combustão do biodiesel podem proporcionar um acréscimo de até 10,0% nas emissões de NO_x que, junto com os HC não-queimados, são os precursores do efeito *smog* fotoquímico.

Segundo Domínguez (1995), as experiências mais prolongadas de utilização de óleos vegetais modificados (transesterificados com etanol ou metanol), principalmente colza e girassol, foram realizadas na Áustria, Suíça, França, Alemanha e Espanha. Ao longo destas experiências, foram e continuam sendo buscadas soluções para os maiores problemas que afetam a utilização do biodiesel: redução da potência, diluição do óleo lubrificante pelo éster metílico, a compatibilidade de materiais com o novo combustível e os depósitos de carvão nas válvulas.

2.15 Especificações do biodiesel

Knothe (2005) ressalta que as propriedades do biodiesel são fortemente influenciadas pelas propriedades dos ésteres de ácidos graxos presentes. As proporções de ácidos graxos e de álcool podem ter considerável influência sobre as propriedades do éster combustível derivado, tais como número de cetano, calor de combustão, fluidez a frio, estabilidade à oxidação, viscosidade e lubricidade. Também influenciam, significativamente, as emissões de exaustão produzidas. Geralmente, o número de cetano, o calor de combustão, o ponto de

fulgor e a viscosidade dos componentes graxos puros aumentam com o comprimento da cadeia e decrescem com o aumento da insaturação.

As Tabelas 3 e 4, a seguir, dão as especificações preliminares para o biodiesel (B100) e, as atuais, utilizadas para o óleo diesel mineral, para permitirem uma comparação entre as diferenças permitidas.

Tabela 3 – Especificações preliminares para o biodiesel utilizado no Brasil

Características	Unidades	Limites	Métodos		
			ABNT NBR	ASTM D	ISO
Ponto de fulgor, mínimo	°C	100	14598	93	ISOCD 3679
Água e sedimentos, máximo	% vol	0,050	-	2709	-
Viscosidade @ 40°C	mm ² .s ⁻¹	Anotar	10441	445	ENISO 3104
Cinzas sulfatadas, máximo	% massa	0,020	9482	874	ISO 3987
Enxofre total, máximo	% massa	0,001	-	5453	ENISO 14596
Corrosivid. ao cobre 3h, 50°C, máx	-	1,0	14359	130	ENISO 2160
Número de Cetano, mínimo	-	45	-	613	ENISO 5165
Ponto de entupimento a frio, máx	°C	Anotar	14747	6371	-
Resíduo de Carbono, máximo	% massa	0,05	-	4530 189	prEN 14104
Índice de acidez, máximo	mgKOH/g	0,80	14448	664	prEN 14106
Glicerina livre, máximo	% massa	0,02	-	6584	prEN 14105
Glicerina total, máximo	% massa	0,38	-	6584	-
Aspecto	-	LII	-	-	-
Destilação (95%), vol. rec., máximo	°C	360	-	1160	-
Massa específica @ 20°C	kg.m ⁻³	Anotar	7148/14065	1298 4052	-
Etanol (metanol), máximo	% massa	0,5	-	-	prEN 14110
Índice de iodo, máximo	% massa	Anotar	-	-	prEN 14111
Monoglicerídeo, máximo	% massa	1,00	-	6584	prEN 14105
Diglicerídeo, máximo	% massa	0,25	-	6584	prEN 14105
Triglicerídeo, máximo	% massa	0,25	-	6584	prEN 14105
Sódio + Potássio, máximo	mg.kg ⁻¹	10	-	-	prEN 14109
Fósforo, máximo	mg.kg ⁻¹	10	-	4951	prEN 14107
Estabilidade oxidação a 110°C, mín.	h	6	-	-	prEN 14112

(Fonte: ANP)

Tabela 4 – Especificações para o óleo diesel padrão de ensaios de consumo e de emissões utilizado no Brasil

Características	Unidades	Limites	Métodos	
			ABNT NBR	ASTM D
Aspecto		Aprovado (1)	14954 (2)	4176 (2)
Cor ASTM, máximo		3,0	14483	1500
Enxofre total, máximo	% massa	0,003	14875 -	1522 2622
Destilação	°C		14533	4294
50,0% vol. recuperado, mín		245	14359	5453
90,0% vol. recuperado		320-340	-	4294
PFE (ponto final de ebulição), máximo		370	14747	130
Massa específica @ 20°C	Kg.m ⁻³	835-845	7148 14065	1298 4052
Ponto de fulgor, mínimo	°C	55	7974 14598	56 93
Viscosidade @ 40 °C	mm ² .s ⁻¹	2,5-3,5	10441	3828 445
Ponto de entupimento de filtro a frio, mínimo	°C	3,0	14747	6371
Número de cetano		49-52	-	613
Resíduo de carbono Ramsbottom no resíduo dos 10% finais da destilação, máximo	% massa	0,20	14318	524
Carbono aromático, máximo	Volume	25	-	3238
Cinzas, máximo	% massa	0,010	9842	482
Corrosividade ao cobre, 3 h a 50°C, máximo	-	1	14359	130
Água e sedimentos, máximo	% volume	0,05	14647	1796

(Fonte: ANP)

- (1) Limpida e isenta de água ou material em suspensão, conforme condições determinadas nos métodos especificados para avaliação do aspecto.
- (2) Procedimento 1.

O principal papel da ANP (2005), em relação aos biocombustíveis é, atualmente, finalizar as especificações do biodiesel. Muitas são as motivações para especificar esse combustível, entre elas, o fato de que a padronização é fundamental para o desenvolvimento de pesquisas que, atualmente, encontram-se em andamento no país. Também, a necessidade de proteção do consumidor e do meio ambiente e a sempre necessária busca de sucedâneos do

óleo diesel com minimização de conflitos entre diversos agentes econômicos envolvidos. Entre as principais justificativas para a adição de biodiesel ao óleo diesel mineral, pode-se destacar a efetiva redução das emissões de particulados, o aumento da lubricidade do combustível com teores reduzidos de enxofre e o aumento do número de cetano, permitindo, assim, uma combustão teoricamente mais eficiente.

Contudo, a ANP ressalta que alguns pontos ainda devem ser esclarecidos nos testes do biodiesel, tais como: a influência da matéria-prima de origem, a estabilidade da mistura com os diversos tipos de óleos diesel comercializados no Brasil, o impacto ambiental das emissões de NO_x e a compatibilidade entre as especificações para o biodiesel obtido pela rota metílica e pela rota etílica.

2.16 Ensaios de um motor de combustão e suas curvas características

2.16.1 Dinamômetros e ensaios de motores

Explica Stone (1999) que o ensaio de motores de combustão interna é uma importante fase da pesquisa, desenvolvimento e aprendizado acerca dos mesmos e que os meios usados para pesquisa podem ser bastante instrumentalizados, com controle computadorizado do teste e da aquisição de dados.

Define Obert (1971) que a medição de potência, trabalho executado na unidade de tempo, tem importância fundamental na análise do desempenho de um motor e, para determiná-la, utilizam-se freios de diferente natureza, que são reconhecidos como “dinamômetros”. A escolha do tipo de dinamômetro depende da finalidade a que se destina o equipamento. Se a capacidade de absorção de potência for o fator preponderante, o dinamômetro de correntes de Foucault (elétrico) ou de Froude ou Vane (hidráulicos), deverão ser os preferenciais, tendo em vista o seu custo relativamente baixo e o fato de serem ambos adequados para elevadas rotações.

Para Martinewski *apud* Camargo (2003), os dinamômetros hidráulicos podem ser utilizados para medição de potência da maioria dos motores de combustão interna, considerando-se o potencial de absorção em elevadas rotações e o custo operacional reduzido, quando comparados aos dinamômetros elétricos.

Os relatos de Stone (1999) indicam que o dinamômetro é o item mais importante num banco de provas de motores, e é utilizado para medir a potência, o torque e o consumo específico de combustível de um motor. Apontam que a principal desvantagem de um dinamômetro elétrico é o seu custo inicial de aquisição e a limitação de rotação em cerca de 3000 rpm.

A importância de se conhecer a Norma (padrão) sob a qual serão realizados os ensaios de um motor em dinamômetro, é ressaltada por Poydo (2003). Pois, de acordo com o padrão técnico-normativo escolhido, existirão diferenças nos valores obtidos, para maior ou para menor. As Normas geralmente utilizadas são:

- SAE – Sob esta Norma testam-se os motores com (SAE líquida) ou sem (SAE bruta) os seus agregados de série, que consomem potência: alternador, bomba d'água, polias diversas, filtro de ar, sistema de exaustão e abafamento, etc.. O teste é realizado sob condições de temperatura ambiente de 15,6 °C, umidade relativa de 0,0% e pressão atmosférica de 101.325 Pa (760 mmHg).
- DIN – Testam-se os motores da forma como serão aplicadas no veículo ou máquina agrícola, com todos os agregados de série nas mesmas condições ambientais da SAE.
- IGM – Norma italiana similar à Norma DIN.
- ABNT – Desenvolvida com base nos parâmetros da DIN alemã, porém nas condições ambientais de 25 °C e na pressão de ar seco, que representa a média das dez principais cidades brasileiras e é igual a 99.000 Pa.

A Norma NBR 5484 (1985) (ou NBR ISO 1585, 2006) define que a “potência efetiva líquida” é a potência desenvolvida pelo motor com todos os equipamentos e acessórios necessários ao funcionamento autônomo na sua aplicação particular e que constituem estes, se existirem: bomba de óleo lubrificante, bomba de líquido de arrefecimento do motor, equipamento de controle de emissões, gerador (operando em vazio), coletores de admissão e escapamento, ventoinha do motor (arrefecimento a ar), filtro de ar, silenciadores de admissão e escapamento, freio motor de escapamento, filtro de combustível, pós-arrefecedor do ar de admissão e ventoinha do radiador (motores de arrefecimento líquido).

A Norma NBR 5484 (1985) define ainda que “potência observada” é a potência disponível no volante do motor nas condições atmosféricas em que o ensaio foi realizado e que a potência reduzida é a potência observada reduzida às condições atmosféricas de referência, com o uso de fatores de correção multiplicativos (vide Capítulo 3 do trabalho).

2.16.2 Curvas características de motores de combustão

Segundo Chollet (1981), para qualquer tipo de freio dinamométrico empregado, hidráulico, elétrico ou mecânico, o motor é normalmente testado com o acelerador totalmente acionado, ou seja, a plena carga de alimentação para observação da máxima potência. Regulando a eficácia de frenagem, pode-se reduzir a velocidade de rotação do motor até freá-lo completamente ou deixa-lo embalar-se ociosamente.

Para conhecimento das exatas características do motor, mede-se a sua potência para diversos regimes de rotação. Inicia-se pelos baixos regimes (1500 rpm, por exemplo) e após, eleva-se a rotação em intervalos definidos e quantos mais, melhor, até atingir o regime máximo onde a potência começa a diminuir. Os resultados obtidos irão constituir as curvas características de desempenho do motor. Geralmente, para caracterizar o desempenho do motor de combustão interna, utilizam-se as curvas de torque, de potência e de consumo específico de combustível em função da rotação do motor.

O conhecimento das características exatas de um motor de combustão, segundo Rahde (2002), é possível se sua potência é medida em diversos regimes de rotação, iniciando-se pelos baixos regimes (1000 rpm) e subindo de 250 em 250 rpm, por exemplo, até o regime máximo, a partir do qual a potência começa a diminuir. Os resultados obtidos permitem traçar a curva de potência do motor. Traça-se, em geral, também a curva de torque. O torque indicado em N.m e, atualmente, tende-se a dar mais importância ao torque que à potência.

De fato, o torque motor depende diretamente do impulso transmitido pelos pistões ao virabrequim. O torque informa de maneira precisa a forma de enchimento do cilindro, o aproveitamento da carga admitida durante a combustão e a força expansiva da carga queimada.

A curva de potência (em kW) é o produto do torque do motor em N.m pela sua velocidade de rotação em rpm. Durante testes de dinamômetro, mede-se com exatidão o consumo de combustível para cada regime de rotação e conhecendo-se a potência desenvolvida, calcula-se o consumo específico de combustível em $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$.

Segundo o boletim técnico nº 1 do CENEA (1982), o conjunto de curvas características de um motor para máquinas agrícolas deve incluir: potência, torque e consumo específico em função da rotação do motor. No caso específico de tratores, o que se necessita conhecer é a potência disponível na tomada de potência (TDP) e na barra de tração cujos valores variam de trator para trator.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Considerações iniciais

Neste trabalho de avaliação do desempenho de um motor diesel, alimentado por ésteres de óleos vegetais e de sebo bovino, os combustíveis foram aquecidos como forma de adequar a sua viscosidade ao sistema de injeção mecânica original do motor, observando-se a qualidade do jato de combustível emergente do bico injetor. A elevação de temperatura dos combustíveis foi promovida por um sistema de aquecimento elétrico no reservatório, antes da bomba injetora.

Como os biocombustíveis para motores diesel apresentam características distintas àquelas do óleo diesel mineral, principalmente, em termos de viscosidade, densidade e número de cetano, nos ensaios foram experimentados, além do aquecimento, ajustes no avanço da injeção. Buscou-se alcançar o maior aproveitamento de cada combustível para melhorar o desempenho do motor diesel em tais condições.

Com a utilização do pré-aquecimento ocorre uma redução de viscosidade que, em associação com os ajustes no avanço da injeção, devem conduzir à formação de um jato de combustível melhor atomizado e com maior dispersão na câmara. A otimização da mistura ar/combustível facilita o processo de combustão propriamente dito, aumentando a eficiência do motor e reduzindo as emissões dos principais gases poluentes pelo sistema de exaustão.

Um princípio básico em motores de combustão interna dita que a melhor mistura de ar e combustível, produzirá o melhor processo de combustão se este ocorrer no momento mais apropriado para o desenvolvimento da força.

Todos os ensaios do experimento foram conduzidos com o motor, na condição de máxima alimentação, sob plena aceleração e débito máximo da bomba injetora, segundo determinam as Normas NBR 5484 (NBR ISO 1585) e 5477 da ABNT para ensaios de motores. Foram observados e analisados o torque, a potência efetiva e o consumo específico de combustível do motor como as principais variáveis independentes do experimento. Nos testes, classificados como sendo de curta duração, também foram anotadas as temperaturas dos gases de exaustão e do sistema de arrefecimento, por constituírem-se em úteis ferramentas

de análise das condições de funcionamento do motor ou de eventos que se desenvolvem durante o processo de queima.

A pesquisa com combustíveis não-convencionais tem sempre como foco principal àquele que deve ser substituído e, portanto, o parâmetro de comparação, nesse trabalho, foi sempre o desempenho do motor alimentado pelo óleo diesel convencional. Como no Brasil, atualmente, se passou a consumir um óleo diesel aditivado com 2,0% de biodiesel, este B2 foi considerado o óleo diesel-padrão, para os ensaios-testemunha.

Os trabalhos de pesquisa com combustíveis devem sempre contemplar uma avaliação do impacto de possíveis mudanças sobre o ambiente. Assim, uma avaliação dos principais gases residuais de combustão foi conduzida para verificação da eficácia dos tratamentos e das modificações introduzidas no sistema de alimentação do motor para uso dos ésteres.

Apesar de não existir uma normalização de ensaios de emissões em dinamômetro de bancada no Brasil, julgam-se válidos os resultados obtidos, quando considerados apenas como indicativos de tendências e se aplicadas as mesmas condições de ensaio a todos os ésteres testados. Deve-se salientar que, para validação dos ensaios de emissões, devem ser seguidas as prescrições normalizadas que indicam uma média de teores dos principais gases emitidos pelo motor instalado no veículo ou na máquina durante um ciclo-padrão de ensaios.

3.2 Local do experimento

Todos os procedimentos, trabalhos de adaptação, montagens e desmontagens, aferições, modificações e ajustes necessários à realização dos ensaios de avaliação de desempenho de um motor diesel, quando alimentado pelos biocombustíveis aquecidos, foram desenvolvidos pelo Laboratório de Motores de Combustão Interna do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.

Para a produção em pequena escala de alguns ésteres etílicos contou-se com a colaboração do Laboratório de Processos do Departamento de Engenharia Química, sendo que as principais propriedades características dos ésteres foram determinadas nos dois laboratórios utilizados. E, para o experimento, foram necessários grandes volumes de biodiesel, sendo utilizados, também, ésteres produzidos por empresas que participam dos leilões de biodiesel ou instituições públicas certificadas pela ANP.

3.3 Os combustíveis

3.3.1 O óleo diesel B2

O óleo diesel convencional utilizado no ensaio testemunha é um combustível classificado pela ANP como sendo o Diesel Interior (tipo B), indicado para uso em motores de ciclo diesel e instalações de aquecimento de pequeno porte. A partir do mês de setembro de 2007, a Petrobrás passou a comercializar, na região, como o óleo diesel-padrão, um óleo diesel aditivado (B2) com 2,0% de éster etílico ou metílico.

O óleo diesel B2 deverá ser utilizado no Brasil até meados deste ano de 2008, como o óleo diesel convencional para motores de ignição por compressão, pois existe a possibilidade de utilização de um B3 no país a partir do mês de julho. Antecipando, assim, algumas metas do Programa do Biodiesel.

Para o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa, o óleo diesel e os ésteres foram obtidos e/ou adquiridos na sua totalidade antes do início dos trabalhos, acondicionados em reservatórios apropriados, selados e armazenados como forma de evitar possíveis contaminações e degradação.

No Anexo A (Tabela A5) encontram-se as principais especificações técnicas para o óleo diesel no Brasil.

3.3.2 Os ésteres combustíveis utilizados

Como as pesquisas com biodiesel têm, de forma dinâmica, alcançado uma evolução acentuada nos últimos meses no Brasil, buscou-se avaliar as alternativas que apresentam um potencial de utilização real e afastando-se um pouco daquilo que, tradicionalmente, vem sendo pesquisado. Em geral, os ensaios com biodiesel envolvem a utilização de ésteres metílicos produzidos a partir do óleo de soja, que responde por mais de 90,0% dos óleos vegetais produzidos no país (ABIOVE, 2007) e que é citado, geralmente, como o único óleo com excedente suficiente para atender a um crescimento da demanda de forma imediata, como consequência do uso do biodiesel.

Porém, o óleo de soja apresenta agravantes: ser um óleo voltado ao consumo alimentar e ainda, por tratar-se de uma importante *commoditie*. Fez-se a escolha dos ésteres combustíveis devido à potencialidade emergente que os mesmos apresentam, atualmente, no País.

A cultura do girassol para produção de biodiesel foi intensificada nos últimos anos no Estado do Rio Grande do Sul (RS) e a utilização do sebo bovino para o mesmo fim, tem sido muito bem focada. Isso, devido aos elevados volumes produzidos, no RS e na região central do Brasil, e ao seu baixo custo de aquisição.

Devido aos enormes volumes de óleos e gorduras animais produzidos pelos grandes frigoríficos, a transformação destes em ésteres, passou a ser focalizada como uma alternativa de disposição final desses resíduos ou como forma adicional de agregar valor a produtos que, em muitas situações, são tratados como rejeitos.

Como houve disponibilidade de um éster metílico de sebo bovino produzido por uma empresa certificada pela ANP, oportunizou-se a utilização de uma mistura de ésteres, oriundos de diferentes matérias-primas e rotas de transesterificação, como forma de verificação da possível influência de um tipo de éster sobre o outro, em função das diferenças de propriedades físico-químicas observadas.

Além das pequenas diferenças de densidade e viscosidade dos ésteres, se verifica uma significativa diferença no número de cetano dos ésteres de origem animal, que alcança até 15 pontos a mais, em favor do éster etílico de sebo bovino em relação aos ésteres de origem vegetal.

No Anexo A, são apresentadas algumas propriedades dos ésteres combustíveis utilizados no experimento e o Quadro 7 reúne as denominações utilizadas para os diferentes tipos de biodiesel.

<i>Nome</i>	Combustível
<i>Óleo diesel B₂</i>	Óleo diesel aditivado com 2,0% de éster de óleos vegetais
<i>ETGIR</i>	Éster etílico de óleo de girassol (B100)
<i>SEBO</i>	Éster etílico de sebo bovino (B100)
<i>MISTURA</i>	Mistura de éster etílico de óleo de girassol e éster metílico de sebo bovino, numa proporção volumétrica de 50% + 50%.

Quadro 7 – Denominação dos combustíveis utilizados no experimento

3.4 Os testes de bicos injetores

Para regulagem da pressão de abertura dos injetores e observação das diferenças de forma do jato atomizado, em função da natureza dos combustíveis e das temperaturas de pré-aquecimento, utilizou-se um dispositivo manual de teste de injetores de fabricação BACHARACH INSTRUMENT, originária dos Estados Unidos, modelo 65-1021. O dispositivo de teste fornece a pressão de abertura do bico injetor, por meio de um manômetro aferido com capacidade de até 5.000 *psi* (34,4738 MPa) e com a escala subdividida em intervalos de 50 *psi* (0,34474 MPa). Assim, proporciona a sensibilidade necessária para a observação de possíveis variações de forma do jato, considerando os níveis de pressão de injeção característicos da bomba e dos injetores utilizados. Um registro fotográfico do dispositivo de teste de injetores utilizado encontra-se na Figura 5.

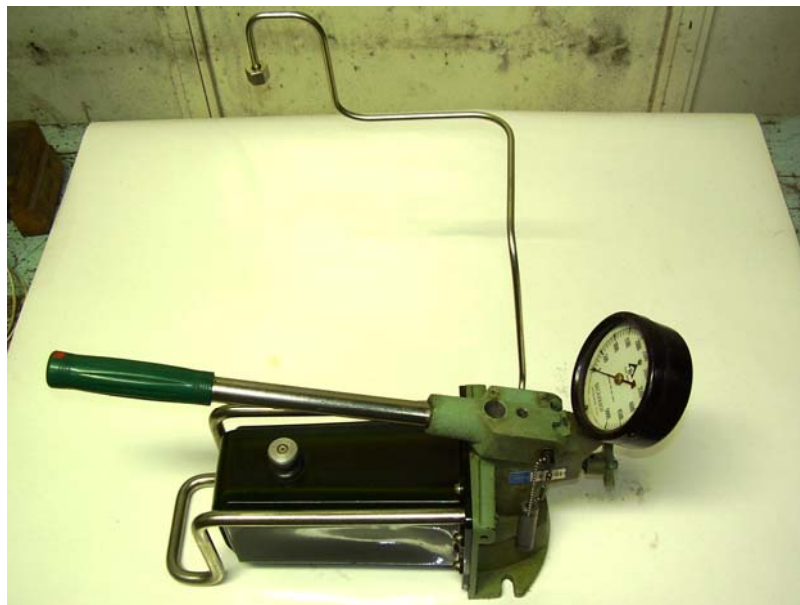


Figura 5 – Dispositivo manual de teste de injetores

Antes do início das avaliações, o teste de injetores teve as suas pressões características confrontadas com uma moderna máquina de teste de bombas injetoras, aferida segundo as prescrições do INMETRO, num concessionário local da marca BOSCH, tradicional fabricante de sistemas e dispositivos para injeção de combustível diesel.

A comparação serviu para observação do comportamento do manômetro utilizado no dispositivo, como forma de verificação da precisão apresentada para assegurar-se que não houvesse distorções nos resultados indicados. Para verificação de qualidade do jato pulverizado, foram consideradas as recomendações do fabricante dos injetores e do motor, buscando-se as características recomendadas por Delacourt *et al* (2005), Rao *et al* (2003), Wu *et al* (2006) e Suh *et al* (2007). Apesar de o motor utilizado nos ensaios não ser muito exigente sob o aspecto de formação de um jato atomizado com perfeita abertura do leque de injeção, foi buscada sempre a maior pulverização possível do líquido.

3.5 Os valores de temperatura de pré-aquecimento dos combustíveis

O aquecimento dos ésteres combustíveis visou estabelecer os valores de viscosidade que permitissem a produção de um jato atomizado com formas aproximadas àquelas apresentadas pelo óleo diesel de petróleo, sem que fossem alcançadas as temperaturas de formação de vapores.

Os testes de injeção foram conduzidos com variações de temperatura dos ésteres, aquecidos com um aquecedor elétrico de laboratório, numa proveta, até alcançarem a temperatura de 90°C, antes de serem introduzidos no reservatório do dispositivo de teste dos injetores. O controle da temperatura do combustível foi realizado por um conjunto de termômetros (líquido em vidro) cujos bulbos foram posicionados próximos à tomada da câmara de pressão do dispositivo. À medida que a temperatura do combustível decrescia, monitorava-se a formação do jato emergente do injetor durante uma série de 10 injeções realizadas e anotavam-se os valores de temperatura apontados pelo termômetro.

Foram realizadas três repetições do mesmo procedimento, para cada combustível, até que a temperatura no dispositivo de testes alcançasse, de forma natural, o valor de 40°C, temperatura normalmente observada no retorno da bomba injetora dos motores diesel. A observação das faixas de temperaturas em que melhor se desenvolvia o jato combustível, determinou as temperaturas a serem utilizadas no experimento. Mesmo que os jatos de combustível pulverizado, produzidos pelos ésteres em temperatura ambiente, tenham apresentado diferença de forma em relação ao do óleo diesel B2, o uso de tal condição, nos ensaios, foi necessária para verificação da influência da condição de pré-aquecimento sobre o desempenho do motor.

Portanto, além dos ensaios conduzidos em temperatura ambiente (TA), utilizou-se o pré-aquecimento dos ésteres em duas faixas específicas de temperatura e que passaram a ser chamadas de T55 e T75, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Temperaturas de pré-aquecimento utilizadas

Nome	Faixa (°C)	Utilização
TA	Sem aquecimento	Utilizada para todos os ensaios com ésteres combustíveis e com o óleo diesel B2
T55	50° - 60°	Utilizada para todos os ensaios com ésteres combustíveis
T75	70° - 80°	Utilizada para todos os ensaios com ésteres combustíveis

A escolha das temperaturas de pré-aquecimento do experimento, deveu-se essencialmente ao aspecto do jato atomizado e buscando-se a forma do leque de injeção sugerido na literatura e pelos fabricantes de bicos injetores e de motores diesel.

3.6 O motor utilizado no experimento

A escolha do motor de testes deveu-se às características de injeção do mesmo (indireta) cujo sistema injetor é o mais indicado para a queima de combustíveis mais viscosos e por permitir elevados regimes de rotação, atributo essencial para avaliação da influência entre o número de cetano de um combustível diesel e possíveis ajustes no sistema de injeção.

Experiências anteriores indicaram que os biocombustíveis mais viscosos queimam mais eficientemente em rotações elevadas, atribuindo-se à turbulência do ar e à melhor taxa de entrega do combustível, a promoção de uma maior dispersão do combustível na câmara que conduz a uma combustão mais completa (Machado, 2003).

O motor utilizado nos ensaios é de fabricação nacional e destinado às aplicações automotiva e industrial, também já foi utilizado como fonte motriz em pequenos sistemas de geração de energia elétrica independente (monofásicos e trifásicos) e, no Brasil, foi apresentado como motorização original do modelo Volkswagen Kombi diesel. Na Tabela 6 estão reunidas as principais características técnicas originais do motor.

Tabela 6 - Características técnicas originais do motor de ensaios

Item	Característica
Marca/modelo	Volkswagen
Prefixo de identificação do motor	BE
Número e disposição de cilindros	4 (quatro), verticais em linha
Diâmetro nominal do cilindro	76,50 mm
Curso do pistão	86,40 mm
Ciclo	Diesel a 4 tempos
Relação de compressão	23,5:1
Volume total	1588,49 cm ³ (≈1,59 litros)
Bomba injetora	BOSCH,
Sistema de combustão	Injeção indireta, câmara de pré-combustão
Ordem de injeção	1 – 3 – 4 – 2
Ponto de injeção estático	0, 86 ± 0,01 mm (medido na bomba injetora)
Injetores	BOSCH DN OSD
Pressão para teste de injetores	12,75 a 13,53 MPa (130 a 138 kgf/cm ²)
Pressão teste de estanqueidade	10,79 a 11,57 MPa (110 a 118 kgf/cm ²)
Sistema de arrefecimento	Líquido, forçado por bomba
Rotação normal (<i>STD</i>)	850 a 5000 rpm
Rotação de marcha lenta	850 a 950 rpm
Potência máxima nominal	36,8 kW (50 cv) @ 4500 rpm (ABNT)
Torque máximo nominal	93,163 N.m (9,50 m.kgf) @ 3400 rpm (ABNT)

Fonte: Volkswagen do Brasil.

Antes do início dos ensaios, o motor foi desmontado para realização das medidas dos seus órgãos internos e de todos os seus componentes. E, para os que não apresentavam suas dimensões ou condições dentro das especificações de fábrica, esses foram recuperados, utilizando-se somente componentes originais.

As montagens do motor seguiram sempre, criteriosamente, as determinações do fabricante para as operações de sincronismo, de torques de aperto e de determinação das folgas, recomendados pelo manual de reparações e de oficina dos veículos diesel da marca.

