



**RONALD LEITE BARBOSA**

**ANÁLISE DE GASES DE COMBUSTÃO DE UM  
MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO  
UTILIZANDO BIODIESEL DE ÓLEO DE  
MACAÚBA**

**LAVRAS – MG**

**2016**

**RONALD LEITE BARBOSA**

**ANÁLISE DE GASES DE COMBUSTÃO DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO  
POR COMPRESSÃO UTILIZANDO BIODIESEL DE ÓLEO DE  
MACAÚBA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato

**LAVRAS - MG**

**2016**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha  
Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados  
informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Barbosa, Ronald Leite.

Análise de gases de combustão de um motor de ignição por  
compressão utilizando biodiesel de óleo de macaúba / Ronald Leite  
Barbosa. – Lavras: UFLA, 2016.

139 p.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador: Carlos Eduardo Silva Volpato.

Bibliografia.

1. Biodiesel. 2. Óleo de macaúba. 3. Emissões. 4. Desempenho. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**RONALD LEITE BARBOSA**

**ANÁLISE DE GASES DE COMBUSTÃO DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO  
POR COMPRESSÃO UTILIZANDO BIODIESEL DE ÓLEO DE  
MACAÚBA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 20 de abril de 2016.

Dr. Fábio Moreira da Silva          UFLA

Dr. Pedro Castro Neto                UFLA

Dr. Jackson Antônio Barbosa UFLA

Dr. Vanderson Rabelo de Paula      IF Sul de Minas

Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato

Orientador

**LAVRAS - MG**

**2016**

Aos meus pais, José Paulino Barbosa (*in memoriam*) e Marlene Leite Barbosa, pelo apoio, carinho, amor e dedicação.

Aos meus irmãos Fernando Antônio Leite Barbosa e Marcelo Leite Barbosa.

À minha amada Alexandra Aparecida de Oliveira, pelo apoio, carinho, amor e dedicação.

Aos meus tios Marcelo Furtado Leite(*in memoriam*), Celeste Leite(*in memoriam*), Orlando Furtado Leite (*in memoriam*), Maria do Carmo, João Baptista Leite, Antônio Furtado Leite, João Leonídio Barbosa(*in memoriam*) e Rosa Paulino Barbosa.

Ao grande amigo Dr. Sebastião Emílio Santiago, Médico Psiquiatra, que sempre me incentiva a nunca desistir dos meus sonhos e a quem, com todo esforço que fizer, não serei capaz de retribuir tudo de bom que já fez e tem feito por mim.

*DEDICO*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia, pelo apoio e pela oportunidade de realizar este curso.

Ao professor Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato, pela amizade, pela orientação e pelos valiosos ensinamentos.

Ao professor Dr. Fábio Moreira da Silva pela amizade e pelos valiosos ensinamentos.

Ao professor Dr. Pedro Castro Neto, pela amizade e pela valiosa colaboração na execução deste trabalho, cedendo, também, o biodiesel para o experimento.

Aos colegas do Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola Diego José Carvalho Alonso e Delorme Corrêa Júnior pela amizade e pela valiosíssima colaboração na elaboração deste trabalho.

Ao Cnpq, FAPEMIG, FINEP e Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel pela possibilidade de execução desse trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

## RESUMO

As características de combustão e de emissões de exaustão de um motor de ignição por compressão são afetadas pelas características do spray de combustível e de atomização como também pelas propriedades do combustível. O objetivo do trabalho foi avaliar as emissões de um motor de ciclo diesel ao se utilizar o biodiesel de óleo de macaúba com variadas misturas combustíveis em substituição ao óleo diesel mineral comercial metropolitano. O desempenho do motor também foi avaliado. Para os ensaios, um trator Valtra A950, motor AGCO Sisu Power 420DS, foi utilizado. Para a realização dos ensaios de emissões do motor, a norma NBR 14489 foi utilizada e para o desempenho do motor foi adotada a metodologia segundo a norma ABNT NBR ISO 1585. Os valores de opacidade foram menores quando se utilizou as diversas misturas combustíveis contendo biodiesel do que quando se utilizou o diesel mineral comercial. Os valores de HC foram mais baixos quando se utilizou a mistura contendo 20% de biodiesel e 80% de diesel B7, os valores de CO<sub>2</sub> foram mais altos e os valores de O<sub>2</sub> foram mais baixos quando se utilizou 100% de biodiesel. A potência do motor com o uso de biodiesel de óleo de macaúba em 100% ou, em misturas com diesel, foi inferior à potência apresentada com diesel mineral comercial, chegando a uma redução média de 18,4%. Os valores obtidos de torque, quando se utilizou diesel, foram, em média, 17,4% maiores do que quando se utilizou 100% de biodiesel. Atualmente no Brasil, de acordo com a legislação, o diesel mineral comercial é composto de 7% de biodiesel e 93% de diesel (B7).

Palavras-chave: Biodiesel. Óleo de macaúba. Emissões. Desempenho.

## ABSTRACT

The combustion and emission characteristics of a diesel engine are influenced by the fuel spray characteristics and by the atomization as well as by the fuel properties. The aim of this work was to evaluate the exhaust emissions of a diesel engine when fueled with macaw palm oil biodiesel and different proportions of blends of this biodiesel with metropolitan diesel fuel. The engine performance was evaluated too. For the tests, a Valtra A950 tractor with a AGCO Sisu Power 420DS diesel engine was used. For the emissions the ABNT NBR 14489 Standard was adopted and for the engine performance test the ABNT NBR ISO 1585 Standard was adopted. The opacity values were lower when using biodiesel blends than when diesel fuel. HC values were lower when using a blend of 20% of biodiesel and 80% of diesel fuel, CO<sub>2</sub> values were higher and O<sub>2</sub> values were lower when using 100% of biodiesel compared to the values when using diesel fuel. The engine power when fueled with macaw palm oil biodiesel blends was lower 18,4 % in average than when it was fueled with diesel fuel. The torque values were in average 17,4 % higher when the engine was fueled with diesel fuel in relation to when using biodiesel blends. In Brazil, nowadays, according to the law, metropolitan diesel fuel is composed of 7% of biodiesel and 93% of diesel fuel (B7).

Keywords: Biodiesel.Macaw palm oil.Exhaustemissions.Performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sistema de injeção de combustível controlada eletronicamente .....	22
Figura 2	Sistema de combustível diesel com bomba de injeção de combustível do tipo distribuidora com governador mecânico .....	24
Figura 3	Esquema de um spray de combustível diesel definindo seus principais parâmetros .....	25
Figura 4	Esquema de um spray de combustível injetado radialmente ao eixo da câmara dentro de um fluxo de ar turbulento.....	27
Figura 5	Reação de transesterificação.....	34
Figura 6	Palmeira Macaúba (Acrocomia aculeata (Jacq) Lodd ex Mart).....	70
Figura 7	Trator Valtra A950.....	89
Figura 8	Dinamômetro AW Dynamometer NEB 200 .....	89
Figura 9	Analisador Multigás Discovery G4 ALFATEST .....	90
Figura 10	Opacímetro Discovery OPA 495 ALFATEST.....	92
Figura 11	Viscosímetro Logen .....	95
Figura 12	Calorímetro adiabático Parr 1241 EA.....	95
Figura 13	Curvas de potência do motor do trator a plena carga para os combustíveis utilizados.....	107
Figura 14	Curvas de torque do motor do trator a plena carga, para os combustíveis utilizados.....	108
Figura 15	Opacidade média emitida pelo motor do trator sem carga, para os combustíveis utilizados .....	110
Figura 16	Níveis de HC emitidos pelo motor do trator de acordo com o ciclo de 13 pontos, para os combustíveis utilizados .....	113
Figura 17	Níveis de CO emitidos pelo motor do trator de acordo com o ciclo de 13 pontos, para os combustíveis utilizados .....	117
Figura 18	Níveis de CO <sub>2</sub> emitidos pelo motor do trator de acordo com o ciclo de 13 pontos, para os combustíveis utilizados .....	120
Figura 19	Níveis de O <sub>2</sub> emitidos pelo motor do trator de acordo com o ciclo de 13 pontos, para os combustíveis utilizados .....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Especificação do Biodiesel .....	51
Tabela 2	Características de algumas culturas oleaginosas .....	67
Tabela 3	Características dos óleos de macaúba .....	75
Tabela 4	Características dos ésteres etílicos e metílicos de macaúba.....	76
Tabela 5	Características Físico-Químicas dos combustíveis .....	98
Tabela 6	Ensaio dinamométrico do trator com motor a plena carga para os diferentes combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016.....	106
Tabela 7	Opacidade dos diferentes combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016.....	109
Tabela 8	Valores de HC (ppm) dos diversos combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016.....	112
Tabela 9	Valores de CO (%) dos diversos combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016.....	116
Tabela 10	Valores de CO <sub>2</sub> (%) dos diversos combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016.....	119
Tabela 11	Valores de O <sub>2</sub> (%) dos diversos combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016.....	122