3.7 A bomba injetora do motor diesel dos ensaios

A bomba injetora característica do motor utilizado no experimento é do tipo rotativo, de especificação VE, fabricação BOSCH sob o código *0460 424 102* e reúne vários sistemas integrados em uma mesma carcaça. No mesmo corpo da bomba VE existe uma bomba de alta pressão cuja função é gerar a pressão necessária à injeção, distribuindo o combustível entre os cilindros do motor. Um regulador centrífugo, no corpo da bomba, garante a manutenção de uma rotação mínima na marcha lenta, a determinação da rotação máxima para a bomba, mantém a relação ar-combustível do motor. A Figura 6 representa os diversos grupos constituintes das bombas distribuidoras BOSCH VE rotativas, onde o grupo 1 reúne a bomba alimentadora e a válvula reguladora da pressão de trabalho da bomba e o grupo 2 mostra a bomba de alta pressão com o distribuidor.

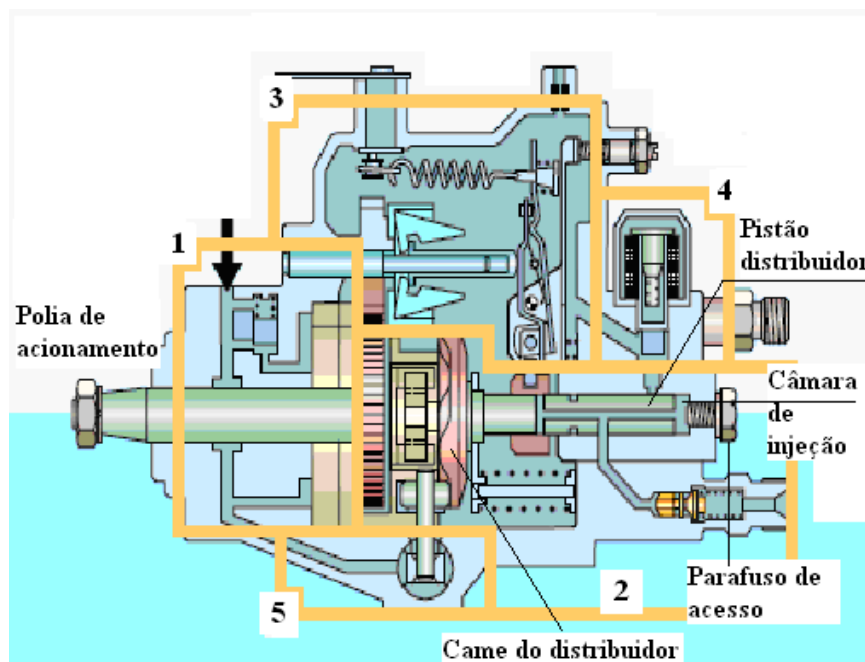


Figura 6 – Grupos componentes da bomba distribuidora BOSCH VE. (Fonte: Bosch, 2003)

O grupo 3 é constituído pelo regulador mecânico de rotações e pelo parafuso oco de sangria permanente e arrefecimento. O grupo 4 é a válvula do dispositivo de parada e o grupo 5 é o responsável pela variação do avanço da injeção.

Na bomba, encontra-se, também, o dispositivo de parada, que tem a função de cortar a passagem do combustível para dentro da câmara de alta pressão e o dispositivo de avanço de injeção, que antecipa o momento da injeção para impedir o atraso da injeção em elevadas velocidade de rotação.

3.8 Ajustes do ponto de avanço da injeção

Em virtude das diferenças de composição e de propriedades físicas e químicas existentes entre os biocombustíveis utilizados e o óleo diesel aditivado (B2), além do tratamento de pré-aquecimento, foram experimentados três diferentes pontos de avanço de injeção para avaliar a sua interferência, quando da utilização de biocombustíveis puros em substituição ao óleo diesel de petróleo. Na Tabela 7, estão os valores de avanço da injeção utilizados e que se constituíram em um dos fatores de tratamento a que foram submetidos os ésteres combustíveis.

Tabela 7 – Valores de avanço de injeção utilizados no experimento

Avanço	Deslocamento do pistão distribuidor (mm)	Correspondência angular no virabrequim (graus)	Diferença em relação ao avanço original (graus)
P0	0,86	25° APMS	Valor-padrão (original)
P2	0,70	23° APMS	2 graus atrasado
P4	0,47	21° APMS	4 graus atrasado

Os principais fatores de montagem de motores diesel, determinantes e que influenciam significativamente o seu desempenho, são o ponto do eixo de comando de válvulas e o ponto de avanço da injeção. A referência universal utilizada para montagem de motores de combustão interna é o pistão de número 1 (um) em seu PMS. Cada fabricante de motores determina as marcas de referência necessárias à montagem dos componentes e sistemas, para assegurar o sincronismo entre o movimento dos pistões, abertura e fechamento das válvulas e o instante em que deve ser realizada a injeção do combustível.

O motor VW BE utilizado no experimento deve ter o sincronismo do movimento do comando de válvulas com o movimento dos pistões garantido quando, com o pistão de nº 1 em seu PMS, houver a coincidência de uma fenda existente na parte posterior do eixo de comando de válvulas, com a face superior do cabeçote do motor. Este sincronismo exige uma ferramenta especial que, ao ser introduzida na fenda, posiciona o comando de válvulas e permite o ajuste do ponto de avanço da injeção na bomba injetora. A polia do comando de válvulas não utiliza chaveta, constituindo-se numa peça de encaixe cônico que permite giro livre até que os dentes da polia acomodem os dentes da correia dentada de acionamento do sistema de distribuição. Após determinada esta condição de sincronismo, um parafuso fixa seu posicionamento na extremidade também cônica do comando de válvulas.

Assim, concomitantemente, devem ser realizadas as etapas de posicionamento do pistão número 1 no PMS, de travamento do eixo de comando de válvulas pela ferramenta especial e posicionamento da bomba injetora, segundo a recomendação.

Depois de garantida tal condição para montagem, devem ser realizados os apertos do parafuso do comando de válvulas, o dos quatro parafusos da bomba injetora e o da porca do tensor da correia dentada do sistema de distribuição. Uma observação importante a ser feita é que, devido à virtual inexistência de câmara de combustão no cilindro (injeção indireta, com pré-câmara), o pistão aproxima-se muito do cabeçote e qualquer erro de montagem pode provocar o choque das válvulas com o pistão no PMS.

A elevada pressão necessária para que a injeção de combustível se processe é promovida pelo deslocamento do pistão distribuidor apresentado na Figura 6. O pistão distribuidor movimenta-se longitudinalmente acionado pelo came (ressalto) do distribuidor e determina também o volume de combustível a ser injetado, em função de suas dimensões e do posicionamento da luva (bucha) de regulagem. O combustível presente na câmara de injeção é pressionado até que haja coincidência entre um canal interno existente no pistão distribuidor e aberturas radiais no cilindro do pistão distribuidor, que determinarão a distribuição do combustível para os cilindros na ordem e no instante adequado. No caso do motor de ensaios, existem quatro aberturas radiais, uma para cada cilindro.

Tal operação ocorre, porque o pistão distribuidor, além do movimento longitudinal, é dotado de um movimento radial promovido pela polia dentada de acionamento, instalada na extremidade do eixo principal da bomba injetora. A polia é movimentada pela correia dentada do sistema de distribuição do motor, que é acionado pelo virabrequim numa relação de transmissão de 2:1. Com a correia do sistema de distribuição instalada, o posicionamento do eixo principal da bomba fica definido.

A exemplo do que ocorre com o distribuidor do sistema de ignição dos motores de ciclo Otto, que tem um eixo com posição definida mas permite o giro da mesa do distribuidor para definição do avanço de produção da faísca, nas bombas injetoras Bosch VE, o princípio de ajuste do avanço de injeção é semelhante. A partir do posicionamento do eixo principal da bomba injetora, garantido pelo sincronismo do comando de válvulas com o virabrequim (pistão nº 1 no PMS), a bomba permite, através do giro de todo o corpo dela, a determinação do início do deslocamento do pistão distribuidor pelo came.

A recomendação do fabricante do motor, para ajuste do avanço de injeção, é que quando o pistão nº 1 encontrar-se no PMS, o pistão distribuidor já deve ter cumprido $0,86 \pm 0,02$ mm do seu curso total, definido pela altura do came do distribuidor. Para que o ajuste do ponto de injeção possa ser executado, a retirada do parafuso de acesso (Figura 6) permite a instalação de um dispositivo rosqueável de fixação de um relógio micrométrico, cujo apalpador deve tocar a extremidade do pistão distribuidor no interior da bomba injetora.

Assim, ao girar-se o motor manualmente, quando o pistão de nº 1 atingir o ponto morto superior determinado pela marca original de referência (OT) no volante, o relógio micrométrico deve acusar um valor de $0,86 \pm 0,02$ mm. Para o experimento, foi considerado o valor de 0,86 mm como o valor ótimo indicado pelo fabricante e constituiu-se num dos valores de avanço de injeção utilizado para os ensaios com todos os combustíveis.

Valores inferiores a 0,86 mm indicam que a injeção encontra-se atrasada em relação ao ponto de projeto (ponto de avanço original) e valores superiores indicam ponto de injeção mais avançado. O valor de 0,86 mm correspondente a um ponto inicial de injeção de 25° APMS, foi o único valor de avanço utilizado para o óleo diesel combustível (B2).

Conforme relatos de Kegl (2008), são recomendados, para utilização de biocombustíveis oxigenados, pontos de injeção atrasados em relação ao original, para que se obtenham os melhores resultados em termos de consumo específico de combustível e de emissões de NO_x . Tal fato atribui-se às diferenças de número de cetano apresentada pelos biocombustíveis. Assim, além do avanço original utilizado para o óleo diesel foram experimentados mais dois pontos de avanço da injeção, correspondentes a 2° e 4° de atraso em relação ao recomendado.

A determinação da correspondência entre o deslocamento angular do virabrequim e o deslocamento linear do pistão distribuidor se deu através da observação das indicações do relógio micrométrico na bomba injetora e dos ângulos apontados por um disco de grau instalado no eixo de comando de válvulas. A Figura 7 mostra a instalação do disco de grau utilizado na extremidade do eixo de comando de válvulas.

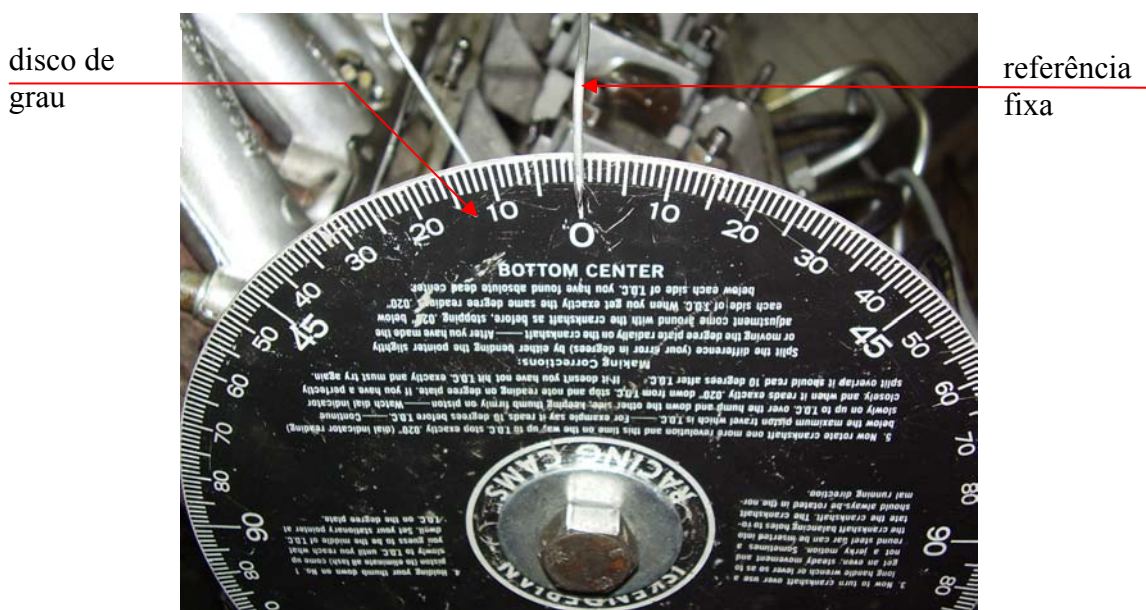


Figura 7 – Disco de grau instalado no comando de válvulas

3.9 Condições de carga de alimentação

Os valores de torque, potência e consumo foram determinados somente em condição de máximo débito, ou seja, na condição de máxima aceleração, e os ensaios foram caracterizados como sendo de regime de rotação variável.

As variações de rotação são obtidas através do controle da carga resistente, caracterizada pelo freio hidráulico do dinamômetro.

Utilizaram-se, para os testes, as recomendações e determinações constantes nas Normas *NBR 5477* (1982) e *NBR 5484* (1985) da ABNT, que determinam os procedimentos para apresentação do desempenho de motores alternativos e os métodos de ensaio para motores de combustão interna de ignição, por compressão (ciclo de Diesel) ou ignição por centelha (ciclo de Otto) de velocidade angular variável respectivamente.

Sempre, sob condições de plena carga, foram observados e registrados os valores de torque em intervalos de 100 rpm, entre 1900 e 4400 rpm. A faixa de rotações considerada buscou encontrar, com base nos dados do fabricante, os valores máximos de torque e de mínimo consumo específico de combustível.

Foram efetuadas três repetições de cada ensaio com todos os combustíveis, sob as condições impostas pelo experimento.

Para os ensaios comparativos de emissões dos gases residuais da combustão, em virtude do tempo necessário para análise e registro pelo equipamento analisador de gases, utilizaram-se apenas três faixas de rotação, onde se buscou caracterizar três regimes distintos de utilização do motor.

A Tabela 8 reúne as condições de rotação do motor que foram utilizadas para os ensaios de avaliação das emissões de gases de escape.

Tabela 8 – Rotações do motor para os ensaios de emissões residuais de combustão

Faixas de rotação (rpm)	Faixa de utilização
2600	Regime inferior
3300	Regime intermediário
3800	Regime superior

3.10 Ensaio realizado em dinamômetro

3.10.1 O Freio hidráulico de absorção

Os ensaios do motor utilizando os diferentes combustíveis foram conduzidos em um dinamômetro hidráulico de fabricação nacional, marca *JM Motorpower*, modelo 800V, com capacidade de absorção máxima de 476,6 kW (648,0 cv) para uma rotação máxima de 9999 rpm e um torque máximo de 509,94 N.m (52,0 m.kgf), sob aplicação de um fluxo constante de água de $20,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kW}^{-1}$ a uma pressão constante de 392,26 kPa (4,0 kgf/cm²).

O dinamômetro é um freio hidráulico de absorção. É constituído por um rotor acionado por um eixo, girando entre dois conjuntos de placas estatoras (aletadas) fixas na carcaça principal. Água penetra na câmara do rotor pelo centro e é acelerada para a periferia, pela ação de centrifugação. A pressão de centrifugação descarrega a água através de um orifício na parte inferior da carcaça.

A potência do motor é absorvida pela turbulência formada entre rotor e estator.

No interior do estator cria-se um arrasto que se opõe ao sentido de movimento do rotor que tende a arrastar a carcaça. O que impede a carcaça de girar é o sistema de indicação de torque que, neste caso, é um cilindro transdutor hidráulico (óleo) acionado através de um braço de alavanca solidário ao estator.

A linha de pressão do transdutor encontra-se acoplada a um indicador analógico de torque de dupla escala (manômetro, 0-24-48). A indicação do número de rotações do motor é realizada por um tacômetro digital (mostrador 0-9999 rpm) com fator de sensibilidade de 0,3% e com sinal elétrico originado por um *pick-up* magnético instalado no eixo do rotor.

A potência absorvida pelo dinamômetro é função da rotação do rotor e do nível de água na câmara do estator. A absorção é máxima quando a câmara está completamente preenchida pela água que penetra pelo seu centro. A Figura 8 mostra detalhes construtivos do interior do freio hidráulico utilizado no dinamômetro de ensaios.



Figura 8 – Detalhe do estator e do rotor do dinamômetro hidráulico utilizado

O nível interno de água é definido pelo grau de abertura de um registro de globo instalado na canalização de alimentação e pelas dimensões do orifício de saída do estator.

Fechando-se o registro de entrada ou aumentando o orifício de saída, faz-se com que o nível de água no freio se reduza.

Abrindo-se o registro de água de entrada ou reduzindo-se o orifício de saída do estator, promove-se uma variação de nível de água no interior do freio hidráulico. A potência absorvida pelo dinamômetro é convertida em calor, que é controlado por um fluxo contínuo de água através do dinamômetro.

3.10.2 Montagem do motor na bancada

O motor foi conectado ao eixo do rotor do freio hidráulico do dinamômetro, por meio de um conjunto composto por duas juntas do tipo cruzeta, para prevenir quaisquer possíveis desalinhamentos que pudessem vir a prejudicar os ensaios ou causar danos. O dinamômetro de absorção hidráulica permite que se imponham variações de carga ao motor por meio da abertura ou do fechamento de um registro de globo localizado no console do painel de comando.

A Figura 9 apresenta o motor de testes instalado na bancada, podendo-se observar uma estrutura de amortecimento e suporte, especialmente construída para evitar a transmissão de vibrações diretamente à estrutura de apoio do freio hidráulico.

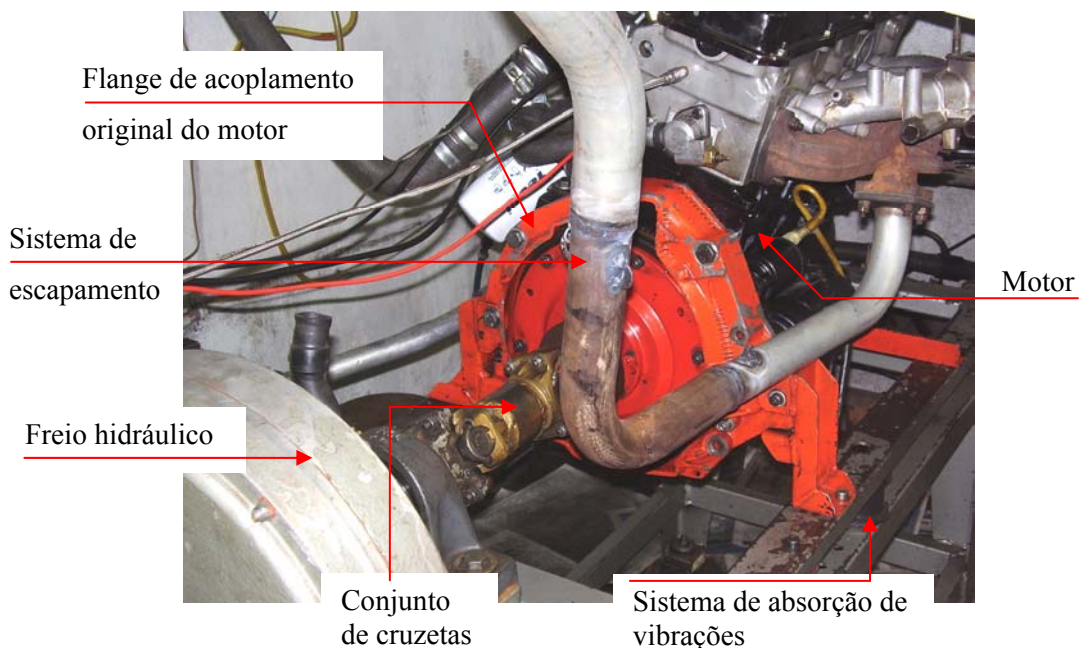


Figura 9 – Motor de testes na bancada dinamoétrica

A sensibilidade da resposta do freio, às variações da quantidade de água no interior do estator pode ser melhorada através da manutenção de uma pressão de água constante no sistema e da seleção do diâmetro apropriado para o orifício de saída da água do estator.

Através do registro de globo, determinam-se os volumes de água que serão introduzidos no estator do dinamômetro e que aplicarão, em conseqüência, variações de carga no eixo do motor.

A rotação de trabalho do motor é função das condições de equilíbrio entre a carga resistente imposta pelo dinamômetro e o trabalho útil produzido pelo motor.

3.10.3 Relação entre os valores obtidos

Cada dinamômetro possui uma constante característica que é obtida em função do seu projeto, do sistema de unidades de medida para qual o conjunto deve ser construído e da escala utilizada para o indicador de torque.

O dinamômetro utilizado no experimento apresenta uma constante de torque igual a 0,7261. Este valor deve ser utilizado para obtenção do torque produzido pelo motor em cada rotação, em kgf.m, pois todo o instrumental do dinamômetro foi projetado para operar segundo o sistema de unidades americano, fornecendo o torque em *lbf.ft*.

Os valores de torque obtidos determinam os valores de potência quando são consideradas as condições de rotação do motor e a Equação 1 relaciona tais grandezas.

$$N_e = \frac{Mt \cdot n}{716,2} \quad (1)$$

Onde: N_e – Potência em cv;

Mt – Torque em kgf.m;

n – Rotação em rpm.

Após o registro pelo sistema de aquisição de dados, todos os valores de torque foram convertidos para as unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) com o auxílio de uma planilha eletrônica e são os valores utilizados para apresentação dos resultados da pesquisa.

3.10.4 O sistema de aquisição de dados

Para registro dos dados obtidos nos ensaios, foi utilizado um sistema de captação eletrônico, composto por duas placas controladoras seriais, conectadas a um microcomputador *Pentium IV*. As placas de interface são de fabricação nacional, marca *Microhard*, modelo MCP32, cuja atuação produzem o registro dos valores indicados pelos transdutores de pressão do sistema, do contador eletrônico de rotações e dos termopares para medida das temperaturas.

O sistema de aquisição permite uma anotação ágil, precisa e em tempo real das diversas variáveis, que podem ser observadas. A seguir descrevem-se as principais características da instrumentação ligada às placas controladoras, com alguns detalhes de sua instalação.

- Contador de rotações (tacômetro digital)

Para determinação do regime de rotações do motor (velocidade angular do virabrequim), o dinamômetro utiliza em sensor magnético de fabricação *Turotest*, modelo 300.188, para engrenagem de 60 dentes, que envia os sinais para um indicador (tacômetro digital) com capacidade de 9999 rpm (4 dígitos) de fabricação nacional, marca PKR, modelo MV 301.

- Transdutores de pressão

Os transdutores foram utilizados para indicação dos valores de torque do motor e da pressão de óleo lubrificante. Uma célula de carga de fabricação *Omega Engineering* registrou os valores da pressão de óleo lubrificante, instalada na mesma linha de entrada de um manômetro analógico, tipo *Bourdon*, de origem automotiva, de fabricação *Smiths* (EUA) e com capacidade para até 686,46 kPa (7,0 kgf/cm²).

A célula de carga transforma os sinais de pressão na linha em sinais eletrônicos que são enviados para as placas de interface com o computador. A observação da pressão do óleo é mais uma medida de segurança quanto às condições de operação do motor e não está diretamente relacionada ao desempenho dele.

Para determinação dos valores de torque foi utilizada uma célula de carga de fabricação *Kalvico Corporation* (EUA), modelo P350, de atuação hidráulica e instalada na

mesma linha de pressão do indicador analógico de torque do dinamômetro, a uma distância de 200 mm deste. Assim, toda a instrumentação eletrônica possuía, em paralelo e para observação de uma mesma grandeza, um instrumento analógico que permitia de forma imediata e segura a comparação entre os valores obtidos, constituindo-se numa garantia adicional de confiabilidade.

- Termopares tipo K (*Chrom/Alumel*)

Foram utilizados dois termopares para o registro das temperaturas dos gases residuais da combustão, instalados no coletor de escapamento a uma distância aproximada de 250 mm desde as hastes das válvulas de descarga. O primeiro entre os cilindros 1 e 2 e o segundo entre os cilindros 3 e 4. A Figura 10 apresenta a montagem de um termopar de gases de descarga.

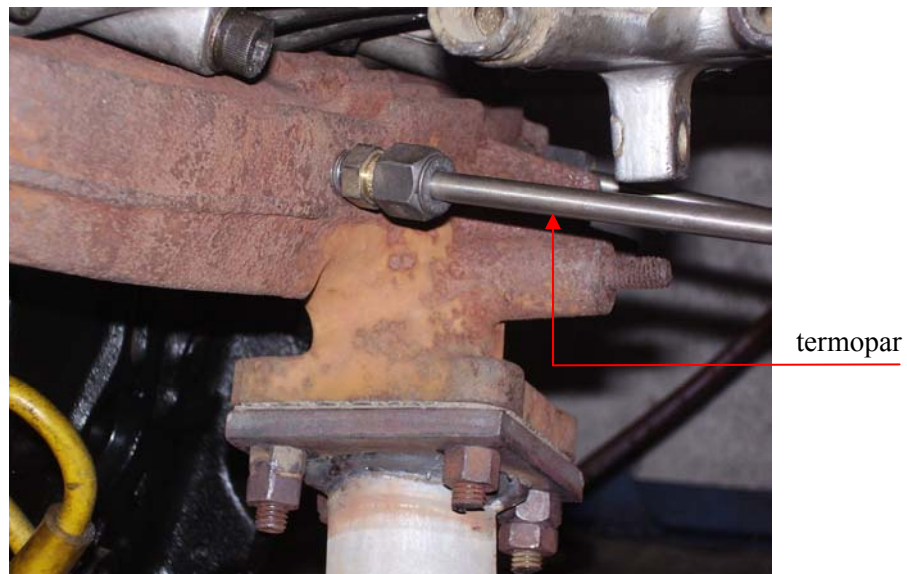


Figura 10 – Termopar tipo K utilizado para obtenção das temperaturas dos gases residuais de combustão

- Termopares tipo T (*Cobre/Constantan*)

Os termopares foram utilizados para obtenção das temperaturas do ar de admissão do motor, do óleo lubrificante e do fluido de arrefecimento do motor. O termopar, para o ar de admissão, foi instalado na entrada do coletor de admissão, fixada através de uma cinta plástica

ajustável (*tie wrap*). O termopar do fluido de arrefecimento foi instalado na canalização de entrada da torre de arrefecimento, no fluxo de água à saída do cabeçote do motor e o termopar do óleo lubrificante foi adaptado a um cone de borracha, para fixação e introdução no cárter, através da capa da vareta indicadora de nível do lubrificante. A Figura 11 apresenta o termopar do sistema de arrefecimento. Todos os termopares utilizados são de fabricação *Omega Engineering* (EUA).

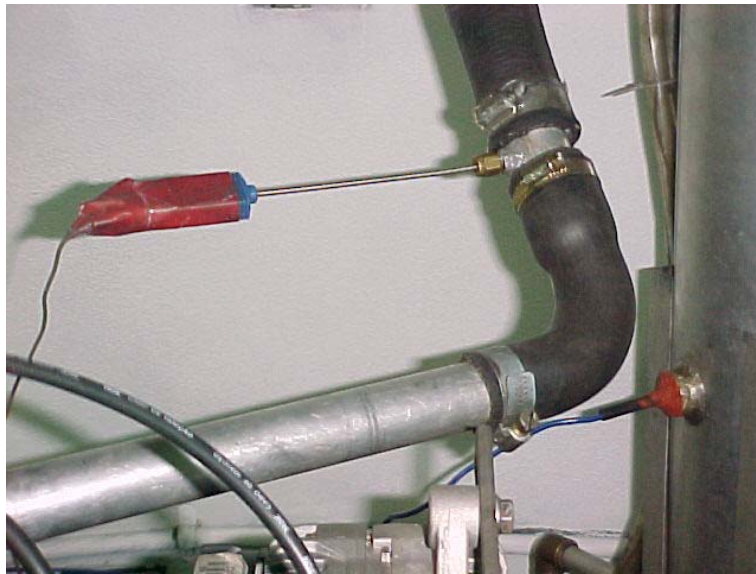


Figura 11 – Termopar do tipo T utilizado para obtenção da temperatura do fluido de arrefecimento

3.10.5 Cálculo dos fatores de redução de potência

Para cada ensaio com os diferentes combustíveis durante as avaliações de torque, potência e consumo específico do motor, foram anotadas as condições atmosféricas (temperatura t , pressão p e umidade u), para que fossem aplicados os fatores de correção (redução) específicos, devido às variações destas grandezas, em conformidade com o que determinam as normas de ensaio de motores. Para cálculo dos fatores de correção (redução) de potência, segundo determinações da Norma *NBR 5484* (1985), foi utilizado um dispositivo que é tecnicamente denominado de *psicrômetro de fluxo contínuo*, para as medidas das temperaturas de bulbo seco (tbs) e de bulbo úmido (tbu) do ar atmosférico.

O psicrômetro é um dispositivo laboratorial, especialmente construído segundo as recomendações da *ASHRAE* e é normalmente utilizado em experimentos que envolvam a necessidade de determinação das condições atmosféricas. Quando se iniciavam os ensaios, o motor elétrico do ventilador do dispositivo era ligado, aguardava-se a estabilização das temperaturas depois de transcorridos cerca de 5 minutos e anotavam-se, então, os valores de t_{bu} e de t_{bs} do ar atmosférico. A Figura 12 apresenta o psicrômetro, onde podem ser observados os dois termômetros de líquido em vidro expostos à corrente de ar provocado pelo ventilador do dispositivo.

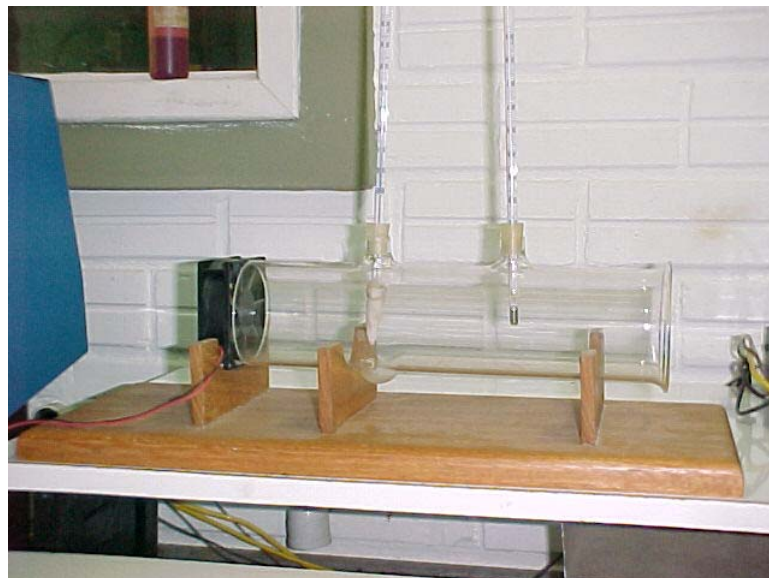


Figura 12 - Psicrômetro de fluxo contínuo para anotação das temperaturas de bulbo seco e úmido (t_{bs}/t_{bu})

Para determinação da t_{bu} do ar, um dos termômetros do dispositivo deve ter seu bulbo envolto em uma mecha de algodão umedecida com água, antes de ser submetido à corrente de ar provocada pelo ventilador. Os valores anotados para as duas temperaturas, segundo as recomendações da Norma *NBR 5484* (1985) da ABNT, devem ser utilizados no cálculo dos fatores de redução de potência do motor ensaiado. Os fatores de redução foram obtidos utilizando-se uma planilha eletrônica de cálculo simples.

Para a observação da pressão barométrica do ar ambiente, utilizou-se um barômetro de fabricação alemã, *FISCHER*, modelo T102W7142, instalado na sala de controle do dinamômetro, fora do ambiente em que o motor encontrava-se em testes.

Esta foi considerada a condição-padrão para o ar atmosférico, pois a captação do ar de alimentação do motor era externa à sala do dinamômetro, para evitar alterações de leituras de temperatura devido ao calor gerado pelo motor no ambiente.

Foram calculados os valores de pressão do ar seco necessários à determinação dos fatores de correção de potência (redução), dentro dos limites de variação da pressão atmosférica na região. Os fatores foram utilizados para redução da potência às condições padrão de testes (ABNT) e obtidos em função das variações de pressão barométrica, temperatura e umidade do ar de admissão (em função de tbs e tbu).

A Norma *NBR 5484* (1985) estabelece que “o fator de redução para motores funcionando sob o ciclo de Diesel, deve ser calculado segundo a equação ...”

$$Kd = fa^{fm} \quad (2)$$

Onde: Kd – fator de redução para motores diesel;

fa – fator atmosférico;

fm – fator do motor = 0,726, calculado para o motor considerado.

O fator atmosférico deve ser determinado pela equação:

$$fa = \left(\frac{99}{ps} \right) \left(\frac{t + 273,15}{298} \right)^{0,7} \quad (3)$$

Onde ps é obtida pela equação 4, em função de tbs e tbu :

$$ps = pb - \left(\frac{1}{7,5} \right) \left[e^{\left[21,106 - \left(\frac{5345,5}{(tbu + 273,15)} \right) \right]} - \left(0,49 \cdot pb \cdot \left(\frac{tbs - tbu}{100} \right) \right) \right] \quad (4)$$

Onde: ps – pressão do ar seco (kPa);

pb – pressão barométrica (kPa);

tbs – temperatura de bulbo seco (°C);

tbu – temperatura de bulbo úmido (°C).

3.11 Consumo específico de combustível

3.11.1 Método da balança

O método da balança é o método mais utilizado para avaliação do consumo específico de combustível em ensaios de motores, apesar da existência de medidores de vazão contínua de líquidos ou gases, tecnicamente chamados de rotâmetros. Preferencialmente, utilizou-se o método da balança, em vez de um rotâmetro, para as medições necessárias à determinação do consumo específico, pois a balança permite efetuar uma leitura instantânea e direta da massa de combustível consumido, independentemente, de sua temperatura ou de variação de densidade.

Para a obtenção do consumo específico de combustível, utilizou-se uma balança digital de fabricação nacional, marca Kern, com capacidade máxima de 6000g. Sobre a balança foi posicionada uma proveta modificada, com capacidade de 1000 *ml* e que permitiu a alimentação contínua de combustível através da mesma, ou a alimentação de um volume determinado, apenas, por meio de um conjunto de registros.

A balança utilizada no experimento permite o ajuste de tara (em zero da balança) em qualquer instante e, assim, os pesos de combustível consumidos do recipiente eram apresentados de forma regressiva e em leituras parciais determinando, em associação, à medição dos intervalos de tempo de consumo, o consumo horário de combustível pelo motor.

Para anotação da quantidade de combustível consumida, ajustava-se o regime de rotação do motor requerido, atuando-se sobre a carga resistente aplicada pelo dinamômetro, por meio da ação do registro de controle da água do freio hidráulico.

Quando fixado o regime de rotações requerido, simultaneamente, acionava-se o cronômetro e a balança digital e, depois de transcorrido um intervalo de tempo de 15 segundos fixava-se a leitura no visor da balança e anotavam-se os valores obtidos.

Todos os ensaios foram repetidos três vezes e os valores apresentados constituem-se nas médias dos valores obtidos. A determinação do consumo de combustível em ensaios de motores de combustão é uma operação morosa que exige, no mínimo, a presença de duas pessoas habilidosas e treinadas para tal, com atenção total para que não sejam perdidos ensaios. Os ensaios deste trabalho de pesquisa tornaram-se operações morosas, pela necessidade de que o combustível alcançasse a bomba injetora dentro das faixas de

temperaturas pré-determinadas para o experimento. Assim, para alcançar tal condição, o combustível era escoado do reservatório aquecido para dentro da proveta modificada, com a temperatura limite superior da faixa escolhida e observada pelo operador da balança através de um termômetro de líquido em vidro (bulbo), introduzido na proveta. Somente quando se tinha a garantia de que a temperatura, no interior da proveta, encontrava-se dentro da faixa escolhida, é que se iniciava o ensaio para as medidas de consumo.

Outro ponto a ser considerado é que a bomba injetora alimenta os bicos injetores do motor com volumes de combustível superiores àqueles injetados na câmara de combustão. Portanto, o retorno dos injetores e da bomba teve que ser direcionado para a proveta, através de uma tubulação de borracha. Garantiu-se, dessa forma, que os valores registrados pela balança eram apenas aqueles efetivamente consumidos pelo motor nas diversas rotações dos ensaios.

Também outro fator a ser considerado foi a necessidade de que todo o combustível de um ensaio anterior, ainda presente na carcaça da bomba injetora, deveria ser totalmente substituído pelo combustível na condição determinada pelos diferentes tratamentos. Para preencher totalmente a carcaça da bomba utilizada, é necessário um volume de 350 *ml*. Assim, entre um ensaio e outro a bomba deveria ter o seu retorno direcionado para outro recipiente até que um volume de 400 *ml* tivesse escoado através da bomba injetora.

Os valores obtidos para o consumo dos combustíveis, em 15 segundos, foram registrados em forma de planilha, para obtenção do consumo horário e, após, o consumo específico de combustível. Para a determinação do consumo específico de combustível, as faixas utilizadas de rotação do motor contemplam três situações de utilização dele e são caracterizadas por seis rotações, para três regimes diferentes apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Rotações para determinação do consumo específico de combustível

Faixa de rotação (<i>rpm</i>)	Faixa de utilização
1900 2300	Regime inferior
2800 3300	Regime intermediário
3800 4300	Regime superior

O regime de rotações, que foi denominado como regime inferior, compreende um intervalo de rotações de apenas 400 rpm, enquanto todos os demais intervalos são de 500 rpm. Tal fato deveu-se à dificuldade de manutenção de um regime estável, para a condição de 1800 rpm, em função de suas características de comando de válvulas, cujo valor havia sido previamente estabelecido como o regime mínimo para registro de dados do experimento. Para determinação do consumo específico de combustível, utilizou-se a relação determinada pela Norma *NBR 5484* (1985) da ABNT e apresentada pela equação:

$$C_s = (C_h)/N_e \quad (5)$$

Onde: C_s - Consumo específico (g/kW.h)

C_h - Consumo horário (g/h)

N_e - Potência efetiva (kW).

3.12 Sistema de aquecimento do combustível

Para obtenção das temperaturas pré-determinadas para o aquecimento dos ésteres, utilizou-se um sistema composto por uma resistência elétrica com capacidade nominal de 3,0 kW, monofásica, em 220V, comandada por uma chave contactora e montada no interior de um reservatório metálico com capacidade para vinte litros.

O tempo de permanência da resistência ligada era comandado por um controlador eletrônico, geralmente utilizado para controle de temperatura em sistemas de aquecimento (*boilers*, fornos e aquecedores) ou de refrigeração (*freezers*, câmaras e balcões frigoríficos). De fabricação *Full Gauge*, modelo *TiC-17*, o controlador permite o ajuste das temperaturas desejadas e o tempo de histerese (diferencial de temperatura), atuando numa faixa de 40°C até 99°C.

O bulbo sensor de comando do controlador foi introduzido numa capa de proteção de alumínio e no recipiente de aquecimento próximo ao ponto de captação do combustível, pelo sistema de alimentação.

Após montado o sistema de aquecimento, foram conduzidos testes iniciais com o reservatório preenchido com água, para verificação do seu funcionamento e o nível de precisão proporcionado.

Através da comparação dos valores de temperatura ajustados no controlador e aqueles verificados em termômetro de laboratório tipo líquido em vidro, é que foram ajustadas as faixas de temperaturas necessárias para condução do experimento. A Figura 13 apresenta a forma de instalação da resistência elétrica no interior do reservatório do sistema de aquecimento utilizado.

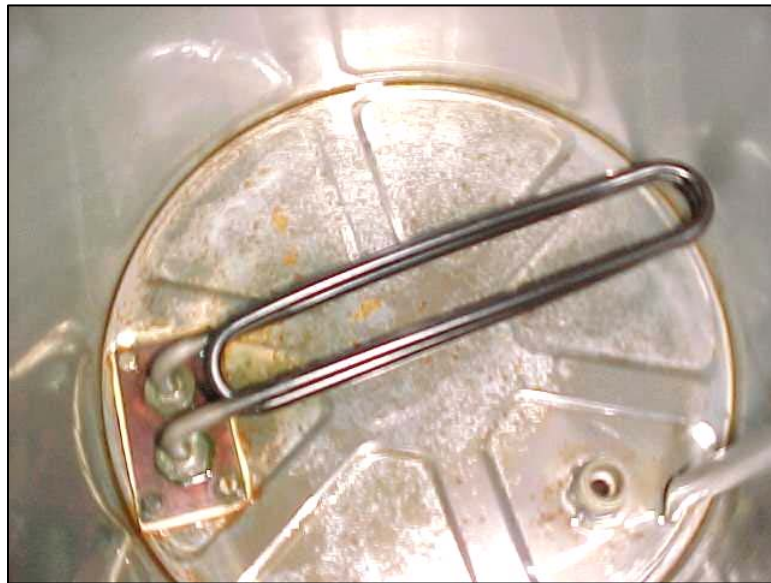


Figura 13 – Resistência elétrica para aquecimento dos combustíveis de teste

O sistema de aquecimento permitiu a fixação de uma faixa de temperaturas para os combustíveis, não possibilitando uma temperatura exata e constante, em virtude da vazão de alimentação ser variável e diretamente dependente da rotação do motor e devido ao grau de retardo do sistema de comando eletrônico. Assim, a resposta do aquecimento não era imediata devido aos volumes de combustível trabalhados.

Uma condição hipotética de temperatura constante somente poderia ser mantida se todo o recipiente fosse aquecido ou isolado termicamente. Condição que, dificilmente, poderia ser mantida em condições de operação a campo. Porém, pode-se verificar que a faixa de temperaturas usada é muito estreita e a sua influência sobre a viscosidade e a densidade dos biocombustíveis pode ser considerada não-significativa. A saída de combustível foi posicionada no fundo do reservatório, permitindo, através de mangueiras de borracha, sua condução para a bomba injetora ou para a bureta de determinação do consumo.

3.13 Delineamento experimental

O presente trabalho de pesquisa constituiu-se num experimento multifatorial no qual as principais *variáveis-resposta* (obtidas por medição) observadas e analisadas foram:

- Torque do motor;
- Potência efetiva;
- Consumo específico de combustível;
- Teor de gases presentes nos exaustos de combustão.

Os tratamentos utilizados para a realização do experimento e que constituíram as variáveis independentes de um modelo matemático, que segundo Souza *et al* (2002), “são os procedimentos ou conjunto de procedimentos cujo efeito deverá ser avaliado e comparado com outros”, foram:

- Tipo de éster combustível;
- Valor do avanço de injeção;
- Aquecimento, em duas faixas de temperaturas diferentes, ou não.

Assim, de acordo com a nomenclatura dos tratamentos, exemplifica-se:

“Um ensaio designado por ETGIR P2 TA indica a avaliação do éster etílico de óleo de girassol, em temperatura ambiente e utilizando-se 2 graus de atraso do ponto inicial de avanço de injeção, em relação ao original do motor, para o óleo diesel mineral”.

Todos os ensaios contaram com três repetições, observada toda a gama de rotações utilizada no experimento e com os dados organizados em planilhas. Os resultados foram representados, na forma de gráficos, para produzir as curvas características do motor ($M_t \times n$, $N_e \times n$, $C_s \times rpm$) e os diagramas de barras em função de faixas específicas de rotação, para representar os teores dos principais gases residuais de combustão, consideradas as seis faixas de rotações pré-determinadas.

A Tabela 10 reúne todos os tratamentos do experimento.

Tabela 10 – Tratamentos do experimento

Designação do tratamento	Temperatura (°C)	Avanço de injeção (graus de retardo)	Avanço de injeção (em mm na bomba)	Repetição
ÓLEO DIESEL B2	Ambiente	0	0,86	1,2,3
ETGIR P0 TA	Ambiente	0	0,86	1,2,3
ETGIR P2 TA	Ambiente	2	0,70	1,2,3
ETGIR P4 TA	Ambiente	4	0,47	1,2,3
ETGIR P0 T55	50 - 60	0	0,86	1,2,3
ETGIR P2 T55	50 - 60	2	0,70	1,2,3
ETGIR P4 T55	50 - 60	4	0,47	1,2,3
ETGIR P0 T75	70 - 80	0	0,86	1,2,3
ETGIR P2 T75	70 - 80	2	0,70	1,2,3
ETGIR P4 T75	70 - 80	4	0,47	1,2,3
SEBO P0 TA	Ambiente	0	0,86	1,2,3
SEBO P2 TA	Ambiente	2	0,70	1,2,3
SEBO P4 TA	Ambiente	4	0,47	1,2,3
SEBO P0 T55	50 - 60	0	0,86	1,2,3
SEBO P2 T55	50 - 60	2	0,70	1,2,3
SEBO P4 T55	50 - 60	4	0,47	1,2,3
SEBO P0 T75	70 - 80	0	0,86	1,2,3
SEBO P2 T75	70 - 80	2	0,70	1,2,3
SEBO P4 T75	70 - 80	4	0,47	1,2,3
MISTURA P0 TA	Ambiente	0	0,86	1,2,3
MISTURA P2 TA	Ambiente	2	0,70	1,2,3
MISTURA P4 TA	Ambiente	4	0,47	1,2,3
MISTURA P0 T55	50 - 60	0	0,86	1,2,3
MISTURA P2 T55	50 - 60	2	0,70	1,2,3
MISTURA P4 T55	50 - 60	4	0,47	1,2,3
MISTURA P0 T75	70 - 80	0	0,86	1,2,3
MISTURA P2 T75	70 - 80	2	0,70	1,2,3
MISTURA P4 T75	70 - 80	4	0,47	1,2,3

Para a análise estatística dos resultados, todos os dados na forma de uma planilha eletrônica simples e agrupados em seqüência, foram analisados pelo pacote estatístico SAS (*Statistical Analysis System*). A ferramenta utilizada para avaliação dos dados obtidos foi a análise de variância não paramétrica, utilizando-se os testes de Wilcoxon e de Kruskal-Wallis.

3.14 Avaliação dos gases residuais da combustão

Para a análise dos gases residuais da combustão produzidos pelo motor nos ensaios quando alimentado pelos diferentes biocombustíveis, empregou-se um equipamento de fabricação americana Eurotron, modelo GreenLine 6000. Este equipamento, utiliza uma sonda que deve ser exposta ao fluxo de gases objeto da análise. Para a instalação dessa sonda na tubulação de descarga do motor, foi confeccionada uma peça de assento cônico para o encaixe do suporte original do equipamento, que foi soldada ao tubo de escape. Por meio de um parafuso, mantinha-se o suporte cônico da sonda firmemente fixado à tubulação. Para evitar fugas de gases ou entrada de ar através da peça, foi utilizada uma pasta de vedação apropriada, popularmente conhecida por veda-escape. A Figura 14 apresenta o analisador de gases utilizado para avaliação das emissões de gases pelo motor durante os ensaios.



Figura 14 – Equipamento analisador de gases residuais (imagem do fabricante)

O GreenLine 6000 é um equipamento utilizado para a análise dos gases de combustão, produzido por motores de combustão interna, geradores de vapor, aquecedores, secadores, fornalhas e turbinas, entre suas diversas aplicações, possibilitando a avaliação dos teores de O_2 , CO_2 , CO , SO_2 , HC não queimados e NO_x .

O equipamento contempla duas seções, uma unidade principal de controle (UPC) e uma unidade de controle remoto (UCR). A UPC constitui-se por uma bomba de aspiração, filtros, sensores eletrônicos e de gases e o eliminador de condensado. O equipamento utiliza sensores eletroquímicos e medidores de fluxo eletrônicos, que fornecem os valores monitorados por meio de uma impressora existente na UCR e os registros armazenados na memória da UPC podem, a qualquer momento e de forma ágil, serem recuperados e analisados em software próprio em ambiente Windows®.

O analisador de gases encontra-se na carga patrimonial do Departamento de Engenharia Química do CT da UFSM e havia sido calibrado e certificado há cerca de 60 dias, antes do início dos ensaios. A Figura 15 apresenta o posicionamento da sonda do GreenLine 6000 na tubulação de escapamento do motor na bancada de ensaios.

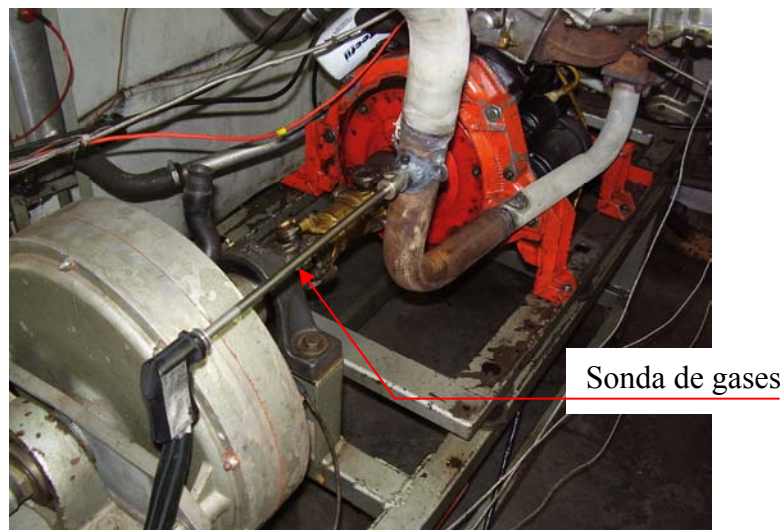


Figura 15 – Sonda de gases instalada na tubulação de descarga do motor no dinamômetro

Neste trabalho de Tese estão apresentados, apenas, os resultados da avaliação das emissões dos seis tratamentos que apresentaram os melhores resultados em termos de potência, torque e consumo específico pelo motor de testes.

3.15 A avaliação da variação de densidades com a temperatura

Com o aquecimento dos ésteres, o principal efeito buscado foram alterações de viscosidade. Porém, ocorrem também alterações de densidade que podem vir a afetar o desempenho do motor, como consequência da redução do conteúdo energético presente nos volumes de combustível dosados pela bomba injetora. Assim, para avaliação da influência das variações de densidade experimentadas pelos ésteres aquecidos sobre o desempenho do motor, foi necessário o conhecimento da extensão destas variações dentro dos limites de temperatura utilizadas no experimento.

Para a determinação das densidades dos combustíveis submetidos ao aquecimento nessa experimentação, utilizou-se um conjunto de densímetros de imersão parcial específicos para combustíveis, de fabricação nacional, marca MERCÚRIO/INCOTERM e certificados pelo INMETRO. As escalas dos densímetros dividem-se em faixas bem determinadas, para permitir maior precisão (0,800 – 0,850; 0,850 – 0,900).

O procedimento seguido para a determinação das densidades compreendia um aquecimento inicial dos ésteres, para que alcançassem uma temperatura de 90°C, numa bureta de 500 ml, onde um termômetro de laboratório do tipo líquido em vidro fornecia os valores de temperatura, enquanto esta decrescia, naturalmente, até atingir 40°C. Na mesma bureta encontrava-se o densímetro, que fornecia os valores de densidade enquanto as temperaturas apresentadas pelo termômetro decresciam em etapas de 5°C.

3.16 A observação dos jatos produzidos

Os jatos produzidos pelos bicos injetores no dispositivo de teste podem apresentar diferenças de formato, em função do modo com que a alavanca do dispositivo é golpeada para provocar a abertura do bico injetor e também pelo curso cumprido pela mesma. Assim, foi necessário determinar uma maneira de garantir-se, para que os volumes injetados fossem os mesmos e o modo de entrega destes aos bicos fosse também a mesma.

A solução encontrada para aproximação de igualdade de condições para produção dos jatos atomizados com todos os ésteres, aquecidos ou não, foi a limitação do curso cumprido pela alavanca do dispositivo de teste de injetores, com a instalação de um calço de madeira

com 7,0 mm de altura, posicionado no terço final do curso da alavanca, cuja função foi a de limitar o curso e também para absorção do impacto. A altura de 7,0 mm foi obtida a partir de uma série de testes em que se observava a forma do jato atomizado e dos volumes acumulados na bureta, numa série de 10 injeções em seqüência.

Para garantir-se que a forma de entrega do combustível ao injetor no dispositivo fosse assemelhada, através de uma seqüência de deslocamentos da alavanca do dispositivo obtinha-se uma indicação equivalente a 12,756 MPa (1850 *psi*) no manômetro dispositivo e, a partir desta condição, com um único golpe da alavanca até o final do curso determinado pelo calço de madeira provocava-se a abertura do bico injetor.

De forma semelhante à utilizada para determinação da variação de densidade, os combustíveis foram aquecidos antes de serem introduzidos no reservatório do dispositivo de teste de injetores, enquanto a sua temperatura era monitorada por um termômetro cujo bulbo foi posicionado junto à tomada da câmara de pressão do dispositivo. Para evitar distorções de forma, todos os ésteres foram atomizados num único bico injetor, escolhido ao acaso, entre os quatro do motor.

Para registro dos jatos produzidos pelo injetor utilizou-se uma câmara fotográfica digital, com capacidade de 6.0 megapixels, posicionada a uma distância de 600 mm do injetor, distância que evitou com que a lente da câmara pudesse ser alcançada pelas gotículas de combustível pulverizado e dispersado. Alguns exemplos que ilustram as variações de forma experimentada pelo jato de combustível atomizado são apresentados e discutidos no capítulo seguinte deste trabalho.

3.17 A análise estatística dos resultados

3.17.1 Testes de normalidade da distribuição dos dados

Os testes do grau de normalidade da distribuição dos dados referentes ao desempenho do motor apenas foram realizados, tendo em vista serem necessários para aplicação da ferramenta de análise de variâncias, apesar de não ser a forma de distribuição esperada.

Na avaliação de desempenho de um motor de combustão interna, não deve haver expectativa de normalidade na distribuição dos resultados, já que as variáveis torque, potência

e temperatura de gases de exaustão são dependentes da variação do número de combustões (rotações). E, sendo uma definida em função da outra, a expectativa é que os valores sejam “crescentes” com a *rpm*.

O motor foi testado numa faixa de rotações crescente entre 1900 e 4400 *rpm* e espera-se que o torque, que é a variável dependente, realmente, medida no dinamômetro, seja crescente com a rotação e atinja um valor máximo dentro desta faixa de rotações. Porém, sem normalidade de distribuição.

A potência é uma variável dependente e calculada a partir da combinação dos valores de torque e de rotação. Portanto, mais sensível à variação de rotação do que do torque, segundo a Equação 1, p. 71, assim como o consumo específico de combustível que é calculado em função da potência, conforme a Equação 5, p. 79.

Para a análise do grau de normalidade dos dados foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, com grau de significância de 5,0%. O torque apresentado por um motor de combustão e seus valores máximo, mínimo e médio, pode ser distribuído ao longo da gama de rotações durante a definição do projeto do motor e da aplicação ao qual se destina.

Assim, as características de torque e potência do motor podem ser trabalhadas em termos de cilindrada, do sistema de distribuição (comando de válvulas, válvulas,...), coletores de admissão e de descarga, sistemas de injeção e de combustão, entre outros.

Em termos gerais, um bom motor, para uma aplicação específica, como o que foi avaliado, deve suportar as possíveis variações de carga sem prejuízo de sua operação e para tal, o motor deve apresentar uma boa reserva de torque, o menor consumo específico de combustível possível e com potência suficiente para a aplicação a qual se destina. Em outras palavras, deve-se buscar que o mesmo apresente os melhores rendimentos termodinâmico e mecânico.

As variáveis-resposta e, principalmente, o seu comportamento ao longo da faixa de rotações considerada (1900 a 4400 *rpm*, em intervalos de 100 *rpm*), foram criteriosamente analisados para a definição dos melhores tratamentos e de sua efetiva aplicabilidade na operação do motor.

Nem sempre um motor que apresenta o máximo torque, a maior potência ou menor consumo específico é aquele que deve ser considerado o de melhor resultado. O que se deve fazer é a análise do seu desempenho no conjunto das variáveis.

3.17.2 Análise da variância e “não paramétrica”

Souza *et al* (2002) explicam que a idéia na análise da variância (ANOVA) é comparar a variância devido a tratamentos com a variação devida ao acaso, ou resíduo. O objetivo é analisar as diferenças entre as médias aritméticas do grupo, a partir de uma análise na variação dos dados entre grupos. A ANOVA é um método poderoso para identificar diferenças entre as médias populacionais, devido às varias causas, atuando simultaneamente sobre os elementos da população. Assim, o objetivo da aplicação da ANOVA é apontar se um grupo é estatisticamente diferente do outro ou não.

No capítulo referente aos resultados e discussão, a análise estatística fica reservada ao conjunto das avaliações de todos os itens. Em conjunto procedeu-se a uma análise do desempenho do motor, para cada tratamento de forma individualizada, baseada na análise dos dados colocados num conjunto de gráficos que são conhecidos como “curvas características de desempenho de um motor de combustão interna” e nos resultados apresentados pela estatística. Também as variações de teores de gases residuais nas condições de rotação pré-determinadas tiveram seus níveis representados graficamente.

3.18 Considerações finais da seção

Antes de passar-se para o capítulo de análise dos resultados obtidos nos ensaios do motor diesel, alimentado pelos ésteres combustíveis nas condições determinadas pelos tratamentos adotados, ressalta-se algumas considerações importantes acerca dos ensaios realizados e dos resultados obtidos.

Os ensaios foram conduzidos segundo as principais determinações constantes nas Normas NBR 5484 e 5477 da ABNT. As principais normas brasileiras que tratam do desempenho de motores são:

- **NB-749** (NBR 6396): Motores alternativos de combustão interna não-veiculares;
- **NB-130** (NBR 5477): Apresentação do desempenho de motores de combustão interna, alternativos, de ignição por compressão (Diesel).

Embora existam estas normas brasileiras que definem claramente os requisitos para apresentação do desempenho dos motores ICO, alguns fabricantes de motores no Brasil adotam as normas dos seus países de origem. Assim, os fabricantes de origem Européia, geralmente, adotam as Normas DIN 6270 e 6271, para obtenção e apresentação do desempenho dos motores que fabricam, enquanto aquelas originárias da Norte América, adotam as Normas ISO8528, 3046, AS2789 e SAE BS5514.

Para o motor de fabricação VW, utilizado neste trabalho com biocombustíveis, cuja concepção é originária da Alemanha, as curvas de desempenho disponíveis seguem a Norma DIN 6271(ISO 3046).

Tendo em vista as naturais diferenças de desempenho apresentadas pelos motores oriundos de uma mesma linha de produção, em consequência das tolerâncias de fabricação e de montagem praticadas, as empresas fabricantes de motores optam por apresentar sempre o melhor desempenho obtido em um grupo de motores ensaiados.

As curvas características de desempenho de motores, normalmente encontradas na literatura, considerando a maioria das publicações relacionadas ao assunto e que são apresentadas como padrões característicos, mostram-se bastante regulares e na forma de linhas perfeitas e contínuas, sem que sejam feitas referências de que se trata de linhas de tendência, segundo equações determinadas em função dos dados obtidos.

Os profissionais que trabalham diretamente na aquisição dos dados de desempenho de motores de combustão em dinamômetros, não desconsideram o real formato das curvas obtidas, tendo em vista o grande número de variáveis envolvidas e que influem sobre o processo de combustão. Apresentam-se variações até mesmo para idênticas condições de carga e regime de rotação, que são reconhecidas e as quais se atribui o nome de variação *cycle-by-cycle*, para os ensaios realizados em seqüência.