## LISTA DE SÍMBOLOS

HC	hidrocarbonetos;
CO	óxido de carbono;
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono;
O <sub>2</sub>	oxigênio;
NO <sub>x</sub>	óxidos de nitrogênio;
B5	mistura formada por 5% de biodiesel e 95% de diesel;
B10	mistura formada por 10% de biodiesel e 90% de diesel;
B20	mistura formada por 20% de biodiesel e 80% de diesel;
B50	mistura formada por 50% de biodiesel e 50% de diesel;
B100	mistura formada por 100% de biodiesel;
SMD	diâmetro médio de Sauter;
ICO	motor de ignição por compressão;
Pa	pascal = 1N/m <sup>2</sup> ;
Qc	poder calorífico do combustível (kJ.kg <sup>-1</sup> );
q	consumo de combustível (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> );
me	massa específica do combustível (kg.m <sup>-3</sup> ).
A/F	relação ar combustível;
PCS	poder calorífico superior (kJ kg <sup>-1</sup> )
PCI	poder calorífico inferior (kJ kg <sup>-1</sup> )
W	umidade do combustível
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVO.....	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	Conceitos básicos:.....	17
3.1.1	Combustão e combustíveis.....	17
3.1.2	Sistema de Injeção de Combustível Diesel.....	19
3.1.2.1	Bombas de Injeção de Combustível tipo Distribuidor.....	23
3.1.3	Comportamento do spray do combustível.....	24
3.1.3.1	Estrutura geral do spray.....	24
3.1.3.2	Atomização:.....	28
3.1.3.3	Penetração do Spray.....	29
3.1.3.4	Distribuição do tamanho das gotículas:.....	30
3.1.3.5	Evaporação do spray:.....	31
3.1.4	O Biodiesel.....	33
3.1.4.1	Algumas propriedades do Biodiesel.....	38
3.1.4.1.1	Número de Cetano.....	38
3.1.4.1.2	Calor de Combustão.....	39
3.1.4.1.3	Viscosidade do biodiesel.....	40
3.1.4.1.4	Poder calorífico.....	42
3.1.4.1.5	Tensão superficial.....	43
3.1.5	Emissões de Exaustão dos motores de ignição por compressão.....	44
3.1.6	Caracterização do biodiesel conforme ANP.....	48
3.2 O	Estado da Arte do uso do biodiesel no Brasil.....	53
3.3	Fontes de biodiesel disponíveis.....	59
3.3.1	Características das principais oleaginosas utilizadas para a produção de biodiesel no Brasil.....	60
3.3.1.1	Mamona ( <i>Ricinus communis</i> L.).....	60
3.3.1.2	Soja ( <i>Glycine Max</i> L Merrill).....	62
3.3.1.3	Algodão ( <i>Gossypium hirsutum</i> L.r <i>latifolium</i> Hutch).....	64
3.3.1.4	Características gerais das principais oleaginosas.....	66
3.3.1.5	Seleção das fontes de biodiesel.....	67
3.4	A Macaúba.....	68
3.4.1	Composição do fruto da macaúba.....	71
3.4.2	Aproveitamento da macaúba: vantagens e desvantagens.....	72
3.4.2.1	Vantagens.....	73
3.4.2.2	Desvantagens.....	73
3.4.3	Características do óleo de macaúba.....	74

3.4.4	O biodiesel de óleo de macaúba .....	76
3.4.4.1	Características físico-químicas dos ésteres etílicos e metílicos do óleo de macaúba .....	76
3.5	Estudos experimentais realizados .....	77
3.5.1	Avaliação do desempenho e das emissões de biodiesel e misturas em motor de Ignição por Compressão para aplicação em geração de energia elétrica.....	77
3.5.2	Avaliação de emissões de poluentes de um motor de Ignição por Compressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível.....	78
3.5.3	Influência do uso do biodiesel em um motor Mercedes-Benz OM904 LA tanto no que se refere ao seu desempenho e emissão de poluentes.....	79
3.5.4	Uso de óleo de cozinha reciclado em um motor diesel de injeção direta em um trator .....	80
3.5.5	Desempenho e emissões de um motor diesel agrícola alimentado com misturas de diesel e ésteres metílicos diferentes .....	81
3.5.6	Efeitos das misturas de diesel fóssil e biodiesel no desempenho e nas emissões de motores de tratores agrícolas .....	82
3.5.7	Desempenho e emissões de um motor diesel de trator alimentado com diesel marítimo e éster metílico de soja .....	83
3.5.8	Análise do desempenho e das emissões do éster metílico de óleo de algodão em um motor diesel .....	84
3.5.9	Um teste em motor diesel ID alimentado com ésteres metílicos de óleo de dendê usado .....	86
4	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	88
4.1	<b>Material</b> .....	88
4.1.1	<b>Trator</b> .....	88
4.1.2	<b>Dinamômetro</b> .....	89
4.1.3	<b>Analisador de gases</b> .....	90
4.1.4	<b>Opacímetro</b> .....	91
4.1.5	<b>Combustíveis</b> .....	94
4.2	<b>Métodos</b> .....	96
4.2.1	<b>Determinação das características físico-químicas dos combustíveis analisados</b> .....	97
4.2.2	<b>Determinação da Potência Efetiva do Motor</b> .....	99
4.2.3	<b>Emissão de Gases</b> .....	100
4.2.3.1	<b>Determinação dos Níveis de Emissão de Gases</b> .....	100
4.2.3.2	<b>Determinação da Opacidade</b> .....	101
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	105
5.1	<b>Desempenho do motor</b> .....	105

<b>5.2</b>	<b>Emissões do motor</b> .....	108
<b>5.2.1</b>	<b>Opacidade</b> .....	108
<b>5.2.2</b>	<b>Níveis de HC</b> .....	110
<b>5.2.3</b>	<b>Níveis de CO</b> .....	113
<b>5.2.4</b>	<b>Níveis de CO<sub>2</sub></b> .....	117
<b>5.2.5</b>	<b>Níveis de O<sub>2</sub></b> .....	120
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	124
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	126
	<b>APÊNDICE</b> .....	138

## 1 INTRODUÇÃO

A crise do petróleo nos anos 70 do século XX fez com que vários países do mundo pesquisassem por fontes alternativas de energia. Devido a essa crise, o Brasil, nos anos 80 do século passado, criou o Pró-álcool e outros programas em que se priorizava o uso de combustíveis renováveis tais como óleos vegetais, gasogênio, gás natural, biogás, etc.