Em geral, as curvas características de desempenho de motores contemplam toda a faixa de rotações, desde um regime mínimo (marcha lenta) até o máximo regime de rotação admissível pelo motor. Porém, em vista do elevado número de ensaios e repetições, que foram necessários para a realização deste trabalho de pesquisa com os ésteres e da irregularidade característica apresentada por motores de quatro cilindros sob elevadas cargas e em baixas rotações, condição não-usual de aplicação do motor, optou-se pela aquisição de dados em um campo de rotações mais restrito.

As condições de ensaio utilizadas permitiram um funcionamento regular e que representa uma utilização em situações mais próximas àquelas de aplicação real do motor.

As especificações de desempenho do motor, para os valores de torque e potência, segundo o fabricante, são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Especificações do fabricante para dados de desempenho do motor VW BE

Potência máxima			
Norma	Unidade	Valor	Rotação
ABNT	kW	36,8	4500 rpm
	cv	50	4500 rpm
DIN	kW	36,8	4500 rpm
	cv (PS)	50	4500 rpm
SAE	kW	44	4900 rpm
	cv	60	4900 rpm
Torque máximo			
ABNT	N.m	93,16	3000 rpm
	kgf.m	9,5	3000 rpm
DIN	N.m	93,16	3000 rpm
	kgf.m	9,5	3000 rpm
SAE	N.m	101,98	3000 rpm
	kgf.m	10,4	3000 rpm

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Os ensaios com óleo diesel B2 (testemunha)

Os ensaios com o óleo diesel B2 constituíram-se, nos parâmetros de comparação de desempenho do motor em termos de torque, potência e consumo específico para os biocombustíveis e os tratamentos considerados no experimento. Os resultados obtidos com o óleo diesel B2 estão apresentados em todos os gráficos de desempenho do motor nas páginas seguintes deste trabalho, para permitir uma melhor visualização das tendências obtidas com os tratamentos a que foram submetidos os ésteres combustíveis e das diferenças encontradas. A Tabela 12 resume os valores máximos obtidos para torque e potência, e mínimo para consumo específico nas condições do experimento. Registre-se sempre que os ensaios com o combustível B2 foram conduzidos somente em temperatura ambiente e com o ponto de avanço de injeção originalmente recomendado pelo fabricante.

Tabela 12 – Desempenho obtido com o óleo diesel B2

Variável	Valor	Rotação (rpm)
Torque máximo (N.m)	83,61	2300
Potência máxima (kW)	30,28	4400
Consumo específico mínimo ($\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$)	309,83	2300

4.2 Os testes de injetores e a forma do jato pulverizado

Os ensaios preliminares realizados para regulagem da pressão de injeção dos bicos injetores objetivaram buscar o valor recomendado pelo fabricante e serviram como ensaios de

verificação dos efeitos das diferenças de propriedades dos ésteres e dos tratamentos de aquecimento sobre a forma do jato atomizado. A partir desses ensaios determinaram-se as faixas de aquecimento, que foram utilizados no experimento.

Como a pressão de injeção é a de abertura dos bicos injetores, determinada pela ação da mola do injetor e regulada por calços calibrados sob esta, independentemente do tratamento a que foram submetidos os ésteres, os bicos injetores foram regulados para uma pressão de abertura de 12,75 MPa (130,0 kgf.cm⁻²), em atenção às recomendações do fabricante do sistema injetor do motor, quando em operação com óleo diesel de petróleo.

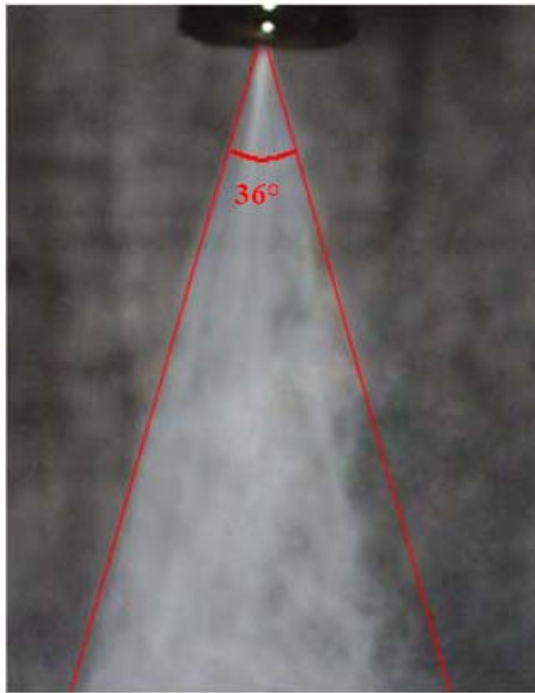
A Figura 16 apresenta alguns exemplos característicos do jato pulverizado, obtido para diferentes combustíveis utilizados no experimento e em temperaturas distintas. O registro fotográfico obtido para o jato atomizado do óleo diesel B2 (a) permite a identificação de um perfil com as características aproximadas das recomendadas pelo fabricante do injetor e citadas em Suh *et al* (2007), Kegl (2008) e Delacourt *et al* (2005).

Pode-se reconhecer a abertura de um jato de combustível com intensa pulverização e sem pontos de concentração de líquido, desenvolvendo-se segundo um cone que tem seu vértice inicial localizado na ponta do bico injetor e que se abre segundo um ângulo aproximado de 36°.

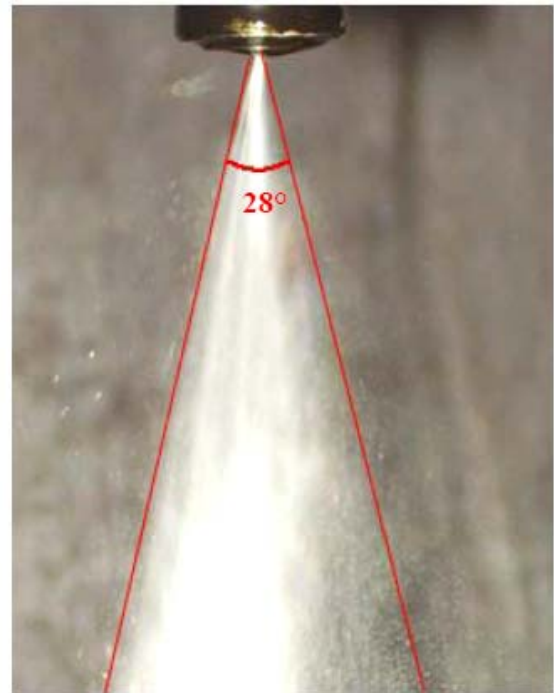
A penetração (alcance) do jato ficava bem definida, pois este se dispersava antes de atingir a superfície de combustível líquido presente numa bandeja de recolhimento, colocada a 400 mm, sob o injetor.

As principais diferenças verificadas entre o jato pulverizado do B2 e do éster etílico de sebo bovino em temperatura ambiente, TA, (b), foram:

- A abertura do cone pulverizado encontrava-se afastada do bico injetor com identificação de concentração de líquido na forma de um jorro próximo à agulha do injetor até que se iniciasse a abertura efetiva do cone;
- Concentração de líquido não totalmente pulverizado em alguns pontos e dispersão de algumas gotículas de dimensões maiores em outros pontos do jato;
- Afastando-se do bico injetor, ainda foi possível reconhecer-se uma concentração acentuada de gotas de combustível, que se apresentaram como uma densa névoa no limite inferior do quadro da fotografia;
- O alcance do jato (penetração) foi superior à do B2, pois algumas frações de combustível líquido alcançavam a superfície de líquido presente na bandeja sob o injetor, de forma concentrada, provocando uma intensa agitação na mesma.



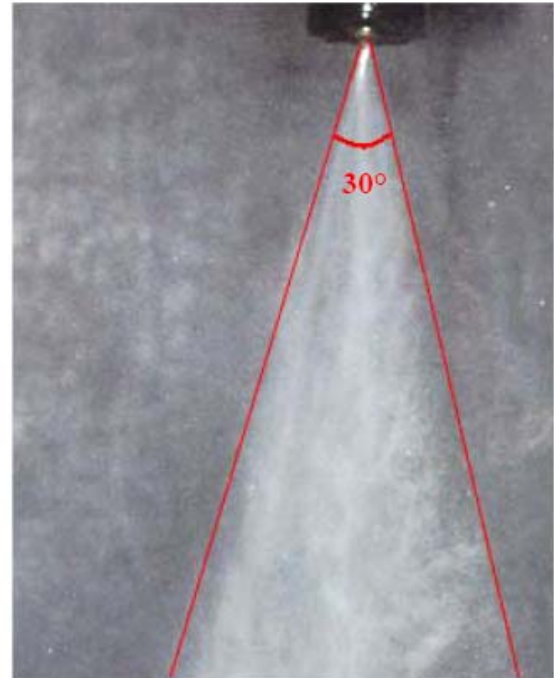
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 16 – Exemplos de jatos produzidos pelos combustíveis nos testes (a) óleo diesel B2, TA; (b) éster etílico de sebo bovino, TA; (c) éster etílico de sebo bovino, T55 (d) éster etílico de sebo bovino, T75

Apesar das limitações da metodologia utilizada para registrar as formas do jato atomizado, o efeito do aquecimento sobre o desenvolvimento do jato de combustível pelo bico tornou-se evidente e facilmente perceptível.

Especificamente para o éster etílico de sebo bovino, pode-se observar que a forma do jato atomizado muda suas características, aproximando-se das do B2, à medida que aumenta também a sua temperatura. Para a faixa de temperaturas caracterizada como T75 (d), a forma do jato e a aparência do espectro de gotículas são as que mais se aproximam do padrão obtido pelo óleo diesel mineral, porém com ligeiro estreitamento do ângulo de cone e aumento do alcance do jato. Uma pulverização mal desenvolvida foi descrita por Kegl (2008), como consequência das elevadas viscosidade e tensão superficial do B100, que conduz a uma maior penetração do jato de combustível e a um maior tamanho médio de gotas atomizadas.

4.3 Efeito do aquecimento sobre a densidade dos combustíveis

Ao serem submetidos ao aquecimento, os biocombustíveis experimentam, além de mudanças de viscosidade, variações de densidade que podem contribuir para a redução de desempenho do motor, em função da redução do conteúdo energético do combustível dosado pela bomba injetora. As avaliações de densidade dos três biocombustíveis do experimento, obtidas com o uso dos densímetros, encontram-se representados na Figura 17, que permite a observação de que, independentemente de sua natureza ou origem, os ésteres apresentam um comportamento assemelhado ao longo de uma faixa de temperaturas entre 30° e 85°C.

Tate *et al* (2006) indicaram que ésteres metílicos aquecidos podem experimentar uma redução de densidade segundo uma taxa média de $1,23 \text{ g.dm}^{-3}.\text{°C}^{-1}$, enquanto que, em contraste, para os ésteres etílicos utilizados nos ensaios observou-se uma redução média de $0,57 \text{ g.dm}^{-3}.\text{°C}^{-1}$.

Em valores médios, para a primeira faixa de temperaturas utilizada no experimento, a T55, os ésteres apresentaram uma redução de densidade da ordem de 2,5%, em relação às condições padrão de ensaio (20°C). Assim, reduções do teor energético de mesma ordem poderiam ser esperadas para os ensaios conduzidos segundo o tratamento T55 e que poderiam vir a acarretar redução de desempenho do motor de mesma magnitude.

Quando aquecidos na segunda faixa de temperaturas dos tratamentos (T75), ocorreu uma redução de densidade mais acentuada, da ordem de 4,6% em média, havendo a

expectativa de redução no teor energético dos combustíveis segundo os mesmos valores e com uma redução mais acentuada de desempenho do motor. As variações de desempenho poderiam, em parte, ser compensadas pela melhor formação da mistura ar e combustível e pela adequação do avanço de injeção. As variações de viscosidade experimentadas pelos combustíveis submetidos ao aquecimento estão representadas no Anexo B.

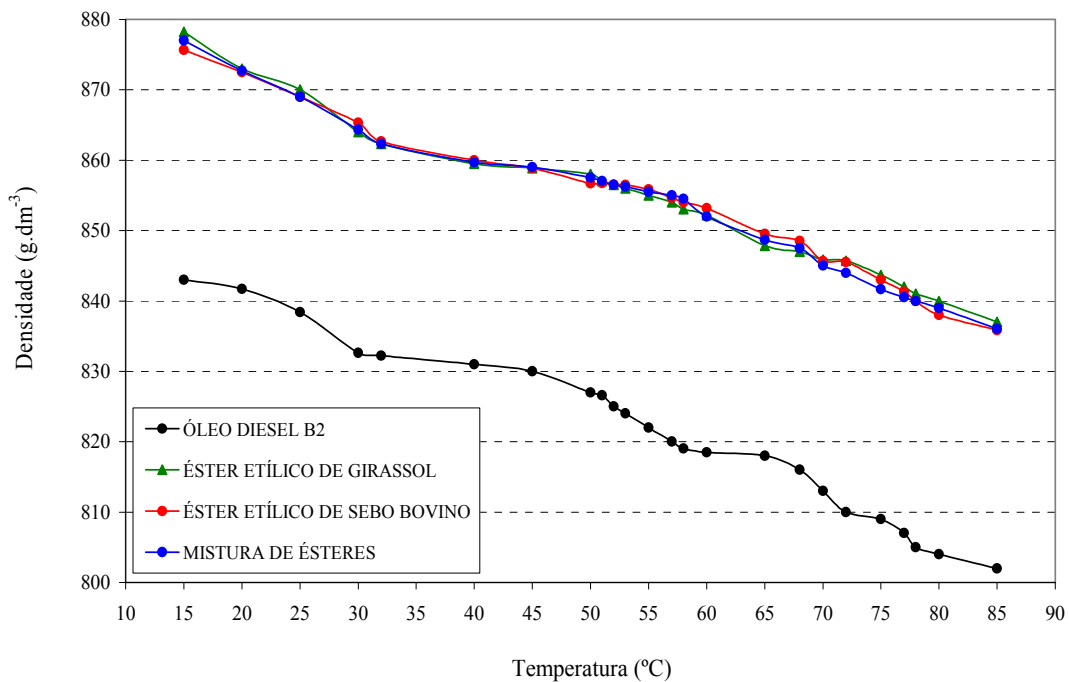


Figura 17 – Variação da densidade dos ésteres com a temperatura

4.4 Influência da temperatura dos combustíveis sobre o desempenho

4.4.1 Ponto de avanço inicial da injeção (PO) – Resultados para a variável Torque

Para apresentação e discussão dos resultados produzidos pelos ésteres combustíveis nos ensaios, segue-se uma seqüência de curvas características, onde a representação gráfica dos dados reúne, sob um mesmo avanço inicial de injeção, as curvas de torque, de potência e

de consumo específico, em função da rotação do motor para as diferentes faixas de temperatura experimentadas.

A seguir, em separado, são feitas considerações a respeito dos teores de gases residuais para os melhores resultados para cada tipo de combustível do experimento, com a apresentação de algumas curvas características de temperatura de gases de exaustão do motor e diagramas de ensaios de gases residuais. Reservou-se, para a presente seção, uma discussão mais focada no desempenho do motor em termos de torque, potência e consumo específico. As curvas de temperatura *versus* rotação foram utilizadas como ferramenta de suporte para as análises de desempenho.

A análise dos dados representados pelas curvas constantes das Figuras 18, 19 e 20 e os dados estatísticos indicam que com o avanço de injeção original recomendado pelo fabricante do motor, utilizando-se os ésteres etílicos de óleo de girassol, de sebo bovino ou a mistura de ésteres, promove uma significativa redução de torque em relação àqueles apresentados pelo óleo diesel B2.

Em termos médios, em relação ao ensaio-testemunha, os melhores resultados para esta condição foram obtidos pelo éster etílico de girassol, aquecido na faixa T55 (ETGIR PO T55) onde ocorre uma ligeira redução de torque (-3,8%).

Os piores valores observados foram produzidos pelo éster de sebo bovino, sem aquecimento (SEBO PO TA), onde a queda de torque médio é mais acentuada (-12,0%). Tais registros contrastam com os valores indicados por Van Gerpen (2006), por Maziero *et al* (2005), por Kucek *et al* (2004), de -10,0%, -8,0% e -10,0%, respectivamente.

Quando considerados apenas os ésteres, especificamente para o caso do éster etílico de girassol, não houve diferença estatística entre os valores médios de torque registrados nos ensaios sob aquecimento e sem aquecimento em regimes de rotação inferiores a 2600 rpm. A partir deste limite, e na medida em que se elevam mais as rotações do motor, passam a existir diferenças significativas entre os tratamentos com aquecimento (PO T55 e PO T75).

Reduziram-se as perdas de torque do primeiro em relação ao B2 (-3,8%) e aumentaram em relação ao segundo, até alcançar a máxima diferença nos regimes mais elevados (-6,1%), indicando uma tendência de melhor realização da combustão com o aquecimento à T55.

A redução de torque apresentado pelo éster em temperatura ambiente (ETGIR PO TA), foi atribuída ao menor conteúdo energético do mesmo em relação ao B2 e da má formação da mistura, em consequência das maiores viscosidade e tensão superficial deste biocombustível.

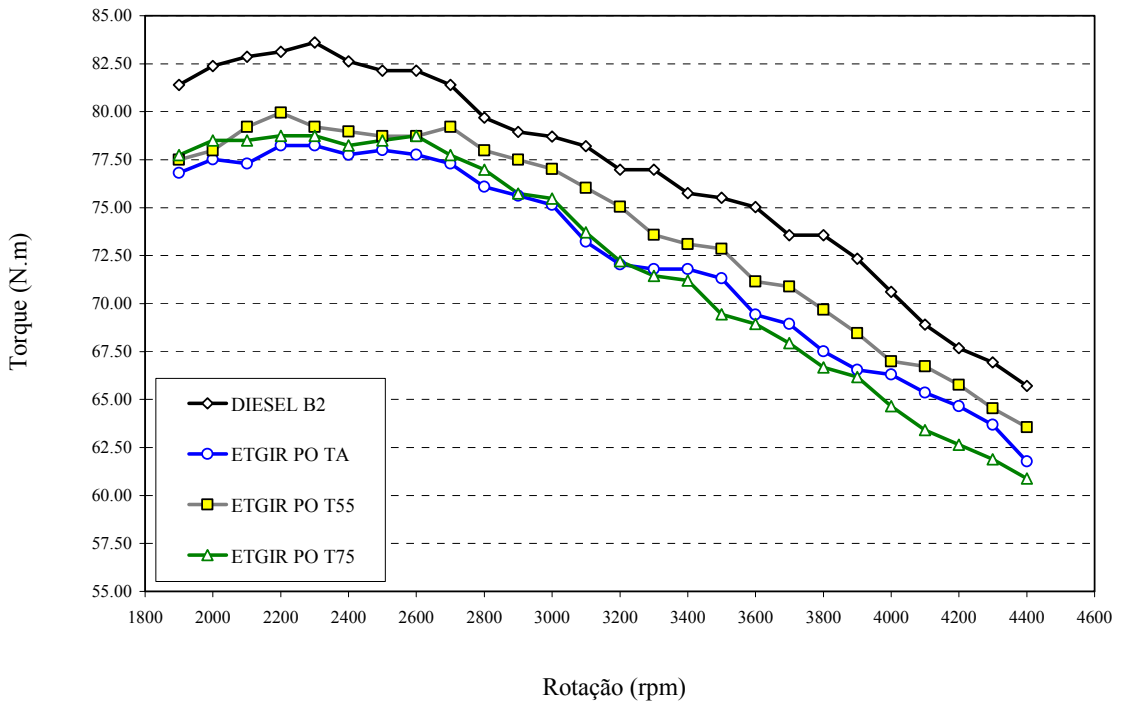


Figura 18 – Torque para o éster etílico de óleo de girassol, ponto original (P0), três temperaturas

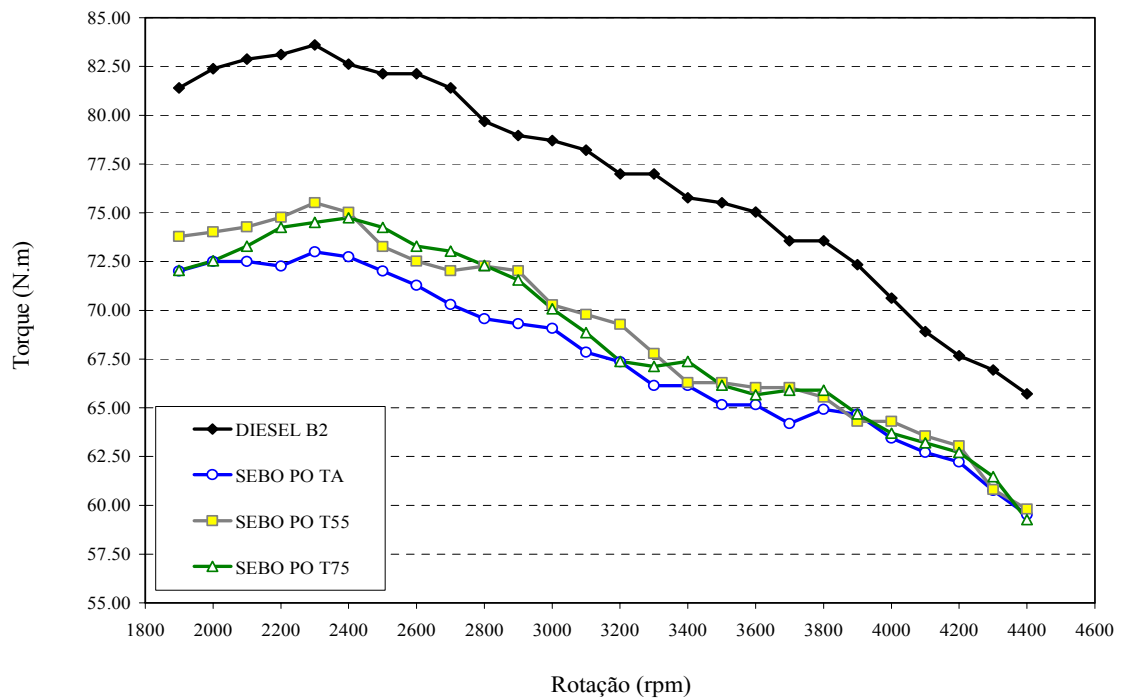


Figura 19 – Torque para o éster etílico de sebo bovino, ponto original (P0), três temperaturas

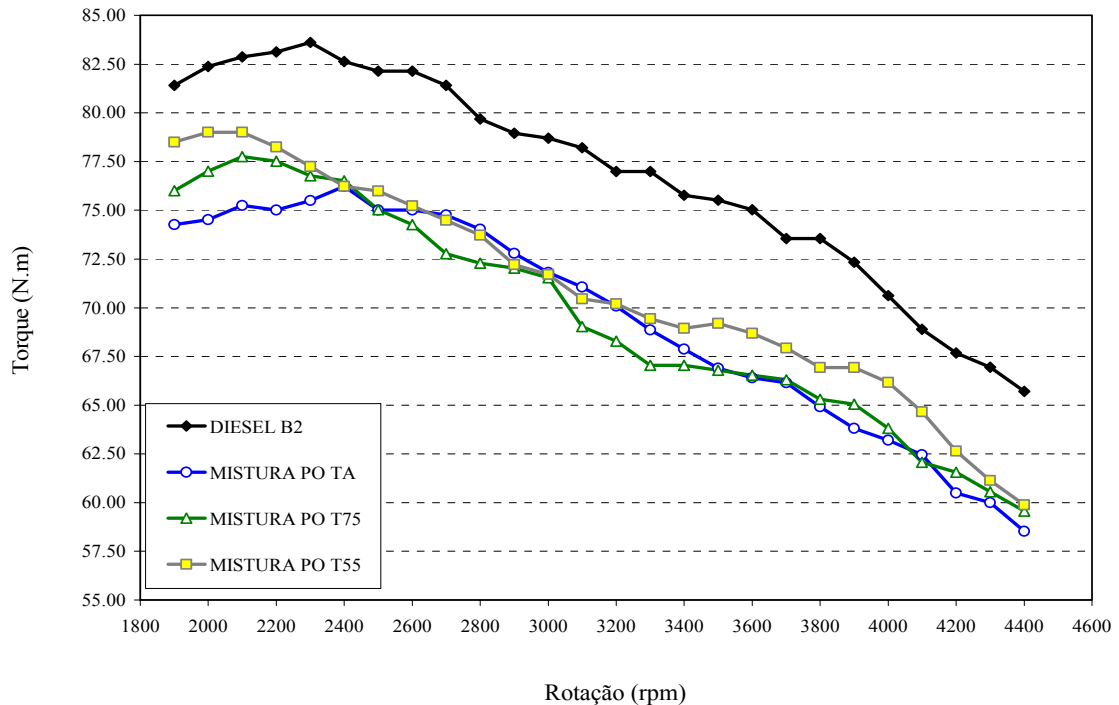


Figura 20 – Torque para a mistura de ésteres, ponto original (P0), três temperaturas

Tais níveis de redução de torque são similares às citações de Reyes *et al* (2006) e Silva *et al* (2006) e considerados não-críticos, em função das reduções nos níveis de emissão de poluentes que proporcionaram.

Apesar da inexistência de diferença de torque, estatisticamente, ($p < 0,05$) para os tratamentos nos regimes de rotação mais baixos, deve-se ressaltar que os valores de torque para o éster sob aquecimento, foram ligeiramente superiores àqueles apresentados pelo éster sem aquecimento (ETGIR PO TA).

Observou-se o indicativo de um melhor processo de pulverização e formação de mistura, com uma conseqüente combustão melhor realizada, desenvolvendo-se com maior produção de calor em relação aos ensaios com o éster de óleo de girassol em temperatura ambiente.

Para o éster etílico de sebo bovino, os resultados mostraram uma queda mais acentuada de torque em relação ao óleo diesel B2. Não se observou diferença estatística entre as médias de torque apresentados pelos tratamentos com aquecimento do éster de sebo, onde

SEBO PO T55 e SEBO PO T75 apresentaram-se inferiores ao B2 em -10,3 e -10,6% respectivamente. A maior diferença de torque relativamente ao óleo diesel B2, foi produzida pelo tratamento sem aquecimento (SEBO PO TA), onde foi observado um valor médio de -12,0%.

Os valores de torque produzidos pelo o éster de sebo bovino sem aquecimento foram atribuídos ao menor conteúdo energético deste e às maiores viscosidade e tensão superficial, que promoveram uma má formação de mistura com conseqüente menor produção de calor.

Ainda, deve ser considerada a expressiva diferença existente entre o número de cetano do éster de sebo em relação ao B2, em torno de 12 a 15 pontos superiores em favor do primeiro.

Um número de cetano excessivo pode conduzir à combustão de uma fração significativa de combustível injetado muito próxima ao injetor, sem que ocorra uma distribuição mais uniforme na câmara de combustão principal. Canakci (2007) recomenda que para combustíveis com NC superior, o ponto de avanço da injeção deve sofrer ajustes.

Observou-se um indicativo de que o aquecimento do combustível, dentro de uma faixa de temperaturas, pode conduzir à melhor formação do jato combustível e favorecer o processo de combustão, porém a redução de densidade e de viscosidade também experimentadas, talvez não possam ser compensadas pela melhor formação de mistura, haja vista o aumento das perdas internas na bomba injetora.

Ou seja, à medida que a temperatura do éster cresce, menor é o conteúdo energético do também menor volume de combustível injetado.

Pode-se observar que, para todos os ésteres experimentados, sob a condição de ponto de avanço de injeção original do motor, aquecidos ou não, à medida com que se elevam as rotações do motor, reduzem-se as perdas de torque em relação ao B2. Deve-se atribuir tais resultados à melhor taxa de entrega do combustível pelo injetor em elevadas rotações e ao aumento da turbulência da carga de ar admitida e comprimida.

A mistura de ésteres produziu, em toda a faixa de rotações utilizada, valores de torque inferiores ao B2, os tratamentos MISTURA PO TA, MISTURA PO T55 e MISTURA PO T75 apresentaram médias de torque de - 9,6%, - 7,6% e -9,44% respectivamente.

A partir de 3200 rpm, para o caso específico da mistura de ésteres, pode-se observar uma maior produção de torque à medida com que se elevam as rotações, podendo-se atribuir tal comportamento à melhor formação do jato combustível aquecido à T55 e à adequação do número de cetano resultante, desta mistura, aos elevados regimes de rotação.

4.4.2 Ponto de avanço inicial da injeção (P2) – Resultados para a variável Torque

As análises dos dados representados nas Figuras 21, 22 e 23 indicam que, com o uso do ponto de injeção em atraso de 2° em relação ao original, com os ésteres de girassol, de sebo bovino e a mistura de ésteres, promove-se uma redução das perdas de torque em relação às aquelas dos tratamentos em que se utilizou o ponto de avanço original.

Em relação ao ensaio-testemunha, os melhores resultados foram obtidos pelo éster etílico de girassol e pela mistura de ésteres aquecidos (ETGIR P2 T55 e MISTURA P2 T55), onde não existe diferença significativa entre as médias (-0,44% e -0,2%).

Os piores valores observados foram novamente produzidos pelo biocombustível sem aquecimento (SEBO P2 TA), onde a queda de torque médio é a mais acentuada (-8,8%).