. O biodiesel, um combustível elaborado a partir de fontes como os óleos vegetais, as gorduras animais e os óleos usados de frituras, tem se destacado com grande potencial para ser o substituto do óleo diesel mineral.

São relevantes alguns aspectos do biodiesel em relação aos combustíveis oriundos do petróleo, principalmente o fato de ser livre de enxofre e de compostos aromáticos; de propiciar alto número de cetano; de conter um teor médio de oxigênio; de apresentar maior ponto de fulgor; de emitir menor nível de partículas, HC, CO e de CO<sub>2</sub>; ter caráter não tóxico e biodegradável, além de ser oriundo de fontes renováveis, sendo capaz de estabelecer um ciclo fechado de carbono onde o CO<sub>2</sub> é absorvido durante o período de crescimento da planta e de ser liberado durante os instantes em que é queimado na combustão do motor. De acordo com pesquisas elaboradas pelos Departamentos de Energia e de Agricultura dos Estados Unidos, o biodiesel pode reduzir em até 78% as emissões de CO<sub>2</sub> (D'ARCE, 2005).

A produção e o uso do biodiesel no Brasil propiciam o desenvolvimento de uma fonte energética sustentável sob os aspectos ambiental, econômico e social e também trazem a perspectiva da redução das importações de óleo diesel. Além disso, o biodiesel traz outros efeitos indiretos de sua produção e uso, como o incremento a economias locais e regionais, tanto na etapa agrícola como na indústria de bens e serviços. Com a ampliação do mercado do biodiesel, milhares de famílias brasileiras serão beneficiadas com o

aumento de renda proveniente do cultivo e comercialização das plantas oleaginosas utilizadas na produção do biodiesel. A produção de biodiesel já gerou cerca de 600 mil postos de trabalho no campo, de acordo com dados do Ministério do Desenvolvimento Agrário. Outro benefício para a sociedade, resultante da ampliação do uso do biodiesel, é o efeito positivo sobre o meio ambiente, acarretando a diminuição das principais emissões veiculares em comparação ao diesel derivado de petróleo (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS - ANP, 2010).

O presente trabalho teve como objetivo analisar os gases de combustão e os parâmetros de desempenho de um motor de ignição por compressão quando utilizando misturas de biodiesel de óleo de macaúba e diesel mineral em momentos distintos. Os ensaios foram executados de acordo com a norma ABNT NBR 14489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2000) e com a norma ABNT NBR ISO 1585 (ABNT, 1996).

Os experimentos foram conduzidos utilizando-se um motor modelo AGCO Sisu Power 420DS, potência máxima de 90 cv (66,2 kW) a 2200 rpm, torque máximo de 330 Nm a 1400 rpm (norma ISO 1585), cilindrada total de 4400 cm<sup>3</sup>, 4 cilindros, turbo aspirado, sistema de injeção com bomba rotativa, injeção direta de um trator marca Valtra, modelo A950.

Os principais tópicos constantes desse trabalho são: Comportamento do spray do combustível, O Biodiesel e suas principais propriedades e características, Emissões de exaustão dos motores de ignição por compressão, O Estado da Arte do biodiesel no Brasil, Características das principais oleaginosas para a produção de biodiesel no Brasil, A Macaúba e suas principais características, O biodiesel de óleo de macaúba e Estudos experimentais já realizados.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho teve por objetivo avaliar os gases de combustão de um motor de ciclo diesel, utilizando como combustível o biodiesel de óleo de macaúba em substituição ao óleo diesel.