Quando considerado, especificamente, o éster etílico de girassol, não houve diferença estatística entre os valores médios de torque registrados nos ensaios sob aquecimento em regimes de rotação inferiores a 2400 rpm. Anotou-se diferença significativa entre os resultados dos ésteres aquecidos e sem aquecimento ao longo de todas as rotações de ensaio. A partir de 2400 rpm, e na medida em que se elevam mais as rotações do motor, passam a existir diferenças significativas, também, entre os tratamentos com uso de aquecimento (ETGIR P2 T55 e P2 T75).

A redução de torque apresentado pelos ésteres em temperatura ambiente (TA) novamente deve ser atribuído ao menor conteúdo energético dos mesmos, em relação ao óleo B2, e à má formação da mistura, em consequência das maiores viscosidade e tensão superficial destes combustíveis oxigenados. Os resultados indicam que houve melhores processos de pulverização e de formação de mistura e, como, consequência a combustão foi mais bem realizada e desenvolveu-se uma maior produção e aproveitamento do calor gerado em relação aos ensaios com os combustíveis em temperatura ambiente.

Para todos os ésteres, ao utilizar-se o ponto atrasado em dois graus (P2), os melhores resultados se apresentaram sob a condição de aquecimento na faixa T55, indicando ser esta uma condição de temperatura mais apropriada para que os benefícios oriundos da melhor pulverização não sejam anulados pelas perdas ocasionadas, pelas variações de densidade e de viscosidade do combustível.

Os menores valores de torque foram registrados pelo o éster de sebo bovino sem aquecimento, devendo ser atribuídos às maiores viscosidade e tensão superficial que promovem uma má formação de mistura, com conseqüente menor produção de calor.

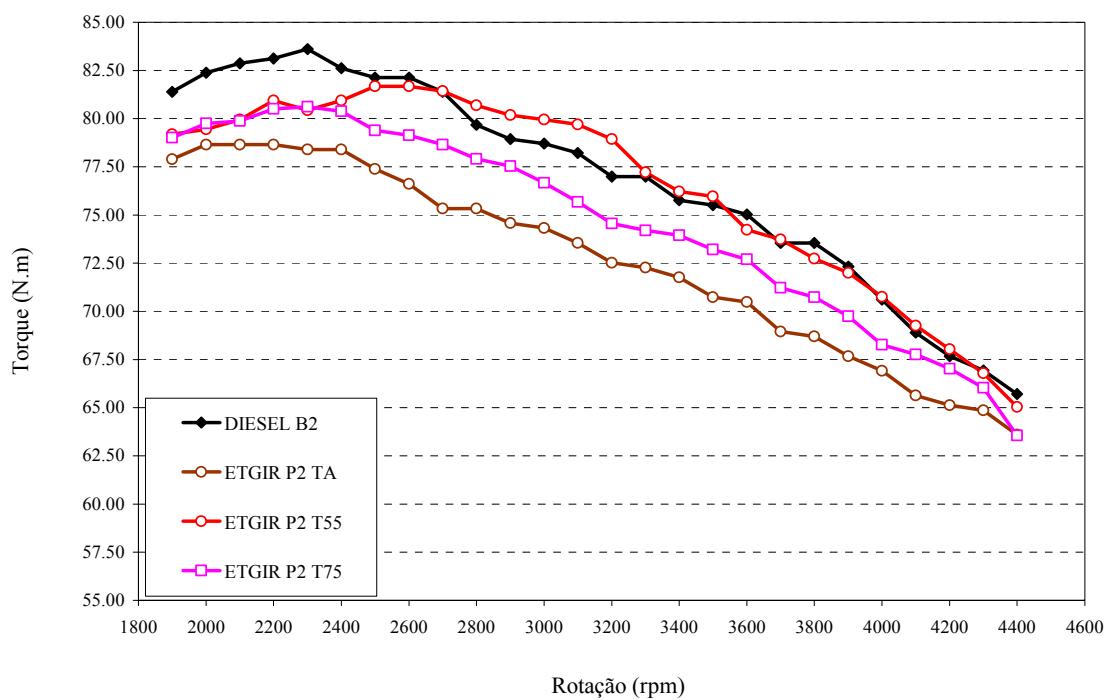


Figura 21 – Torque para o éster etílico de girassol, ponto atrasado em 2° (P2), três temperaturas

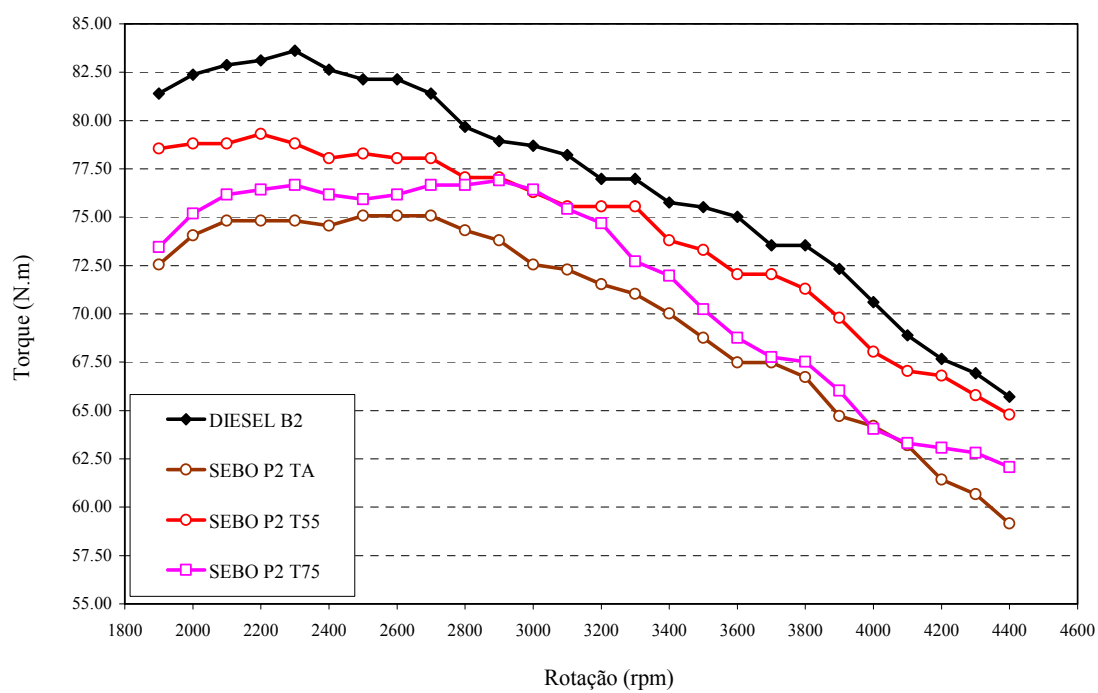


Figura 22 – Torque para o éster etílico de sebo bovino, ponto atrasado em 2° (P2), três temperaturas

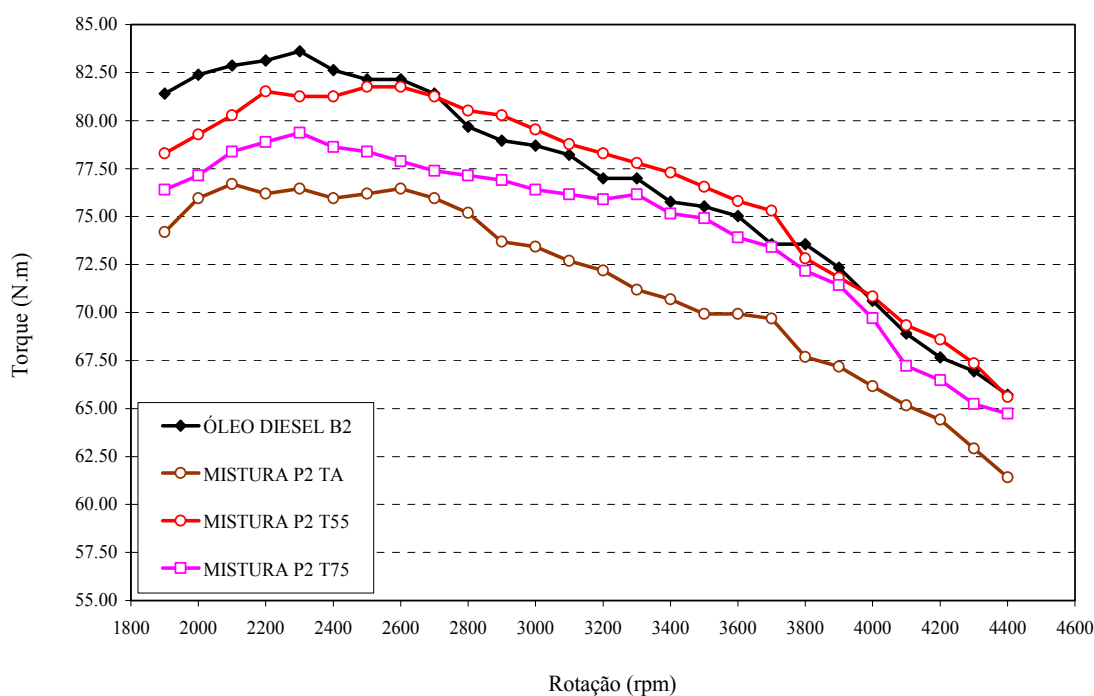


Figura 23 – Torque para a mistura de ésteres, ponto atrasado em 2° (P2), três temperaturas

A utilização do ponto de injeção, em atraso, sugere recuperação de parte das perdas que ocorrem quando da utilização do ponto original recomendado. Assim, a diferença do número de cetano do éster em relação ao B2, pode ser verificada, pois o aumento da média de torques indica que o processo de combustão desenvolvido encontrou as melhores condições para transformação de energia, confirmando Canakci (2007).

Observa-se, novamente, o indicativo de que o aquecimento, dentro de uma faixa de temperaturas, pode conduzir à melhor formação do jato combustível, favorecendo o processo de combustão. Porém, quando as reduções de densidade e de viscosidade são excessivas, estas podem não ser compensadas pela melhor formação de mistura, em função do aumento das perdas internas da bomba injetora e da redução da energia por unidade de volume injetado.

A mistura de ésteres produziu, em toda a faixa de rotações do experimento, valores de torque inferiores ao B2 para os tratamentos MISTURA P2 TA e MISTURA P2 T75, que apresentaram valores médios de $-7,0\%$, $-3,1\%$. Já, para o tratamento MISTURA P2 T55, a diferença registrada em favor do petrodiesel não possui significância ($-0,2\%$).

Então, reforça-se a importância das condições de aquecimento para melhorar o processo de combustão dos biocombustíveis.

A curva de torque é um indicativo de que, com o aumento das rotações, em função da melhor pulverização e da adequação do avanço de injeção ao número de cetano diferenciado, ocorre um alongamento do período em que, expressivas quantidades de mistura, entram em combustão, produzindo mais força sobre o pistão, em concordância com Kidoguchi *et al* (2000).

Outra vez, é possível observar-se indicativos de que o aquecimento à T75 pode ser demasiado para os ésteres, seja na excessiva redução da viscosidade que incrementa as perdas de bombeamento na injetora, seja na excessiva variação de densidade que reduz o teor energético dos volumes dosados pela bomba. Porém, agora na condição de ponto atrasado, não houve queda de rendimento em relação à mistura de ésteres na condição de temperatura ambiente, apresentando-se, assim, valores de torque sempre superiores à mistura sem aquecimento. As perdas ocasionadas pelas fugas na bomba foram superadas pelo ganho promovido pela combustão de maiores frações do volume de combustível injetado.

4.4.3 Ponto de avanço inicial da injeção (P4) – Resultados para a variável Torque

Os resultados dos ensaios com o ponto de injeção atrasado em 4º (P4) indicam que a redução do avanço de injeção utilizado foi demasiada, haja vista a significativa queda de torque que experimentaram os ésteres, em relação aos valores registrados, para os tratamentos anteriores (P2).

Os dados representados pelas curvas constantes da Figuras 24, 25 e 26 e os dados estatísticos indicam que o avanço de injeção atrasado em 4º e a utilização dos ésteres de óleo de girassol, de sebo bovino e a mistura de ésteres promoveram uma significativa redução de torque em relação àqueles apresentados pelo óleo diesel B2.

Em termos médios, em relação ao ensaio-testemunha, os valores de torque apresentaram-se, significativamente, diferentes situando-se entre -3,3% (SEBO P4 T55) e -11,0 (MISTURA P4 TA). Os resultados obtidos para o éster etílico de óleo de girassol, nessas condições, foram semelhantes aos registrados por Kaufman *et al* (1984) quando utilizaram ésteres metílicos de óleo de girassol que apresentam uma menor viscosidade.

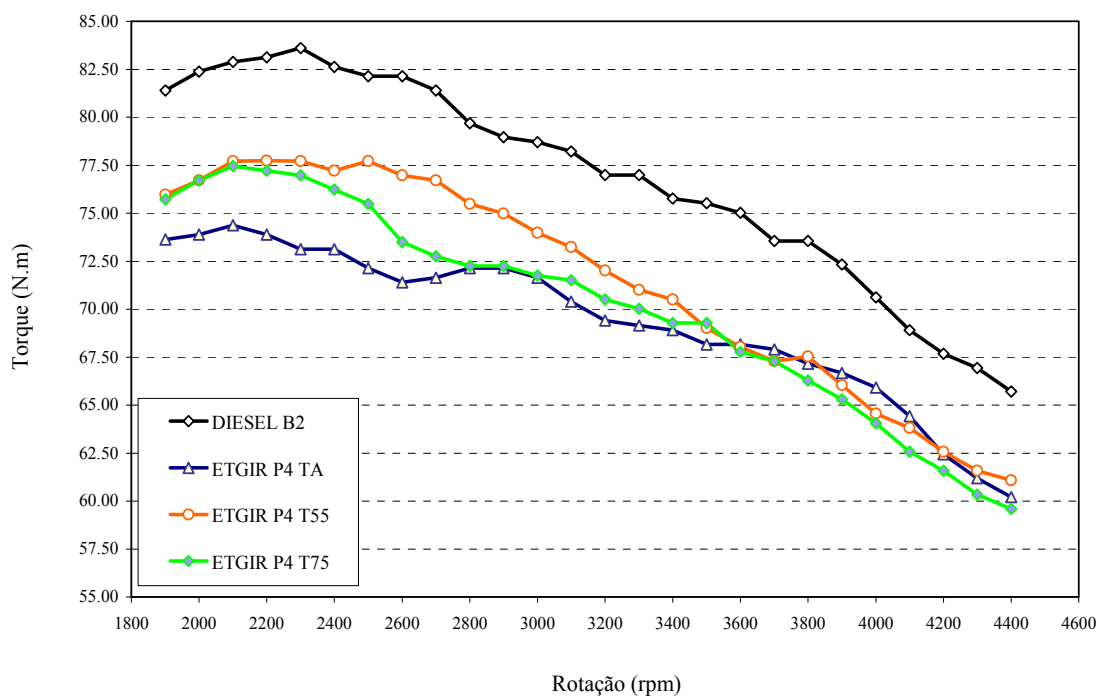


Figura 24 – Torque para o éster etílico de girassol, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas

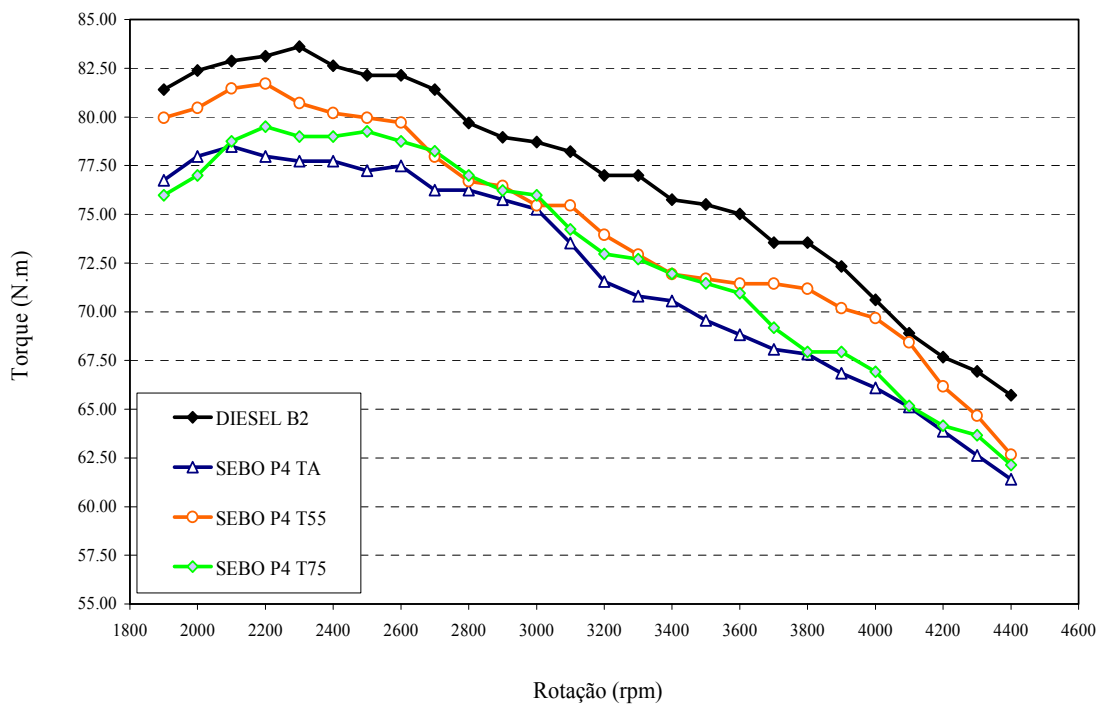


Figura 25 – Torque para o éster etílico de sebo bovino, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas

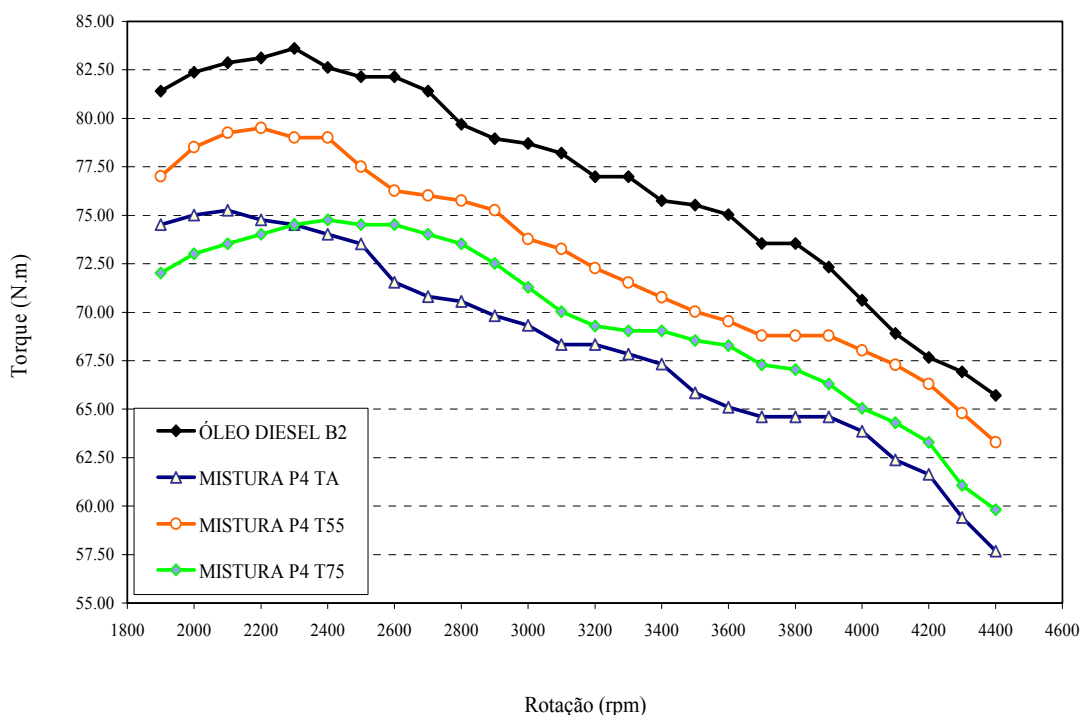


Figura 26 – Torque para a mistura de ésteres, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas

Quando considerado, especificamente, o éster etílico de óleo de girassol, não foram observadas diferenças estatísticas entre os valores registrados nos ensaios sob aquecimento e sem aquecimento, em regimes de rotação superiores a 3500 rpm e, na medida em que as rotações do motor aumentam, deixam de existir diferenças significativas entre os tratamentos (ETGIR P4 TA, ETGIR P4 T55 e ETGIR P4 T75).

A máxima diferença de torque médio produzido foi registrada pelo tratamento ETGIR P4 TA (-9,7%), indicando que a redução do avanço de injeção foi inadequada ou excessiva. Deve-se considerar que a diferença de NC entre o éster de girassol e o B2 é de apenas 2 a 6 pontos.

A redução de torque apresentado pelo éster em temperatura ambiente (TA) é produto, além do menor conteúdo energético do mesmo em relação ao B2, da má pulverização para formação da mistura nessas condições. Apesar da inexistência de diferença significativa de torque para os tratamentos, nos regimes de rotação elevados, observa-se que os valores de torque para o éster aquecido (P4 T55 e P4 T75) são ligeiramente inferiores àqueles apresentados pelo éster sem aquecimento (P4 TA).

Deve-se atribuir tais perdas a um atraso do ponto de injeção demasiado que, em combinação com as perdas promovidas pelas alterações de densidade e viscosidade, não foram compensadas pela melhor pulverização.

Ainda, as perdas de torque a T55 e a T75 em elevadas rotações são devidas às frações finais do combustível, que são injetadas quando o volume já deslocado pelo pistão não proporciona as melhores condições para que se desenvolva a boa transformação energética.

A análise do consumo específico do combustível e dos gases residuais de exaustão contribui para reforçar tal hipótese.

Especificamente, para o éster de sebo bovino, a máxima diferença de torque médio produzido foi registrada pelo tratamento SEBO P4 TA (-6,3%), indicando que a redução do avanço de injeção em 4º reduziu as perdas em relação ao tratamento anterior (SEBO P2 TA).

A menor redução de torque apresentado pelo éster de sebo em todos os tratamentos é função da adequação do ponto de injeção ao maior NC do éster, sugerindo que o menor retardo de combustão pode minimizar as perdas ocasionadas pela má pulverização do éster.

A mistura de ésteres produziu, em toda a faixa de rotações do experimento, valores de torque inferiores ao B2, para todos os tratamentos (MISTURA P4 TA, MISTURA P4 T55 e MISTURA P4 T75) apresentaram-se valores médios de -11,0%, -5,3% e -9,3%, respectivamente.

Novamente, podem-se observar indicativos de que o aquecimento à T75 pode ser demasiado para os ésteres do experimento, seja na excessiva redução da viscosidade que incrementa as perdas por bombeamento na injetora, seja na excessiva variação de densidade que reduz o teor energético dos volumes dosados pela bomba.

No entanto, agora, na condição de ponto mais atrasado, houve queda de rendimento em relação à mistura de ésteres na condição de P2, porém apresentando-se valores de torques médios sempre superiores à mistura sem aquecimento.

Obriga-se considerar que o NC da mistura deve estar situado entre o éster etílico de girassol e do metílico de sebo bovino. Por isso, atribui-se tais perdas a um atraso do ponto de injeção demasiado para o NC da mistura que, em combinação com as perdas promovidas pelas alterações de densidade e viscosidade, não puderam ser compensadas pela melhor pulverização.

Ainda, as frações finais do combustível são injetadas quando o volume deslocado pelo pistão não proporciona as melhores condições para que se desenvolva uma boa combustão.

4.4.4 Ponto de avanço inicial da injeção (PO) – Resultados para a variável Potência

Como a potência é uma variável dependente, definida em termos de torque e de rotação do motor, as mesmas possíveis causas para aumento ou redução de seus valores podem encontrar suporte nas mesmas causas das alterações de torque. As curvas de potência para o éster etílico de girassol, quando utilizado o ponto de avanço de injeção original do motor, apresentaram uma redução média em torno de 5,0%: valor igual ao citado por Kucek *et al* (2004) como uma média para ésteres de óleos vegetais, confirmada por Kegl (2008).

A análise das Figuras 27, 28 e 29 e os dados estatísticos indicam que o avanço de injeção original do motor, quando da utilização dos ésteres de óleo de girassol, de sebo bovino e a mistura de ésteres, produziram uma significativa redução de potência em relação às apresentadas pelo óleo diesel B2. Os melhores resultados foram obtidos pelo éster de girassol na faixa T55 (ETGIR PO T55), onde ocorreu uma ligeira redução de potência (-3,7%).

Os piores resultados observados foram produzidos pelo éster de sebo bovino, sem aquecimento (SEBO PO TA), onde a queda de potência média foi mais acentuada (-11,8%) e seu valor confirma Maziero *et al* (2005). As possíveis causas de redução de potência apresentada pelos ésteres são as mesmas observadas para as reduções de torque.

Observou-se um indicativo do melhor processo de pulverização e formação de mistura, em consequência disso, desenvolve uma combustão melhor com uma maior produção de calor em relação aos ensaios com o combustível em temperatura ambiente. Para o éster etílico de sebo bovino, os resultados mostraram uma queda mais acentuada de potência em relação ao óleo diesel B2. Não observou-se diferença estatística entre as médias de potência para os tratamentos com aquecimento do éster de sebo, com SEBO PO T55 e SEBO PO T75 inferiores ao B2 em -10,1 e -10,5%, respectivamente. A maior diferença de torque em relação ao óleo diesel B2, foi produzida pelo tratamento sem aquecimento (SEBO PO TA).

Os valores de potência registrados pelo o éster de sebo bovino sem aquecimento foram atribuídos às maiores viscosidade e tensão superficial, que promoveram uma má formação de mistura com conseqüente menor produção de calor. Ainda, deve-se considerar a diferença entre o número de cetano do éster em relação ao B2, superior em favor do primeiro que, comprovadamente, não é o mais indicado para o avanço de injeção original do motor. A mistura de ésteres produziu, em toda a faixa de rotações, valores de potência inferiores ao óleo diesel B2, com os tratamentos MISTURA PO TA, MISTURA PO T55 e MISTURA PO T75, apresentando médias de potência de -9,8%, -7,8% e -9,7% respectivamente.

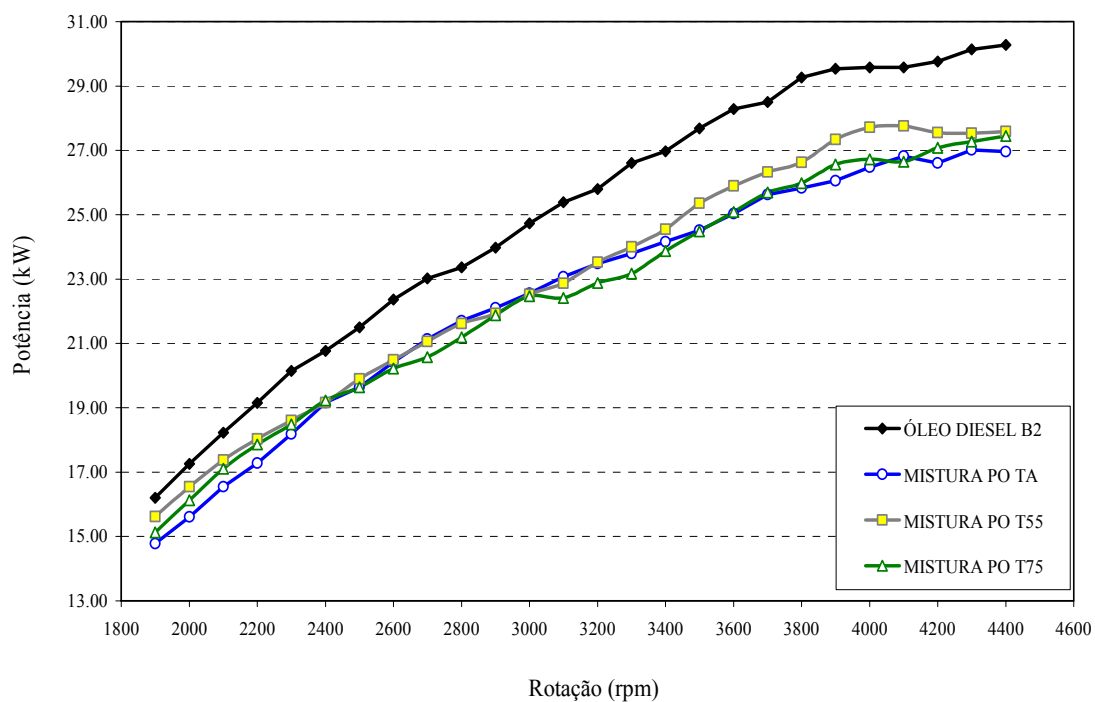


Figura 27 – Potência para o éster etílico de girassol, ponto original (P0), três temperaturas

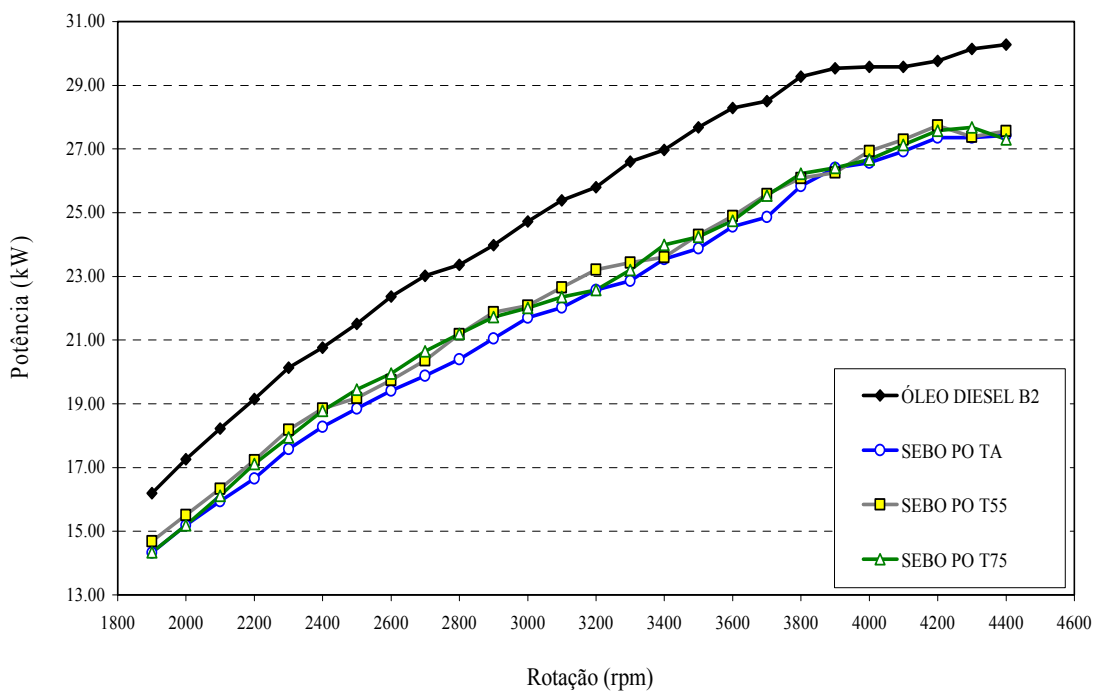


Figura 28 – Potência para o éster etílico de sebo bovino, ponto original (P0), três temperaturas

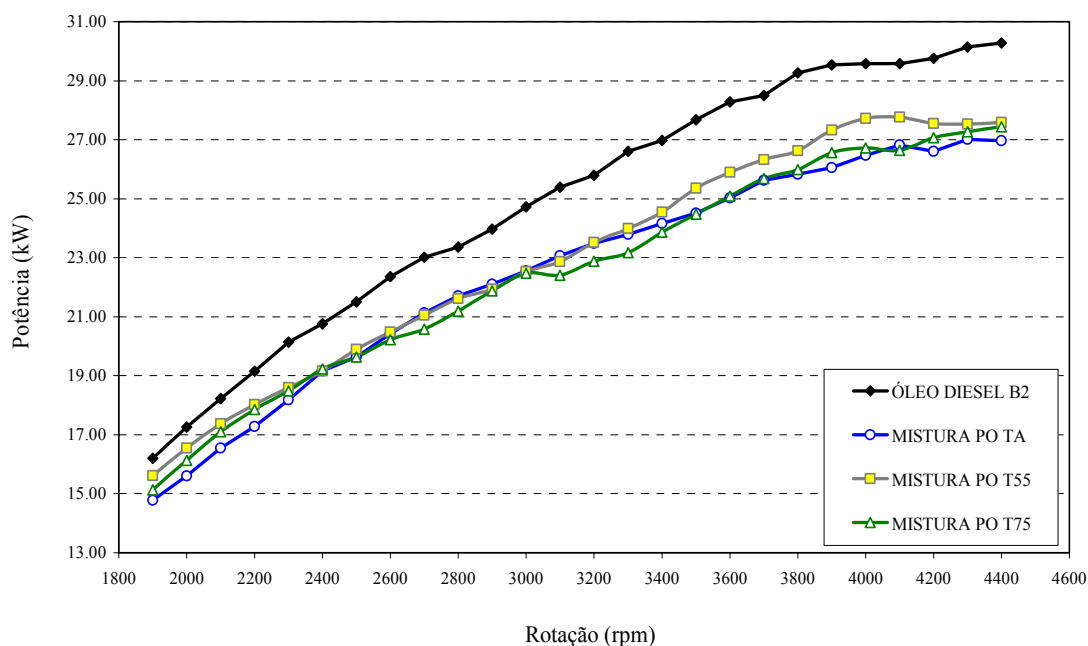


Figura 29 – Potência para a mistura de ésteres, ponto original (P0), três temperaturas

4.4.5 Ponto de avanço inicial da injeção (P2) – Resultados para a variável Potência

As Figuras 30, 31 e 32 reúnem os resultados dos ensaios do motor alimentado com os ésteres, sob um ponto de avanço de injeção atrasado em 2° (P2), para a variável potência. Para o éster etílico de óleo de girassol, a partir de 2600 rpm, os resultados de potência apresentados tanto pela testemunha como pelo éster aquecido passaram a não apresentar diferença estatística e, por vezes, a curva de potência do ETGIR P2 T55 superou a do óleo diesel B2, notadamente nos regimes superiores de rotação.

O ETGIR P2 T55 foi o tratamento que proporcionou a menor diferença de potência média em relação ao óleo diesel (-0,26%), estatisticamente, são iguais. O retardo da injeção e o aquecimento à T55, produziram uma recuperação das perdas, geralmente, provocadas pelo menor poder calorífico do éster etílico em relação ao B2.

Também foi observada uma diferença significativa entre as potências produzidas pelos tratamentos ETGIR P2 TA e ETGIR P2 T75 ao longo de toda a faixa de rotações dos ensaios.

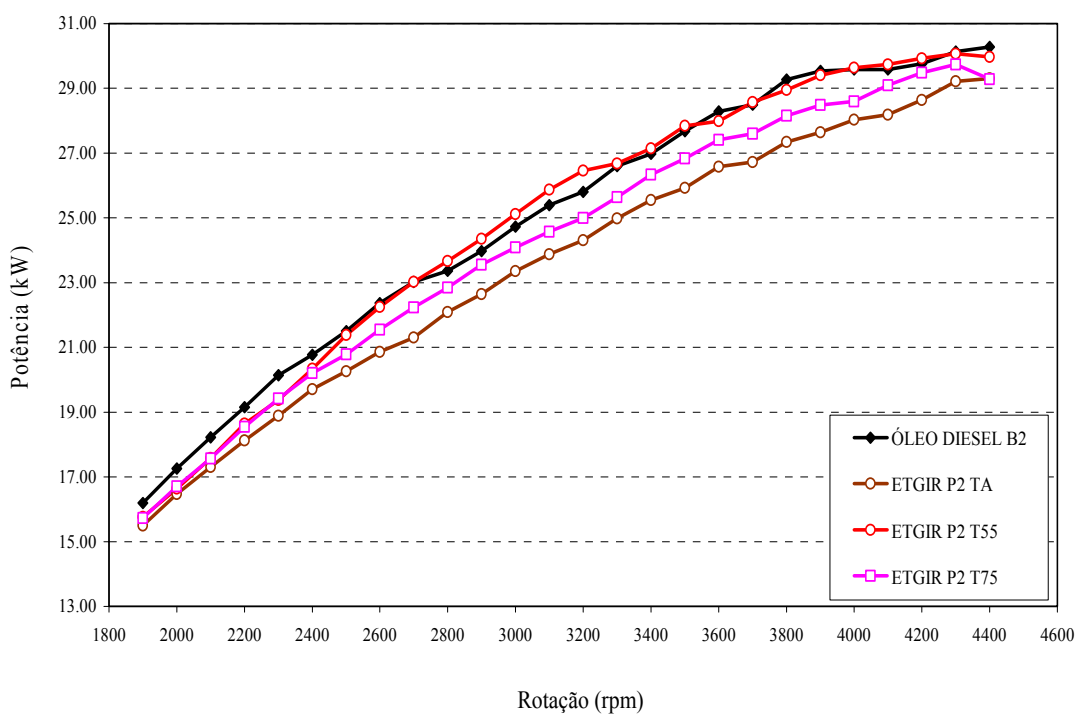


Figura 30 – Potência para o éster etílico de girassol, ponto atrasado em 2º (P2), três temperaturas

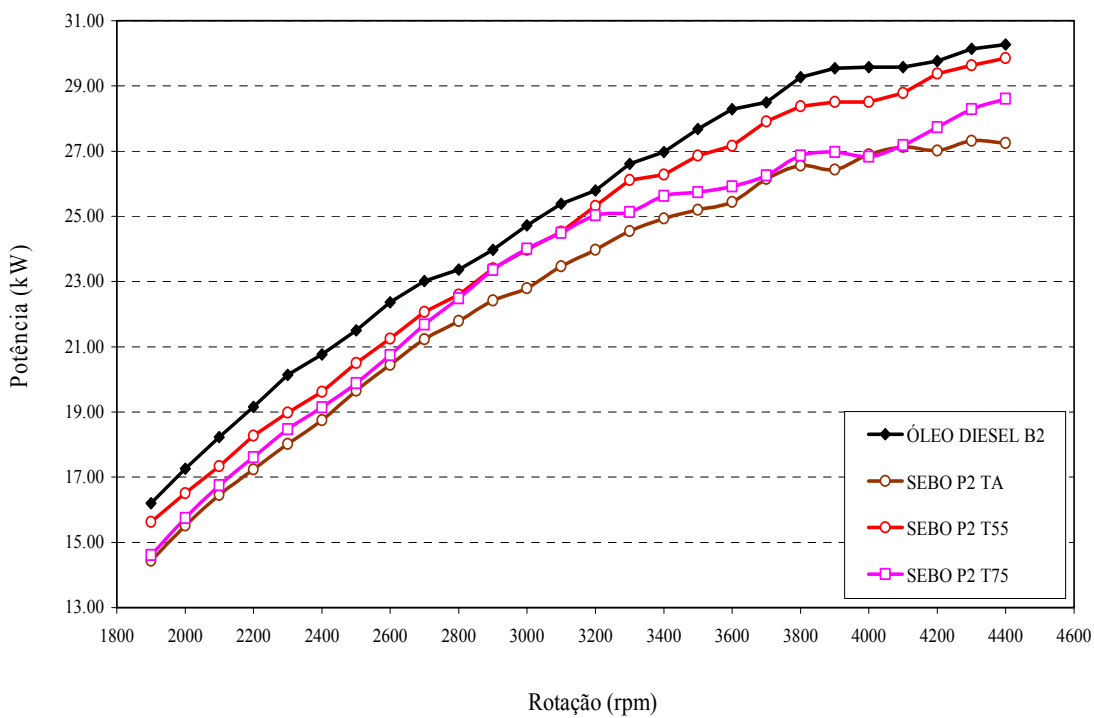


Figura 31 – Potência para o éster de sebo bovino, ponto atrasado em 2º (P2), três temperaturas

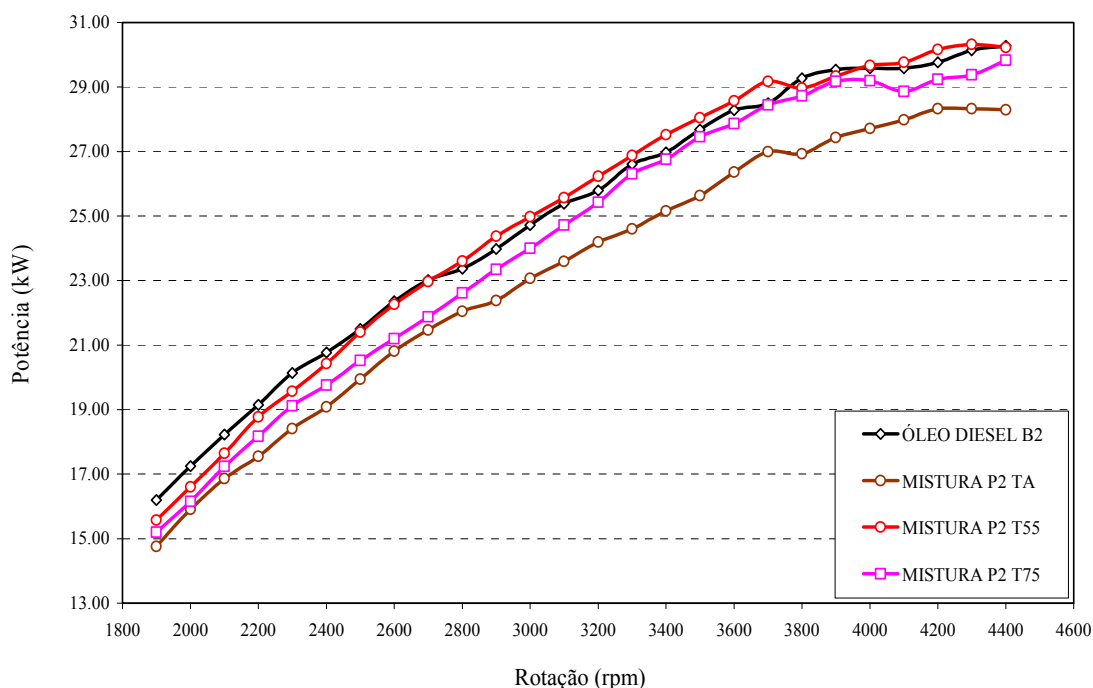


Figura 32 – Potência para a mistura de ésteres, ponto atrasado em 2º (P2), três temperaturas

Observam-se indicativos de que o aquecimento à T75 sob o ponto de injeção atrasado (P2), melhora as condições de combustão do éster etílico de óleo de girassol, superando a potência desenvolvida pelo éster em temperatura ambiente (ETGIR P2 TA), ou seja, as perdas promovidas pela má formação da mistura foram mais expressivas do que àquelas oriundas da variação de densidade e de viscosidade.

Os piores resultados sob o ponto de injeção de 2º atrasados, foram obtidos pelo éster de sebo bovino sem aquecimento, o SEBO P2 TA, com uma redução de -8,8% em relação ao B2. A redução de potência apresentada pelo éster em temperatura ambiente (TA), novamente deve ser atribuído à má formação da mistura em consequência das maiores viscosidade e tensão superficial deste combustível oxigenado. O melhor desempenho apresentado pelo éster etílico de sebo bovino foi obtido para o tratamento SEBO P2 T55 (-3,18%).

Indicativos de melhores processos de pulverização e formação de mistura foram observados para os ésteres de sebo aquecidos, como consequência, a combustão foi mais bem realizada e desenvolveram-se maiores produção e aproveitamento do calor gerado em relação aos ensaios com os combustíveis em temperatura ambiente.

Para todos os ésteres, utilizando-se o ponto P2, os melhores resultados se apresentaram sob a condição de aquecimento na faixa T55. Indicando ser esta a condição de temperatura mais apropriada para que os benefícios oriundos da melhor pulverização promovida e do ajuste do ponto de avanço de injeção não sejam anulados pelas perdas oriundas das variações de densidade e de viscosidade.

A mistura de ésteres produziu, em toda a faixa de rotações do experimento, valores de potência inferiores ao B2, para os tratamentos MISTURA P2 TA e MISTURA P2 T75, que apresentaram valores médios de -6,8% e -2,7%. Já, para o tratamento MISTURA P2 T55, a diferença registrada em favor da mistura de ésteres não possui significância (+0,12%). Isso, portanto, reforça a idéia de que o aquecimento melhorara as condições de combustão deste tipo de combustível, porém a diferença de NC não pode ser negligenciada.

Novamente observaram-se indicativos de que o aquecimento à T75 pode ter sido demasiado para o biocombustível, seja na excessiva redução da viscosidade que incrementa as perdas de bombeamento na injetora, seja na excessiva variação de densidade que reduz o teor energético dos volumes dosados pela bomba.

Contudo, agora na condição de ponto atrasado, não houve queda de potência em relação à mistura de ésteres na condição de temperatura ambiente, apresentando-se valores de potência sempre superiores à mistura sem aquecimento. As perdas ocasionadas pelas alterações de densidade e viscosidade são superadas pelo ganho promovido pela combustão de maiores frações do volume de combustível injetado.

4.4.6 Ponto de avanço inicial da injeção (P4) – Resultados para a variável Potência

Os resultados dos ensaios, utilizando-se o ponto atrasado em 4° (P4), indicam que a redução do avanço de injeção utilizado passa a ser demasiado, pois ocorre uma significativa queda de potência para os ésteres em relação aos valores registrados para os tratamentos anteriores (P2).

Os dados representados pelas curvas constantes da Figuras 33, 34 e 35 e os dados estatísticos indicam que, com o avanço de injeção atrasado em 4° e utilizando-se o B100 etílico de óleo de girassol ou de sebo bovino e mais a mistura de ésteres, promoveu-se também uma significativa redução de potência em relação àqueles apresentados pelo óleo diesel B2.

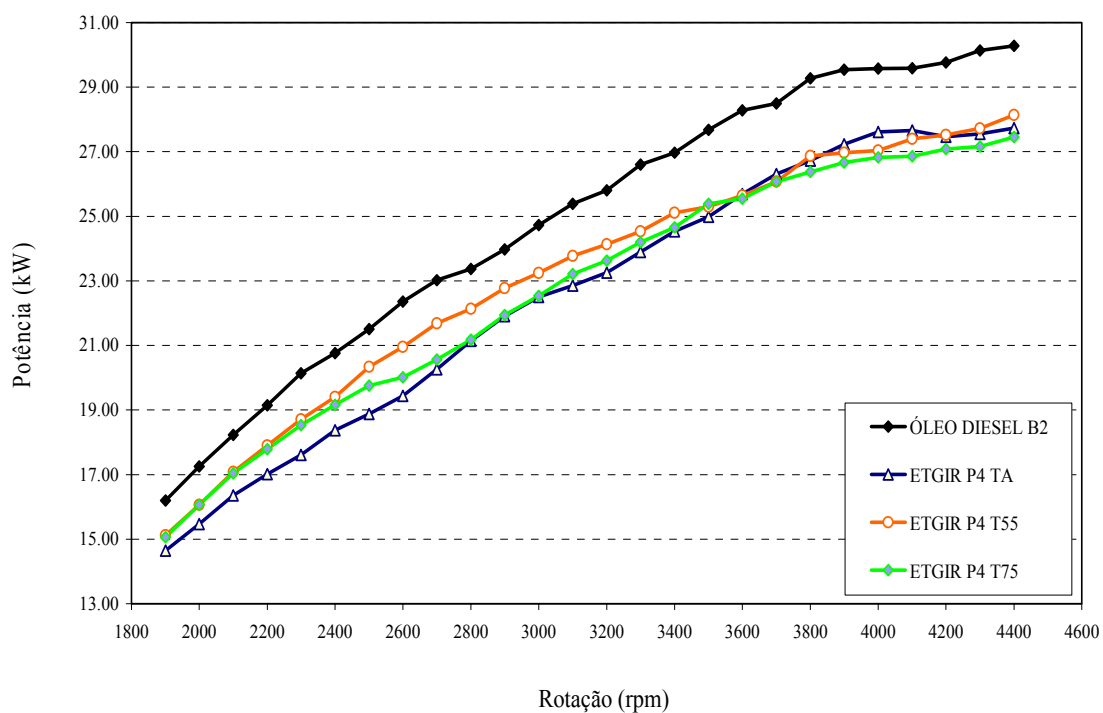


Figura 33 – Potência para o éster etílico de girassol, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas

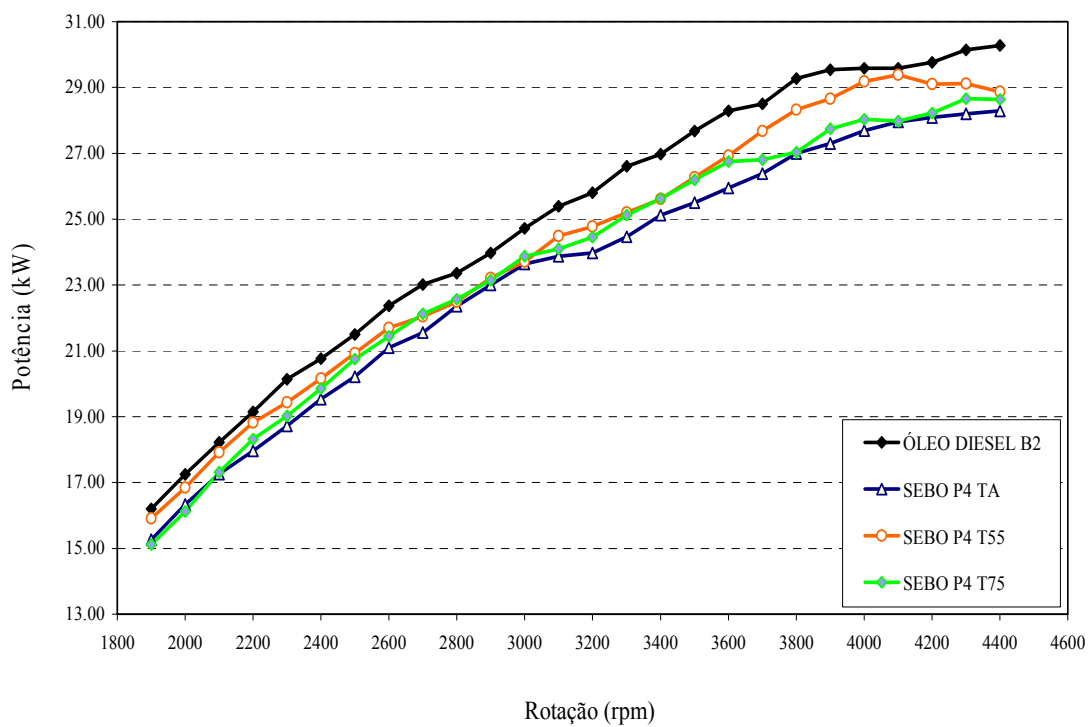


Figura 34 – Potência para o éster de sebo bovino, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas

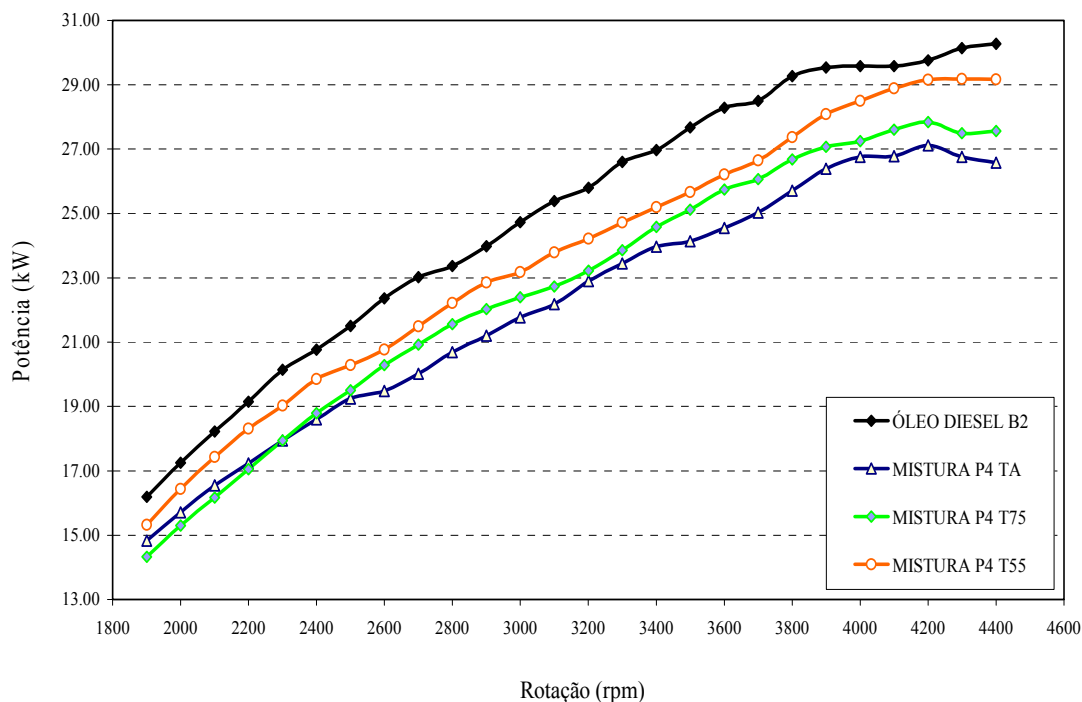


Figura 35 – Potência para a mistura de ésteres, ponto atrasado em 4° (P4), três temperaturas

Em termos médios, em relação ao ensaio-testemunha, os valores de potência apresentaram-se significativamente diferentes, situando-se entre -3,2% (SEBO P4 T55) e -11,1% (MISTURA P4 TA). A máxima diferença de potência média para o éster etílico de girassol foi registrada para o tratamento ETGIR P4 TA (-9,4%), indicando que a redução do avanço de injeção foi excessiva.

Deve-se considerar que a diferença de NC entre o éster de girassol e o B2 é de apenas 2 a 6 pontos. A redução de potência apresentada pelo éster em temperatura ambiente (TA) foi produto, além do menor conteúdo energético do mesmo em relação ao B2, da má pulverização para formação da mistura nessas condições.

Nos regimes de rotação elevados, observou-se que os valores de potência para o éster aquecido (ETGIR P4 T55 e ETGIR P4 T75) são semelhantes àqueles apresentados pelo éster sem aquecimento (ETGIR P4 TA). Deve-se atribuir, as perdas de potência verificadas em relação ao tratamento anterior (P2), a um atraso excessivo do ponto de avanço da injeção que, em combinação com as perdas promovidas pelas alterações de densidade e viscosidade, não puderam ser compensadas pela melhor pulverização.

Ainda, as perdas de potência a T55 e a T75 em elevadas rotações são devidas às frações finais do combustível, que são injetadas quando o volume já deslocado pelo pistão não proporciona as melhores condições para que se desenvolva a boa transformação energética.

Especificamente, para o éster de sebo bovino, a máxima diferença de potência média produzida foi registrada pelo tratamento SEBO P4 TA (-6,4%) e a menor pelo SEBO P4 T55 (-3,3%), indicando que a redução do avanço de injeção em 4°, reduziu as perdas em relação ao tratamento anterior (P2). A menor redução de potência apresentada em relação ao B2 pelo éster, em todos os tratamentos, é função da adequação do ponto de injeção ao maior NC do éster, sugerindo que o menor retardo de combustão pode minimizar as perdas ocasionadas pela má pulverização do éster para biocombustíveis com elevado número de cetano.

O éster etílico de sebo bovino foi o combustível mais sensível à variação de ponto de injeção, entre todos os utilizados no experimento. A mistura de ésteres produziu, em toda a faixa de rotações do experimento, valores de potência inferiores ao B2, para todos os tratamentos (MISTURA P4 TA, MISTURA P4 T55 e MISTURA P4 T75) que apresentaram valores médios de -11,1%, -5,3% e -9,1% respectivamente.

Novamente, podem-se observar indicativos de que o aquecimento à T75 pode ser demasiado para a mistura de ésteres do experimento, seja na excessiva redução da viscosidade que incrementa as perdas por bombeamento na injetora, seja na excessiva variação de densidade que reduz o teor energético dos volumes dosados pela bomba. Mas agora, na condição de ponto excessivamente atrasado, houve queda de rendimento em relação à mistura de ésteres na condição de P2, porém apresentando-se valores de potências médias sempre superiores à mistura sem aquecimento. Deve-se considerar que o NC da mistura deve estar situado entre o éster etílico de girassol e do metílico de sebo bovino. Observou-se novamente o indicativo de que o aquecimento do combustível, dentro de uma faixa de temperaturas, pode conduzir à melhor formação do jato combustível, ao favorecer o processo de combustão, reduzindo as perdas em relação ao B2.

4.5 Análise dos melhores resultados

A partir da observação e análise dos resultados obtidos no experimento para as variáveis medidas ou determinadas, como requisitos para obtenção de quais foram os melhores resultados e os melhores tratamentos, visando sua aplicação prática, considerou-se:

- Média de torque, a mais elevada possível e não apenas o valor máximo registrado;
- Média de potência, a mais elevada possível e não o valor máximo registrado;
- Média de consumo específico, a mais reduzida possível e não o mínimo valor registrado;
- Gases de exaustão, os menores teores possíveis de gases nocivos para os melhores resultados de torque, de potência e consumo específico.

Com os tratamentos ETGIR P2 T55 e MISTURA P2 T55 foram obtidas as maiores médias de torque do experimento, sem diferença estatística em relação aos ensaios com o óleo diesel B2. Na Figura 36 estão apresentados os cinco tratamentos cujas médias mais se aproximaram daquela obtida pela testemunha. A análise das curvas permite a observação de que os melhores tratamentos contemplam tanto o aquecimento como alteração do ponto de avanço inicial da injeção.