### **2.2 Objetivos específicos**

Especificamente, foram analisados os níveis dos gases de combustão e também os parâmetros de desempenho do motor, sendo executado:

- a) análise dos resultados das medições dos níveis dos gases de combustão (HC, CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>) e dos materiais particulados;
- b) levantamento dos parâmetros de desempenho do motor.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Conceitos básicos:**

##### **3.1.1 Combustão e combustíveis**

A combustão consiste na combinação química do oxigênio do ar com o carbono e o hidrogênio do combustível, havendo liberação de calor e resultando em aumento da pressão. Durante o curso de expansão de um pistão é quando tem lugar uma variação de volume e se realiza o trabalho (BARGER et al., 1983).

Para que ocorra a combustão no interior dos cilindros dos motores, de forma a satisfazer certas condições básicas de funcionamento dessas máquinas, os seguintes requisitos devem ser preenchidos (MIALHE, 1980):

- a) disponibilidade de oxigênio, fornecido pelo ar admitido nos cilindros e de um combustível, representado comumente por uma mistura de hidrocarbonetos;
- b) que a proporção entre a quantidade de ar e de combustível se encontre dentro de certos limites;
- c) que se atinja uma temperatura suficiente, para que a mistura ar mais combustível entre em ignição e desenvolva-se a combustão;
- d) que a velocidade de propagação da combustão determine tempos de ocorrência do fenômeno compatíveis com o intervalo de duração dos tempos do ciclo de funcionamento do motor

A combustão da mistura ar-combustível dentro do cilindro do motor é um dos processos que controla a potência do motor, a eficiência e as emissões. No motor diesel, o combustível é injetado para dentro do cilindro no ar já em

alta temperatura e em alta pressão, próximo do fim do tempo de compressão. A autoignição das porções de misturas de combustíveis já injetadas e vaporizadas com esse ar quente faz com que se inicie o processo de combustão, que se espalha rapidamente. A queima prossegue enquanto o combustível e o ar se misturam em uma composição apropriada para a combustão acontecer. Desta maneira, a mistura ar- combustível exerce um papel de controle no processo de combustão diesel (HEYWOOD,1988).

Combustível é a denominação dada a toda substância cuja reação de oxidação é altamente exotérmica, isto é, sua reação com o oxigênio gera grande desprendimento de calor. Os combustíveis podem apresentar-se na fase sólida, líquida ou gasosa. Os combustíveis são caracterizados pelas suas propriedades físico-químicas e são encontrados na forma natural ou artificial. Petróleo e carvão fóssil são exemplos de combustíveis naturais. Derivados de petróleo, coque e carvão vegetal são exemplos de combustíveis naturais. Por outro lado, toda substância que, ao combinar-se com outra, der lugar à combustão, recebe a denominação de comburente. O oxigênio é, portanto, comburente, e não combustível (BARGER et al., 1983; MOREIRA, 2006).

Os combustíveis recebem também a denominação de hidrocarbonetos por constituírem-se de substâncias formadas de carbono (C) e hidrogênio (H). Mialhe (1980) classifica os combustíveis, de acordo com sua origem, em:

- a) vegetais, de madeira (lenha): resíduos vegetais, carvão vegetal (na forma sólida ou por gases provenientes de sua queima), metanol;
- b) minerais: de carvão mineral, petróleo e seus derivados (também denominados “combustíveis fósseis”);
- c) bioquímicos: álcool etílico (obtido por fermentação alcoólica e posterior destilação), gás metano (obtido por fermentação anaeróbica de esterco e resíduos vegetais) e biodiesel (obtido pela transesterificação de óleos vegetais, gorduras animais, etc.).

### 3.1.2 Sistema de Injeção de Combustível Diesel

As características de combustão e de emissões de exaustão de um motor diesel são afetadas pelo spray de combustível e pelas características de atomização, bem como pelas propriedades do combustível.