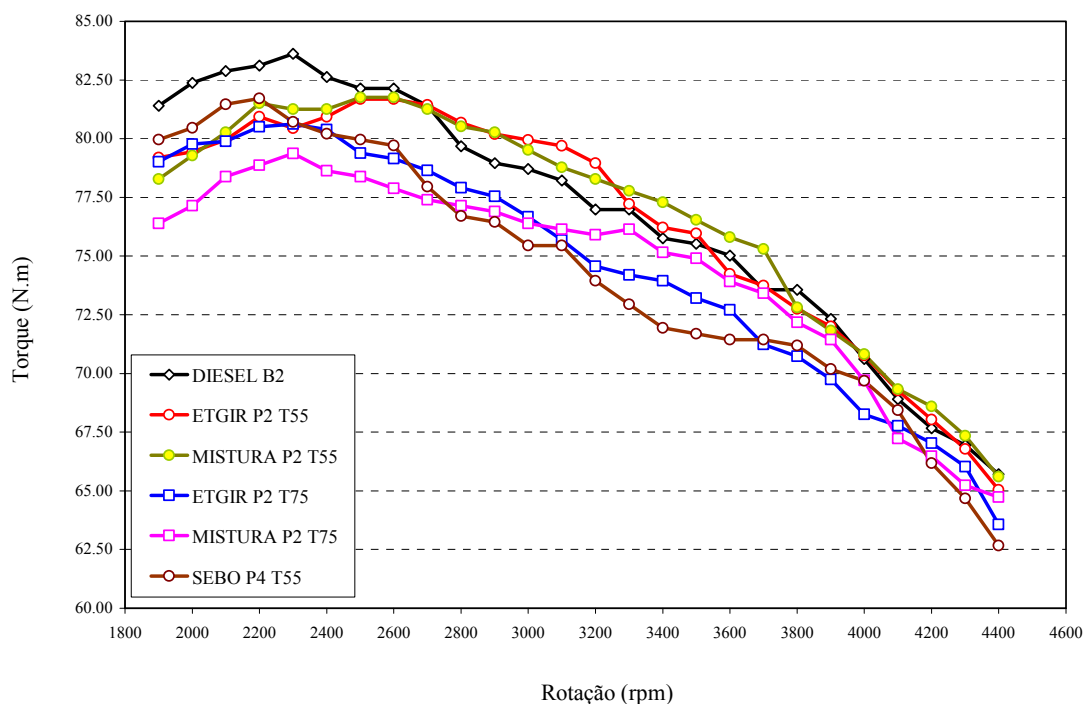


Figura 36 – Torque para os melhores resultados do experimento

A definição do melhor valor para o avanço de injeção é dependente do tipo de éster, em função do NC. Porém, para alcançarem-se os melhores resultados, somente o artifício do aquecimento não basta nem somente a variação do ponto de injeção. A conjugação dos dois fatores faz-se necessária.

Para todos os ésteres, observa-se uma inclinação de ocorrência do alongamento do melhor processo de combustão, ao se incrementar o desenvolvimento de maior torque em médios e altos regimes de rotação, tendência já observada por Machado (2003), Kidoguchi *et al* (2000) e Al-Widyan (2002) e Canakci (2007). Com exceção do éster de sebo bovino, que apresenta um número de cetano superior, o atraso do avanço inicial de injeção em 2° (P2) proporcionou que a liberação da energia do combustível se desse em condições mais apropriadas para a produção de força.

A Figura 37 reúne as curvas de potência para os melhores tratamentos do experimento e os valores registrados, utilizando-se os ésteres combustíveis, são semelhantes aos citados por Altin *et al* (2001).

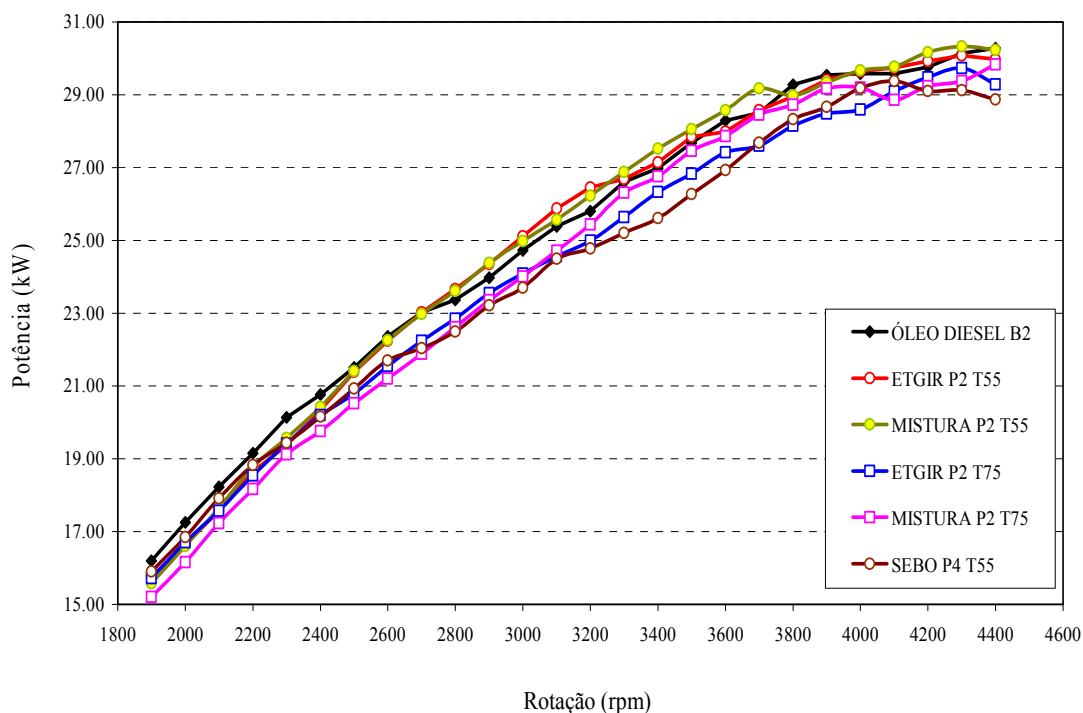


Figura 37 – Potência para os melhores resultados do experimento

Com os tratamentos ETGIR P2 T55 e MISTURA P2 T55 foram obtidas as maiores médias de potência do experimento, sem diferença estatística em relação aos ensaios com o óleo diesel B2. O tratamento SEBO P4 T55 foi incluído entre os cinco melhores porque a sua melhor característica não é potência produzida e sim é a redução dos níveis de emissões de NO_x, como discutido na seqüência.

4.6 Consumo específico de combustível – Resultados expressivos

Para a apresentação dos melhores resultados obtidos, em termos de consumo específico de combustível, consideraram-se apenas os cinco tratamentos que apresentaram os melhores resultados para as variáveis torque e potência. Os tratamentos que apresentaram os menores consumos específicos médios do experimento foram o ETGIR P2 T55 (+ 0,6%), MISTURA P2 T55 (-0,4%) e MISTURA P2 T75 (+1,6%), que estatisticamente são iguais.

Os piores resultados obtidos pelo éster de sebo bovino foram registrados sob o tratamento SEBO PO TA (+14,5%) e o melhor registro para a média de consumo específico foi para SEBO P4 T55 (+3,05%) confirmando Kegl (2007), que alcançou os menores consumos específicos com o ponto de injeção atrasado em relação ao original do óleo diesel, com ésteres de maior número de cetano.

Tais resultados fortalecem a importância da alteração do avanço de injeção para os ésteres, que, em geral, apresentam um número de cetano bastante diferenciado, sempre mais elevado, e do pré-aquecimento dos biocombustíveis, para que se obtenham os melhores desempenhos. Para o éster de óleo de girassol, os maiores valores médios para consumo específico, foram obtidos pelo tratamento ETGIR P4 TA (+11,94%), demonstrando, assim, a importância do pré-aquecimento para obtenção de melhores resultados.

O consumo específico de combustível registrado pelo éster de óleo de girassol é assemelhado aos citados por Maziero *et al* (2005). O ponto de avanço de injeção atrasado em 4º (P4) mostrou-se demasiado, pois o número de cetano do éster etílico é o mais aproximado do óleo diesel B2. Os resultados são superiores àqueles obtidos por Kegl (2008), +10% e Dorado *et al* (2003), + 8,5%, que recomendam a utilização de ésteres, mesmo com o incremento no consumo específico em função dos benefícios ambientais oriundos de tal prática, e Canakci (2007) faz referência a um incremento de 13,8% no consumo específico para o biodiesel utilizado em seus experimentos.

O consumo específico médio do tratamento MISTURA P4 TA (+11,57) foi o pior registrado para a mistura de ésteres, tal resultado deve ser atribuído à pulverização deficiente do combustível sem aquecimento e à inadequação do avanço de injeção ao NC, resultante da mistura de ésteres, atrasado em demasia. Não foram reconhecidas diferenças significativas entre as médias de consumo específico de ETGIR P2 T75 e SEBO P4 T55.

A Figura 38 apresenta a curva de tendência para os consumos específicos obtidos com os ésteres combustíveis que apresentaram os melhores resultados para torque e potência.

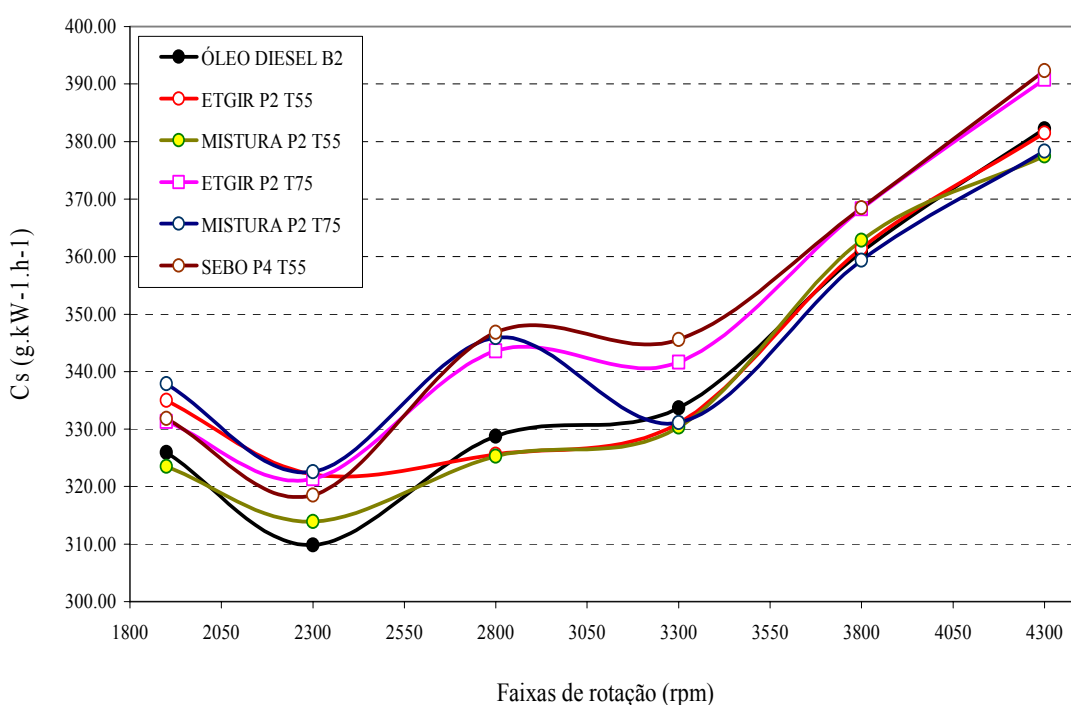


Figura 38 – Consumo específico de combustível, resultados para os melhores tratamentos.

Em elevadas rotações, o consumo específico dos demais tratamentos é assemelhado, reforçando a tese de que os biocombustíveis em elevadas rotações apresentam um maior rendimento, atribuindo-se ao aquecimento uma melhor formação da mistura em função da maior pulverização em conjunto com a adequação do ponto de avanço da bomba injetora ao número de cetano diferenciado.

Deve-se ressaltar que as curvas de consumo específico de combustível foram obtidas, apenas, para seis regimes diferentes de rotação.

4.7 Temperatura de gases de exaustão

As temperaturas dos gases de exaustão são utilizadas como ferramenta para avaliação da eficiência do processo de combustão. A Figura 39 mostra os valores registrados para os tratamentos que apresentaram os melhores resultados para torque, potência e consumo específico de combustível.

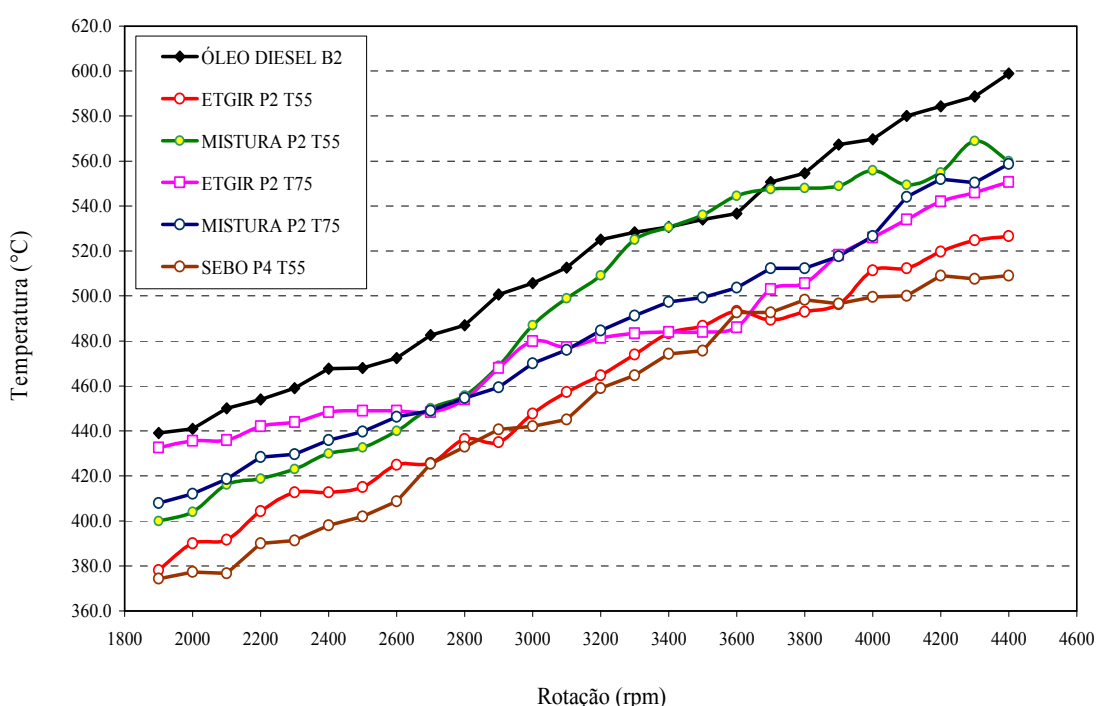


Figura 39 – Temperatura dos gases de exaustão, melhores tratamentos

As temperaturas dos gases de exaustão elevadas devem ser interpretadas para, em conjunto com as curvas de torque e de gases residuais da combustão, avaliar se o processo de combustão se deu de uma maneira eficiente, se as elevadas temperaturas geradas produziram trabalho útil ou se frações maiores de combustível entraram em combustão muito tardiamente. Neste último caso, certamente, houve impossibilidade de transformação de energia em função da posição do pistão ao longo de seu curso. A maior média de temperaturas registrada foi obtida pelo óleo diesel B2, em função de o equipamento injetor utilizado ter sido projetado para este combustível e do maior poder calorífico dele. O seu valor foi de 514, 95°C.

As médias de temperatura para os melhores resultados com os ésteres foram entre 25 e 65°C mais baixas do que com o B2.

A observação das temperaturas dos gases de exaustão conduz à indicação de que para os ésteres aquecidos e com o ponto de ignição apropriado, apesar de o menor poder calorífico destes, se produz um maior aproveitamento do calor liberado no processo de combustão, ou seja, observa-se uma maior eficiência térmica, corroborando Al-Widyan *et al* (2002).

O maior valor de temperatura média entre os ésteres, para MISTURA P2 T55, deve ser atribuído ao éster metílico presente no éster, que segundo Korus *et al* (1994), desenvolve mais torque e potência que os etílicos, em função da viscosidade e da densidade superiores ao B2 nesta faixa de temperaturas.

Um maior conteúdo energético, melhor aproveitado, em função do processo de mistura alcançado e pela adequação do ajuste do ponto de avanço de injeção ao número de cetano resultante da mistura, que deve situar-se entre o do éster etílico e o do metílico de sebo bovino.

4.8 Emissões residuais de combustão – Resultados expressivos

4.8.1 Emissões de CO

As emissões de monóxido de carbono foram inferiores às registradas pelo diesel B2, sem exceção, pelos melhores tratamentos com ésteres, em concordância com os relatos de Kegl (2008), que atribuiu às câmaras de combustão em separado, que incrementam a turbulência da mistura e produzem uma combustão mais completa e, em consequência, reduz significativamente o teor de CO nos gases de exaustão.

Usta (2005) já registrara redução de emissões de CO em função do uso de ésteres combustíveis. Esse registro ele atribuiu ao maior conteúdo de oxigênio dos mesmos em peso, relativamente ao óleo diesel mineral, que auxiliam na oxidação dos produtos da combustão no cilindro.

A maior redução ocorreu para o tratamento MISTURA P2 T55 (-68,0%) na rotação de 3800 rpm e a menor para o ETGIR P2 T75 (-33,0%), na rotação de 3800 rpm. A efetiva redução das emissões de CO, para a mistura de ésteres deve ser atribuída à maior conversão

em produtos da combustão completa, em função da maior pulverização do combustível formando uma mistura melhor, aliada ao número de cetano da mistura. A Figura 40 apresenta os resultados obtidos para emissões de CO, para os melhores resultados do experimento.

De acordo com Içingür *et al* (2003), a elevação do número de cetano de um combustível diesel assegura um reduzido retardo de ignição e, portanto, uma melhor combustão.

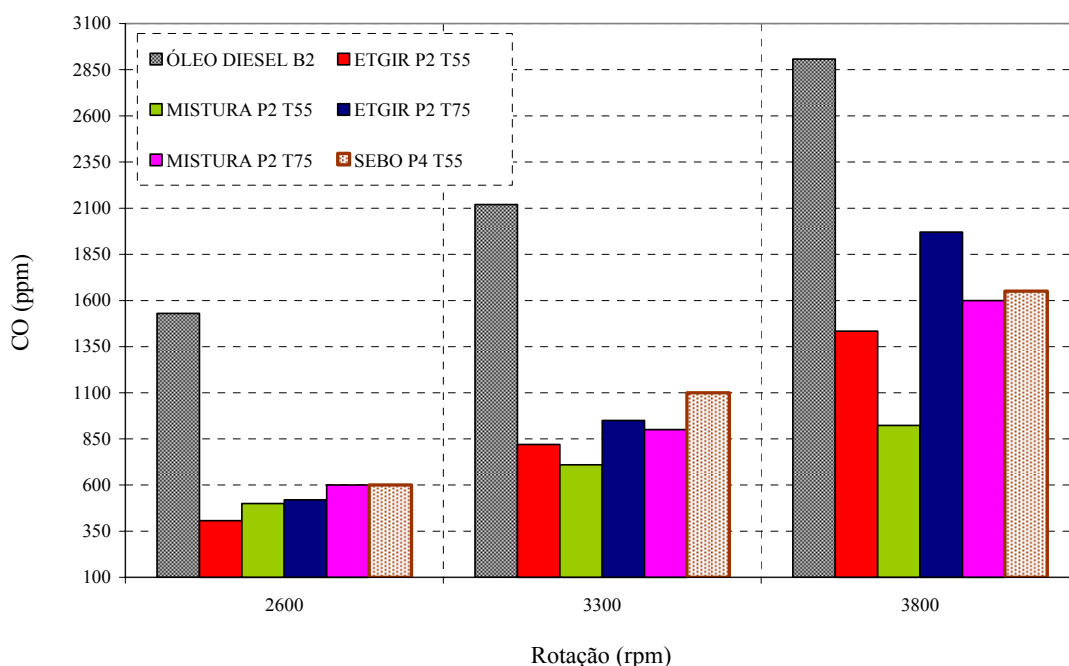


Figura 40 – Emissões residuais de combustão, melhores resultados, CO

4.8.2 Emissões de HC não-queimado

Aos tratamentos que apresentaram os melhores resultados para torque, potência e consumo específico de combustível, a Figura 41 representa as emissões de HC não-queimado.

Todos os ésteres combustíveis registraram redução nos teores de HC presente nos gases exaustos em relação ao B2. A maior redução foi apresentada pelo tratamento ETGIR P2 T75 (-47,0%) e a menor foi registrada para SEBO P4 T55 (-9,0%). O melhor resultado assemelha-se aos valores citados por Monyem *et al* (2001) e por Kegl (2008). Canakci (2007) citou uma redução nas emissões de HC em torno de 45% quando utilizou biodiesel.

Analisando-se os valores de HC não queimado nos gases exaustos para SEBO P4 T55, observa-se uma relação direta entre um consumo específico elevado, sem que a parte combustível resultasse em maior torque gerado pelo motor, havendo uma maior formação de compostos da combustão incompleta.

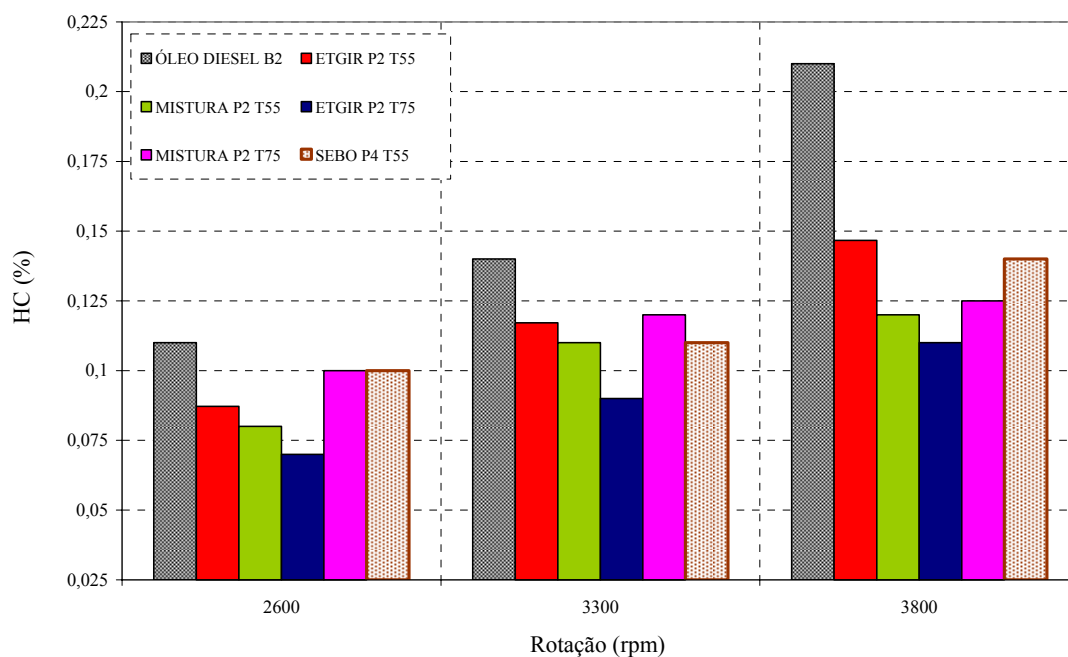


Figura 41 – Emissões residuais de combustão, melhores resultados, HC

4.8.3 Emissões de NO_x

Os resultados para emissões de óxidos de nitrogênio pelos ésteres mostram que a alteração do avanço de injeção é eficaz na redução dos NO_x, em contraste com Krahl *et al* (2006). Afirmam que o uso de ésteres leva a um aumento das emissões de NO_x, caso a administração do motor (intervalo e comportamento da injeção) permaneça inalterada. Ressaltam que as emissões de NO_x e o de material particulado (MP) correspondem aos componentes críticos das emissões de motores diesel alimentados com o biodiesel.

Watanabe *et al* (1998) citam que as emissões de NO_x são reduzidas pelo decréscimo da densidade do combustível e também quando o ponto de injeção é retardado. Confirmados, portanto, os resultados obtidos, com exceção de MISTURA P2 T75. Todos eles, obtidos nos

ensaios, apontam para uma efetiva redução na emissão de óxidos de nitrogênio. Na Figura 42 estão apresentados os resultados obtidos para emissões de NO_x . Para MISTURA P2 T75, os valores médios de emissões de NO_x foram superiores aos valores produzidos pelo óleo diesel B2. A maior redução das emissões de NO_x deu-se para SEBO P4 T55 (-44.0%) cujo ensaio foi reunido entre os melhores, justamente, pela sua resposta às emissões de NO_x .

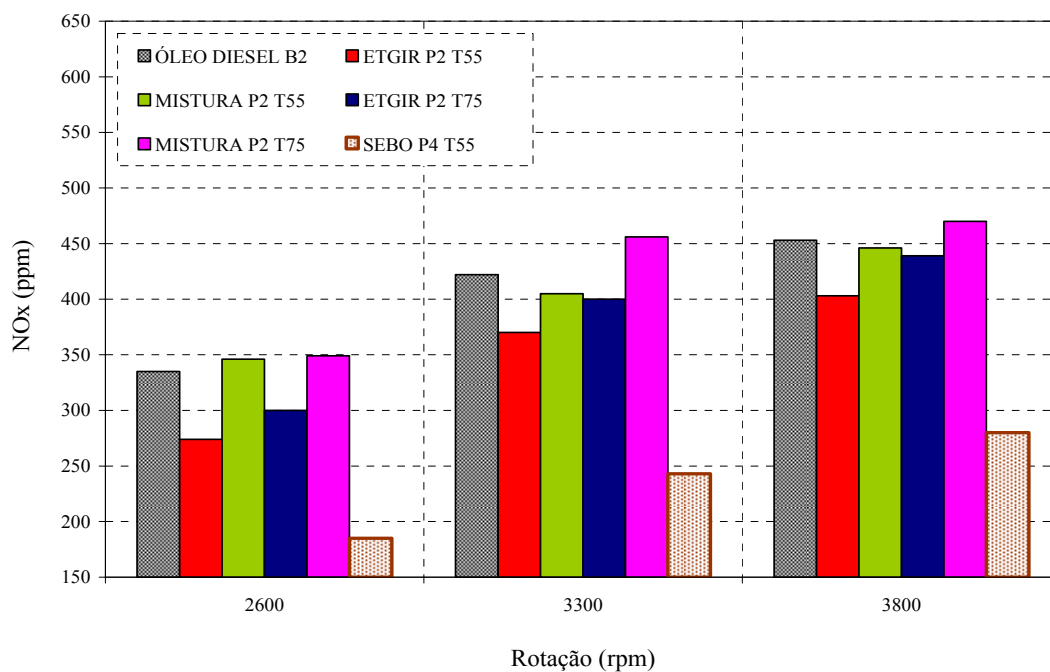


Figura 42 – Emissões residuais de combustão, melhores resultados, NO_x

5 CONCLUSÕES

5.1 Influência do pré-aquecimento do combustível

- O pré-aquecimento do combustível tem uma influência significativa sobre o desempenho do motor alimentado por ésteres (B100), porque promove melhor pulverização do combustível, melhor formação da mistura e melhor processo de combustão.

- Com o óleo diesel B2, nos ensaios-testemunha, obtiveram-se os melhores resultados do experimento para torque e consumo específico de combustível.

- Os melhores resultados para torque e consumo específico de combustível foram obtidos pelos ésteres nos tratamentos com aquecimento (ETGIR P2 T55 e MISTURA P2 T55), cujos valores não apresentaram diferenças significativas em relação ao óleo diesel B2.

- Os piores resultados obtidos pelos combustíveis aquecidos (para torque e consumo específico), foram obtidos pelo éster de sebo bovino sob ponto original de avanço de injeção (SEBO PO T75 e SEBO PO T55).

- Existe uma faixa ideal de aquecimento, para os ésteres, onde os ganhos oriundos da melhor formação da mistura são superiores às perdas ocasionadas pela variação de densidade. Os ensaios realizados com os combustíveis em temperatura ambiente (TA) e ponto de avanço original de injeção (PO) apresentaram os piores resultados do experimento.

- O bloco de ensaios conduzidos na faixa de temperaturas caracterizada por T55, apresentou valores médios de torque superiores àqueles conduzidos à T75, e sempre com consumo específico inferior.

5.2 Ponto de avanço de injeção

- Todos os ésteres, com número de cetano superior ao B2, responderam aos ajustes no ponto de avanço inicial de injeção, sendo que o éster etílico de sebo bovino e a mistura de ésteres foram os tratamentos que melhor aceitaram as modificações de ponto de injeção.

- O ponto de avanço inicial da injeção atrasado em 2° (P2), em relação ao original do óleo diesel (PO), permitiu o melhor desempenho para os ésteres aquecidos, com exceção do sebo bovino que apresentou o melhor desempenho com o ponto atrasado em 4° (P4) em relação ao PO.

- Os ensaios realizados com os ésteres sob o ponto original de injeção e em temperatura ambiente apresentaram os piores resultados do experimento em termos de torque e consumo específico de combustível (SEBO PO TA, ETGIR PO TA e MISTURA PO TA).

- A influência do ponto de avanço de injeção vai sendo reduzida à medida que o regime de rotações cresce. A turbulência do ar admitido e a melhor taxa de entrega do combustível pelo injetor são mais significativos para a combustão do que o retardo da injeção em rotações elevadas.

5.3 Consumo específico de combustível e emissões gasosas

- Os melhores resultados para consumo específico de combustível ($\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$) foram registrados pelos tratamentos ETGIR P2 T55 e MISTURA P2 T55 que não apresentaram diferença estatística em relação ao B2.

- Os piores resultados para consumo específico de combustível ($\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$) foram obtidos pelos tratamentos SEBO PO T75, SEBO PO T55 e MISTURA PO TA, respectivamente.

- As temperaturas médias dos gases de exaustão para todos os ésteres do experimento foram inferiores às registradas pelo óleo diesel B2 em valores situados entre 25 e 60°C.

- As emissões de CO foram inferiores às do B2, sem exceção, para os melhores tratamentos do experimento com os ésteres, e a mais expressiva redução observada foi para o tratamento MISTURA P2 T55. As emissões de HC foram também inferiores às do B2.

- As emissões de NOx, com exceção de MISTURA P2 T75 que apresentou valores iguais ao óleo diesel B2 (sem diferença estatística), foram inferiores às do B2, e a maior redução observada foi para SEBO P4 T55, constituindo-se essa, a melhor característica apresentada pelo tratamento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Biodiesel no Brasil**: A visão da indústria de óleos vegetais. 2006. Disponível em: <http://www.abiove.com.br/palestras_br.html>. Acesso em: 22 fev.2007.

AGARWAL, A.K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 3, p. 233-271, 2007.

ALTIN, R.; ÇETINKAYA, S.; YÜCESU, H. S. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 5, p. 529-538, 2001.

AL-WIDYAN, M.I.; TASHTOUSH, G.; ABU-QUDAIS, M. Utilization of ethyl ester of waste vegetable oil as fuel in diesel engines. **Fuel Processing Technology**, v. 76, n. 2, p. 91-103, 2002.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. O biodiesel e a inclusão social. Cadernos de altos estudos. **A importância da rota etílica**. p. 43-46, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5477**. Apresentação de Desempenho de Motores ACI (Alternativos de Combustão Interna). Rio de Janeiro, Jul. 1982. 28p.

_____. **NBR 5484**. Motores Alternativos de Combustão Interna de Ignição por Compressão (Diesel) ou Ignição por Centelha (Otto) de Velocidade Angular Variável - Ensaio. Rio de Janeiro, Fev. 1985. 8p.

BASKÁKOV, A. P. **Termotecnia**. Rússia: Mir, 1985. 416 p.

BONOMI, A. **Importância do biodiesel na matriz de combustíveis brasileiros**. In: Semana do Biodiesel – UFSCAR. São Carlos, SP, Brasil, 52 p. Março de 2007.

BOSCH. **Bomba distribuidora tipo VE**. Apostila técnica. 29 p. 2003.

BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. São Paulo: E. Blücher, 2005. 1232 p.

BOULANGER, P. *et al.* **Motores diesel**. v. 1, São Paulo : Ed. HEMUS, 1978. 228p.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Programa Brasileiro de Biocombustíveis**. Rede Brasileira de Biodiesel. PROBIODIESEL. Brasília, 06 mar.2003, 19p.

_____. **Resolução ANP nº 36, de 24 de novembro de 2004.** Estabelece as especificações para comercialização de óleo diesel e mistura óleo diesel/biodiesel – B2. ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Brasília, DF, 2004.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011.** Brasília, 2005. 120 p.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel.** Brasília, 06 dez.2004.

BUENO, A. V.; VELÁSQUEZ, J. A; MILANEZ, L. F. **Utilização de misturas biodiesel-óleo diesel:** Impacto sobre a eficiência de um motor de ignição por compressão. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8º, 2007, Cuzco, Peru. **Anais ...** Cuzco, 2007.

CAMARGO, M.N. **Estudo do comportamento de um motor de ignição por compressão, trabalhando com óleo diesel e gás natural.** 265f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

CANAKCI, M. Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 6, p. 1167-1175, 2007.

CANAKCI, M.; ERDIL, A.; ARCAKLIOGLU, E. Performance and exhaust emissions of a biodiesel engine. **Applied Energy**, v. 83, n. 6, p. 594-605, 2006.

CANDEIA, R.A. *et al.* Análise comparativa do biodiesel derivado de óleo de soja obtido com diferentes álcoois. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 2º, 2006, Brasília, Brasil. **Anais ...** Brasília, 2006, p.169-174.

CARVALHO, M. *et al.* **Biodiesel em Minas Gerais: riscos e oportunidades.** FAEMIG - ASSESSORIA TÉCNICA. Belo Horizonte, janeiro de 2007. 44p. Disponível em: <<http://faemg.org.br/arquivos/biodiesel>>. Acesso em: 24 jul. 2007.

CENEA – CENTRO NACIONAL DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. **Boletim Técnico n.1,** 1982.

CHOLLET, H.M. **Curso prático e profissional para mecânicos de automóveis.** São Paulo: Ed Hemus, 1981. 402p.

COMISSÃO EUROPÉIA. Programa ALTENER. **Bioenergia:** Manual sobre tecnologias, projeto e instalação. Portugal, janeiro de 2004. 242 p.

COSTA, B.J. *et al.* **Produção de biodiesel.** Dossiê técnico: TECPAR, 27 p., 2006. Disponível em: <<http://www.sbvt.ibict.br>>. Acesso em: 22 jul.2007.

COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, v.23, p. 531-537, 2000.

- DANTAS, M.B. **Obtenção, caracterização e estudo termoanalítico de biodiesel de milho** (*Zea mays, L.*). 2006. 138f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.
- DELACOURT, E.; DESMET, B.; BESSON, B. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques. **Fuel**, v. 84, n. 7/8, p. 859-867, 2005.
- DELGADO, L. M. **Los cultivos no alimentarios como alternativa al abandono de tierras**. Madrid: España: Editorial Agrícola Española, p. 9-12. 1994.
- DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biofuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n.1, p. 1-18, 2007.
- DESANTES, J.M. *et al.* Development and validation of a theoretical model for diesel spray penetration. **Fuel**, v. 85, n. 7/8, p. 910-917, 2006.
- DOMÍNGUEZ, L.A.A. **Biocombustibles: Utilización de los aceites vegetales como energía renovable**. Madrid, España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 1995. 203p.
- DOMINGOS, A.K. *et al.* Óleo bruto de girassol como matéria-prima à produção de biodiesel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS VEGETAIS E BIODIESEL, 1., 2004, Varginha, Brasil. **Anais ...**, Varginha, 2004, p. 279-283.
- DORADO, M.P. *et al.* Exhaust emissions from a Diesel engine fuelled with transesterified waste olive oil. **Fuel**, v. 82, n. 11, p. 1311-1315, 2003.
- EJIM, C.E.; FLECK, B.A.; AMIRFAZLI, A. Analytical study for atomization of biodiesel and their blends in a typical injector: Surface tension and viscosity effects. **Fuel**, n. 10/11, v. 86, p. 1534-1544, 2007.
- ENCINAR, J.N.; GONZÁLEZ, J. F.; RODRÍGUEZ-REINARES, A. Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. **Fuel Processing Technology**, v. 88, n. 5, p. 513–522, 2007.
- EROKHIN, V.; MAKHAN'KO, M.; SAMOILENKO, P. **Fundamentals of thermodynamics and heat engineering**. Moscow: Mir Publishers, 1986. 240 p.
- FARIA, W.L.S. *et al.* Esterificação de ácido graxo para produção de biodiesel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CATÁLISE, 12., 2003, Angra dos Reis, RJ, Brasil. **Anais...** Angra dos Reis, RJ, 2003, p. 943-946.
- FERRARI, R.A. *et al.* Biodiesel de soja – Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 19-23, 2005.
- GIACOSA, D. **Motores Endotérmicos**. 3. ed. Barcelona: Editorial Científico-Médica, 1964. 722 p.
- GUIBET, Jean-Claude. **Fuels and Engines**. Paris: Technip, 1999. 784 p. 2v.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engines Fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988. 897 p. 2v.

IÇINGÜR, Y.; ALTIPARMAK, D. Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI diesel engine performance and emissions. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 3, p. 389-397, 2003.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Alternative fuels for the future: The search for alternatives**. OECD. Paris, FR, 2000. 92 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO - IBP. **Curso de Informação sobre Combustíveis e Combustão**. 11. ed. Rio de Janeiro, 1988. 201 p.

KAUFMAN, K. R.; ZIEJEWSKI, M. Sunflower methyl-esters for direct injected diesel engines. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 1, p. 2-9, 1986.

KEGL, B. Effects of biodiesel on emissions of a bus diesel engine. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 4, p. 863-873, 2008.

KIDOGUCHI, Y. *et al.* Effects of fuel cetane number and aromatics on combustion process and emissions of a direct-injection diesel engine. **JSAE Review**, v. 21, n. 4, p. 469-475, 2000.

KNOTHE, G. *et al.* **Manual de biodiesel**. São Paulo: E. Blücher, 340 p. 2006.

KNOTHE, G. A história dos combustíveis derivados de óleos vegetais. In: KNOTHE, G. (Org.); VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. **Manual de Biodiesel**. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E Blücher, 2006. p. 5-18.

_____. Métodos analíticos para o biodiesel. In: KNOTHE, G. (Org.); VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. **Manual de Biodiesel**. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E Blücher, 2006. p. 67-82.

_____. Propriedades do combustível: Número de cetano, calor de combustão e a viscosidade. In: KNOTHE, G. (Org.); VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. **Manual de Biodiesel**. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E Blücher, 2006. p. 85-90.

_____. Propriedades do combustível: Estabilidade à oxidação do biodiesel. In: KNOTHE, G. (Org.); VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. **Manual de Biodiesel**. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E Blücher, 2006. p. 133-138.

_____. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. **Fuel Processing Technology**, v. 86, n. 10, p. 1059–1070, 2005.

KORUS, R.A. *et al.* **Production and testing of ethyl and methyl esters**. University of Idaho, Moscow, [1994], 11 p. Disponível em: <<http://www.biodiesel.org/resources>>. Acesso em: 27 jun.2007.

KRAHL, J. *et al.* Influência do biodiesel e de diferentes combustíveis diesel sobre as emissões de exaustão e seus efeitos sobre a saúde. In: KNOTHE, G. (Org.); VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. **Manual de Biodiesel**. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E. Blücher, 2006. p. 193-201.

KUCEK, K.T. *et al.* Biodiesel produzido através da reação de transesterificação etílica de óleo de soja refinado e degomado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS VEGETAIS E BIODIESEL, 1., 2004, Varginha, Brasil. **Anais ...**, Varginha, 2004, p. 258-262.

LANG, X. *et al.* Preparation and characterization of bio-diesels from various bio-oils. **Bioresource Technology**, v. 80, n. 1, p. 53-62, 2001.

LEE, S.W. *et al.* Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine. **JSAE Review**, v. 23, n. 4, p. 407-414, 2002.

LEONTSINIS, E. **Óleo Diesel**. In: CURSO DE INFORMAÇÃO SOBRE COMBUSTÍVEIS E COMBUSTÃO. 11ª Ed., Rio de Janeiro: IBP, 1988. p. 65-77.

LILJEDAHN, J. B. *et al.* **Tractores y sus unidades de potencia**. México: Limusa, 1984. 432 p.

MACHADO, P.R.M. **Avaliação de desempenho do óleo de soja como combustível para motores diesel**. 2003. 191f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

MAKAREVICIENE, V.; JANULIS, P. Environmental effect of rapeseed oil ethyl ester. **Renewable Energy**, v. 28, n. 5, p. 2395-2403, 2003.

MAZIERO, J.V.G. *et al.* Avaliação de emissões poluentes de um motor de ignição por compressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS VEGETAIS E BIODIESEL, 2., 2005, Varginha, Brasil. **Anais ...** Varginha, 2005, p. 723-728.

_____. Avaliação de desempenho de um motor de ignição por compressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS VEGETAIS E BIODIESEL, 2., 2005, Varginha, Brasil. **Anais ...** Varginha, 2005, p. 729-733.

MEIRELLES, F.S. **Biodiesel**. Federação da Agricultura do Estado de São Paulo. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. Brasília, 2003, 27p.

MONYEM, A.; VAN GERPEN, J. H. The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions. **Biomass and Bioenergy**, v. 20, n. 4, p. 317-325, 2001.

NORMAN, M. *et al.* Fatty Acid Methyl Ester Fuels as a Replacement or Extender for Diesel Fuels: Diesel FIE Manufacturers – Common **FAME Fuel**, jun. 2000, p. 1-5, 2000.

NWAFOR, O.M.I. The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions. **Renewable Energy**, v. 28, n. 2, p. 171-181, 2003.

_____. Emission characteristics of diesel engine running on vegetable oil with elevated fuel inlet temperature. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 5, p. 507-511, 2004.

OBERT, E. F. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. Porto alegre: Globo, 1971. 618p.

OGURA, M. *et al.* Effect of fuel temperature on spray characteristics of diesel spray impinging on a ringed wall. **JSAE Review**, v. 23, n. 2, p. 189–194, 2002.

OLIVEIRA, L.B. **Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil**. 2004. 247 f. Tese (Programas de Pós-Graduação de Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, L.B.; COSTA, A.O. **Biodiesel**: Uma experiência de desenvolvimento sustentável. UFRJ, 2002, 14p. Disponível em: <<http://www.ivig.coppe.ufrj.br/biodiesel.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2006.

PARENTE, E. **Biodiesel**: Uma aventura tecnológica num país engraçado. Fortaleza, 30 mar. 2003. Disponível em: <<http://www.tecbio.com.br/Downloads>>. Acesso em: 10 fev. 2007.

PETERSON, C. L. Potencial de produção de biodiesel. In: KNOTHE, G. (Org.); VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. **Manual de Biodiesel**. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E Blücher, 2006. p. 256-264.

PETERSON, C.L. *et al.* Experiments with vegetable oil expression. **Transactions of the ASAE**, v. 26, n. 5, p. 1298-1302, 1983.

PETERSON, C.H. *et al.* Ethyl ester of rapeseed used as a biodiesel fuel – a case study. **Biomass and Bioenergy**, v. 10, n 5/6, p. 331-336, 1996.

PETROBRÁS. **Tipos de óleo diesel comercializados no Brasil**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/portal/produtos_serviços.htm>. Acesso em: 25 jun.2007.

POLLINI FILHO, E. **Queima de óleo combustível**. In: CURSO DE INFORMAÇÃO SOBRE COMBUSTÍVEIS E COMBUSTÃO. 11ª Ed., Rio de Janeiro: IBP, 1988. p. 129-160.

POYDO, P.R. **Motores e dinamômetros**. Best Cars Web Site. 2000. Disponível em <<http://uol.com.br/bestcars/ct>>. Acesso em 16 abr. 2005.

PUHAN, S. *et al.* Performance and emission study of Mahua oil (madhuca indica oil) ethyl ester in a 4-stroke natural aspirated direct injection diesel engine. **Renewable Energy**, v. 30, n. 8, p. 1269-1278, 2005.

RAHDE, S.B. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA. Centro de Tecnologia. **Motores de Combustão Interna**. Rio de Janeiro, 2002, 1.v não paginado, cópia reprográfica.

RAMOS, L.P. Aspectos técnicos sobre o processo de produção de biodiesel. In: SEMINÁRIO DE BIODIESEL DO ESTADO DO PARANÁ, 2003, Londrina. **Anais...** Londrina, PR, 2003. 33 p.

RAO, G.A.P.; MOHAN, P. R. Effect of supercharging on the performance of a DI Diesel engine with cotton seed oil. **Energy Conversion & Management**, v. 44, n. 6, p. 937-944, 2003.

REYES, J.F.; SEPÚLVEDA, M. A. PM-10 emissions and power of a diesel engine fueled with crude and refined Biodiesel from salmon oil. **Fuel**, v. 85, p. 1714-1719, 2006.

RIVA, G.; MÁRQUEZ, L. **Utilización energética de la producción agrícola comunitaria con especial referencia a las oleaginosas**. In: Los cultivos no alimentarios como alternativa al abandono de tierras. Barcelona: Ed. Agrícola Española, 1994. p. 57-71.

ROCHAEL, D.M. Participação dos insumos e influência da venda dos subprodutos no custo de produção do biodiesel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS VEGETAIS E BIODIESEL, 1., 2004, Varginha, Brasil. **Anais ...** Varginha, 2004. p. 284-288.

SILVA, C.C.M. *et al.* Estudo da viscosidade de biodiesel de *Ricinus communis L.* (mamona). **Química Hoje**. n. 04, p. 9-10. 2004.

SILVA, C. R. A. *et al.* A biomassa como alternativa energética para o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n. 2, p. 25-36, dezembro. 2004.

SOUZA, A. M.; LOPES, L. F. D. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. Centro de Ciências Naturais e Exatas. **Projetos de experimentos**. Santa Maria: Ponto Gráfico, 2002. 78 p.

SRIVASTAVA, A.; PRASAD, R. Triglycerides-based diesel fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.4, n. 2, p. 111-133, 2000.

STONE, R. **Introduction to Internal Combustion Engines**. 6. ed. United States of America: Ed of SAE, 1999. 574 p.

SUH, H.K.; PARK, S.W.; LEE, C.S. Effect of piezo-driven injection system on the macroscopic and microscopic atomization characteristics of diesel fuel spray. **Fuel**, v. 86, n. 17/18, p. 2833-2845, 2007.

TASHTOUSH, G.M.; AL-WIDYAN, M. I.; AL-JARRAH, M. M. Experimental study on evaluation and optimization of conversion of waste animal fat into biodiesel. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 17, p. 2697-2711, 2004.

TATE, R.E. *et al.* The densities of three biodiesel fuels at temperatures up to 300 °C. **Fuel**, v. 85, n. 7/8, p. 1004-1009, 2006.

URNS, S.R. **An introduction to combustion: Concepts and applications**. New York: Mc Graw-Hill, 1996. 563 p.

USTA, N. Use of tobacco seed oil methy ester in a turbocharged indirect injection diesel engine. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 77-86, 2005.

UTLU, Z.; KOÇAK, M. S. The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. **Renewable Energy**, v. 33, p. 1936-1941, 2008.

VAN GERPEN, J. Conceitos básicos sobre motores diesel e seus combustíveis. In: KNOTHE, G. (Org.); VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. **Manual de Biodiesel**. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E Blücher, 2006. p. 19-28.

VAN GERPEN, J.; KNOTHE, G. Produção de biodiesel. In: KNOTHE, G. (Org.); VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. **Manual de Biodiesel**. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E Blücher, 2006. p. 29-45.

VICENTE, G.; MARTÍNEZ, M.; ARACIL, J. Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. **Bioresource Technology**, n. 92, p. 297-305, 2004.

WATANABE, H. *et al.* Study of the effects on exhaust emissions in direct injection diesel engines: Effects of fuel injection system, distillation properties and cetane number. **JSAE Review**, v. 19, n. 1, p. 21-26, 1998.

WU, Z.; ZHU, Z.; HUANG, Z. An experimental study on the spray structure of oxygenated fuel using laser-based visualization and particle image velocimetry. **Fuel**, v. 85, n. 10/11, p. 1458-1464, 2006.

ANEXO A

PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS ÉSTERES COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO

Tabela A1 – Algumas especificações do éster etílico de óleo de girassol

Ensaio	Éster	Especificação Resolução 42	Especificação prEN 14214
Aspecto	LII	LII	LII
Densidade @ 20°C, kg.dm ⁻³	0,89	Anotar	0,860 – 0,890 (15°C)
Ponto de entupimento de filtro a frio, °C	-2	Obs 1	-----
Estabilidade à oxidação a 110°C, h	0,15	6 (mín)	6 (mín)
Viscosidade cinemática a 40°C, mm ² .s ⁻¹	4,50	Anotar	3,5 – 5,0
Índice de acidez, mg KOH.g ⁻¹	0,38	0,80 (máx)	0,50 (máx)
Temperatura, 90% do vol recuperado, °C	315	360 (máx)	360 (máx)
Teor de enxofre, % em massa	0,059	Anotar	0,01 (máx)
Ponto de fulgor, °C	120	100 (mín)	120 (mín)
Número de cetano (bbl)	51	Anotar	51 (mín)
Corrosividade na lâmina de cobre 3h a 50°C	1A	1 (máx)	1 (máx)
Glicerina total, % de massa	0,55	0,38 (máx)	0,25 (máx)
Poder calorífico inferior (est.) MJ.kg ⁻¹	39,2		
Tensão superficial @ 30°C (N.m ⁻¹)	0,028		

Obs: 1 – A mistura de óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para ponto de entupimento de filtro a frio, densidade e viscosidade cinemática @ 40°C, constantes na especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

Tabela A2 – Algumas especificações do éster etílico de sebo bovino

Ensaio	Éster	Especificação Resolução 42	Especificação prEN 14214
Aspecto	LII	LII	LII
Densidade @ 20°C, kg.dm ⁻³	0,87	Anotar	0,860 – 0,890 (15°C)
Ponto de entupimento de filtro a frio, °C	5	Obs 1	-----
Estabilidade à oxidação a 110°C, h	-	6 (mín)	6 (mín)
Viscosidade cinemática a 40°C, mm ² .s ⁻¹	4,70	Anotar	3,5 – 5,0
Índice de acidez, mg KOH.g ⁻¹	0,448	0,80 (máx)	0,50 (máx)
Temperatura, 90% do vol recuperado, °C	349	360 (máx)	360 (máx)
Teor de enxofre, % em massa	0,023	Anotar	0,01 (máx)
Ponto de fulgor, °C	144	100 (mín)	120 (mín)
Número de cetano (bbl)	58	Anotar	51 (mín)
Corrosividade na lâmina de cobre 3h a 50°C	1A	1 (máx)	1 (máx)
Glicerina total, % de massa	0,014	0,38 (máx)	0,25 (máx)
Poder calorífico inferior (est.) MJ.kg ⁻¹	40,5		
Tensão superficial @ 30°C (N.m ⁻¹)	0,030		

Obs: 1 – A mistura de óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para ponto de entupimento de filtro a frio, densidade e viscosidade cinemática @ 40°C, constantes na especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

Tabela A3 – Algumas especificações da mistura de ésteres

Ensaio	Éster	Especificação Resolução 42	Especificação prEN 14214
Aspecto	LII	LII	LII
Densidade @ 20°C, kg.dm ⁻³	0,88	Anotar	0,860 – 0,890 (15°C)
Ponto de entupimento de filtro a frio, °C	-	Obs 1	-----
Estabilidade à oxidação a 110°C, h	-	6 (mín)	6 (mín)
Viscosidade cinemática a 40°C, mm ² .s ⁻¹	> 4,7	Anotar	3,5 – 5,0
Índice de acidez, mg KOH.g ⁻¹	-	0,80 (máx)	0,50 (máx)
Temperatura, 90% do vol recuperado, °C	-	360 (máx)	360 (máx)
Teor de enxofre, % em massa	-	Anotar	0,01 (máx)
Ponto de fulgor, °C	-	100 (mín)	120 (mín)
Número de cetano	ND	Anotar	51 (mín)
Corrosividade na lâmina de cobre 3h a 50°C	-	1 (máx)	1 (máx)
Glicerina total, % de massa	-	0,38 (máx)	0,25 (máx)
Poder calorífico inferior (estimativa) MJ.kg ⁻¹	>39,7		
Tensão superficial @ 30°C (N.m ⁻¹)	ND		

Obs: 1 – A mistura de óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para ponto de entupimento de filtro a frio, densidade e viscosidade cinemática @ 40°C, constantes na especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

Tabela A4 – Algumas especificações do éster metílico de sebo bovino

Ensaio	Éster	Especificação Resolução 42	Especificação prEN 14214
Aspecto	LII	LII	LII
Densidade @ 20°C, kg.dm ⁻³	0,869	Anotar	0,860 – 0,890 (15°C)
Ponto de entupimento de filtro a frio, °C	-	Obs 1	-----
Estabilidade à oxidação a 110°C, h	-	6 (mín)	6 (mín)
Viscosidade cinemática a 40°C, mm ² .s ⁻¹	4,00	Anotar	3,5 – 5,0
Índice de acidez, mg KOH.g ⁻¹	-	0,80 (máx)	0,50 (máx)
Temperatura, 90% do vol recuperado, °C	-	360 (máx)	360 (máx)
Teor de enxofre, % em massa	0,023	Anotar	0,01 (máx)
Ponto de fulgor, °C	144	100 (mín)	120 (mín)
Número de cetano	60	Anotar	51 (mín)
Corrosividade na lâmina de cobre 3h a 50°C	-	1 (máx)	1 (máx)
Glicerina total, % de massa	0,149	0,38 (máx)	0,25 (máx)
Poder calorífico inferior MJ.kg ⁻¹	38,8		
Tensão superficial @ 30°C (N.m ⁻¹)	ND		

Obs: 1 – A mistura de óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para ponto de entupimento de filtro a frio, densidade e viscosidade cinemática @ 40°C, constantes na especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

Tabela A5 – Especificações técnicas para o óleo diesel

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES		MÉTODOS	
		TIPOS		ABNT	ASTM
		Interior (B)	Metropolitano (D) (1)		
APARÊNCIA					
Aspecto		Límpido, isento de impurezas		Visual (2)	
Cor ASTM, máx		3,0 (3)	3,0	NBR 14483	D 1500
COMPOSIÇÃO					
Enxofre total, máximo	% massa	0,35	0,20	- - NBR 14533	D 1522 D 2622 D 4294
VOLATILIDADE					
Destilação	° C			NBR 9619	D 86
50% vol., recup., máx.		245,0 – 310,0			
85% vol., recup., máx.		370,0	360,0		
Massa específica a 20 °C	kg/m ³	820 – 880	820 - 865	NBR 7148	D 1298
				NBR 14065	D 4052
				NBR 7974	D 56
Ponto de fulgor, mínimo	° C	38,0		NBR 14598	D 93
					D 3828
FLUIDEZ					
Viscosidade a 40°C	cSt (mm ² /s)	2,5 a 5,5		NBR 10441	D 445
Ponto de entupimento de filtro à frio	° C	(4)		NBR 14 747	D 6371
COMBUSTÃO					
Número de cetano, mín. (5)	-	42		-	D 613
Resíduo de carbono Ramsbottom no resíduo dos 10% finais da destilação, máximo.	% massa	0,25		NBR 14 318	D 524
Cinzas, máximo	% massa	0,020		NBR 9842	D 482
CORROSÃO					
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máximo	-	1		NBR 14359	D 130
CONTAMINANTES					
Água e sedimentos, máx.	% volume	0,05		NBR 14647	D 1796

* Adaptado de: Portarias n° 310 ANP, de 27/12/2001; n° 162 ANP de 11/09/2002 e n° 130 ANP de 13/08/2002.

Obs: Tensão superficial para o óleo diesel – 0,025 N.m⁻¹

- (1) O óleo diesel Metropolitano deverá ser obrigatoriamente comercializado nos municípios relacionados no Anexo I da PANP 310/2001, conforme determinação do Ministério do Meio Ambiente.
- (2) A visualização será realizada em proveta de vidro, conforme a utilizada no Método NBR 7148 ou ASTM D 1298.
- (3) As Refinarias, Centrais de Matérias-Primas Petroquímicas, Importadores e Formuladores de óleo diesel automotivo deverão atender às exigências referentes à adição de corante a partir de 01/01/2003.
- (4) Limites conforme Tabela II da PANP 310/2001.
- (5) Alternativamente ao ensaio de NC fica permitida a determinação do IC calculado pelo Método ASTM D 4737, com valor mínimo de 45. Em caso de desacordo de resultados prevalecerá o valor do Número de Cetano.

ANEXO B**VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE DOS ÉSTERES COM A TEMPERATURA.**

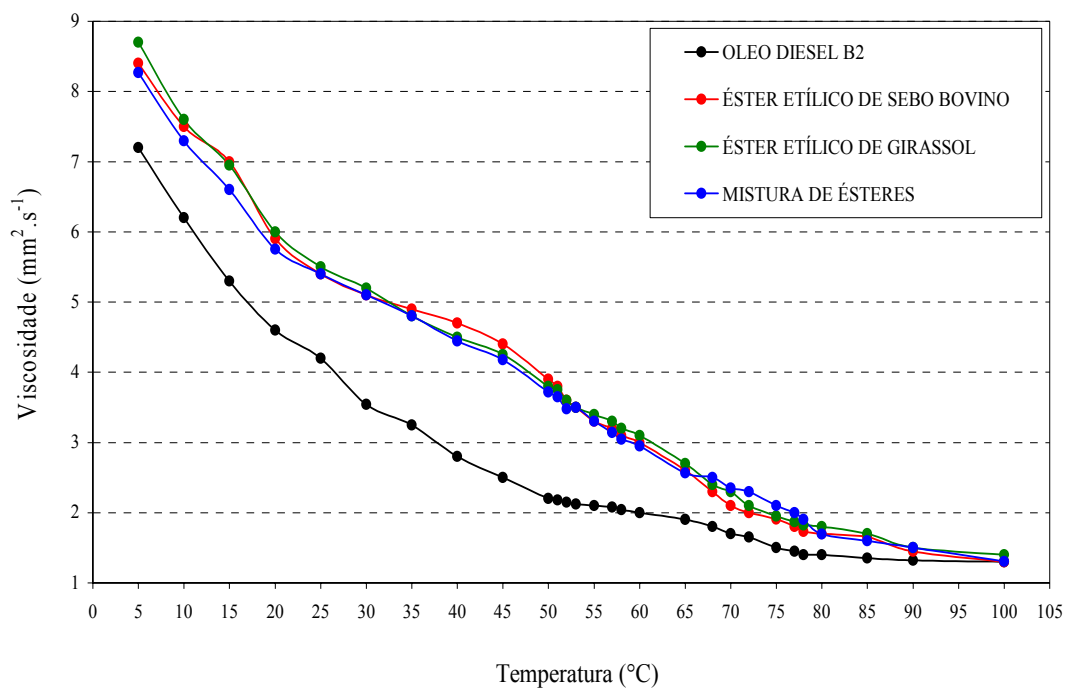


Figura B1 – Variação da viscosidade dos ésteres com a temperatura.