O combustível líquido, normalmente injetado em alta velocidade em um ou mais jatos através de pequenos orifícios na ponta do bico injetor, atomiza-se em pequenas gotas e penetra na câmara de combustão. O combustível vaporiza-se e mistura com o ar do cilindro em alta pressão e alta temperatura. Como a temperatura e a pressão do ar estão acima do ponto de ignição do combustível, a ignição espontânea do combustível já misturado e do ar ocorrem depois de um período de atraso de poucos graus do ângulo do eixo virabrequim, isto é, um tempo mensurável entre o início da injeção e a aparição de uma chama ou um aumento de pressão mensurável devido à combustão. A pressão do cilindro aumenta enquanto a combustão da mistura ar-combustível ocorre. A consequente compressão da porção não queimada da carga diminui o atraso antes da ignição para o combustível e o ar que foram misturados dentro dos limites combustíveis, que então queima rapidamente. Isto também reduz o tempo de evaporação do combustível líquido remanescente. A injeção continua até que quantidade desejável do combustível tenha entrado no cilindro. A atomização, a vaporização, a mistura ar-combustível e a combustão continuam até que todo o combustível tenha passado por cada processo. Além do mais, a mistura de ar remanescente no cilindro com queima e gases já queimados continua através dos processos de combustão e expansão (HEYWOOD, 1988; TAYLOR, 1971).

A experiência mostra que os motores de Ignição por Compressão podem ser operados com combustão muito rápida, isto é, aproximando-se da combustão a volume constante. Esse resultado é obtido quando o período de atraso é longo o bastante para que a maior parte do combustível injetado seja misturada e

evaporada antes de ocorrer a combustão. Entretanto, tal operação é indesejável devido às altas pressões máximas resultantes e altas razões de elevação de pressão. Desta forma, na operação prática dos motores de Ignição por Compressão, o combustível, o sistema de injeção e as condições de operação são escolhidas de forma a limitar as razões de elevação de pressão e as pressões máximas em valores bem abaixo do máximo atingível (TAYLOR, 1971).

Problemas com a utilização de ar durante a combustão levam à formação de quantidades excessivas de fuligem, que não podem ser queimadas até antes da exaustão. Essa fuligem excessiva ou fumaça preta na exaustão restringe a taxa combustível/ar em uma potência máxima do motor em valores de 20 por cento (ou mais pobre) da mistura estequiométrica. Daí, a pressão efetiva média indicada máxima (em um motor naturalmente aspirado) é mais baixa do que os valores para um motor de ignição por centelha equivalente (PEZZANO; KLEIN, 1964).

O combustível é introduzido dentro do cilindro de um motor de Ignição por Compressão através de um bico injetor com uma pressão diferencial grande através de um orifício do bico injetor. Os bicos injetores são válvulas de agulha controladoras do fluído, onde a agulha é forçada contra o assento da válvula por uma mola. A pressão do combustível na câmara de pressão acima da abertura do bico injetor abre o bico injetor pela força axial que ela exerce sobre a superfície cônica da agulha do bico injetor. As válvulas de agulha são usadas para impedir o gotejamento dos bicos injetores quando a injeção não estiver ocorrendo. É importante manter o volume de combustível deixado entre a agulha e os orifícios do bico injetor (“*thesac volume*” = volume residual ou morto) o menor possível para impedir que qualquer combustível flua para dentro do cilindro depois que a injeção cessar, isso para controlar as emissões de hidrocarbonetos. Bicos injetores de vários orifícios são usados mais em sistemas de injeção direta. Bicos injetores “*pintle*”, onde a agulha projeta para dentro e através do orifício do bico

injetor, são usados em sistemas de injeção indireta. A forma do alfinete no fim da agulha do bico injetor controla o padrão do spray e as características de entrega do combustível. Orifícios auxiliares no bico injetor são algumas vezes usados para produzir um spray auxiliar menor para ajudar a ignição e a partida. Orifícios abertos do bico injetor, sem uma agulha, são também usados (HEYWOOD, 1988).

Em um injetor eletrônico (Figura 1), uma válvula de controle operada por um solenóide controla o tempo de injeção e as funções de medição em uma forma similar às portas e hélices do injetor mecânico. O fechamento da válvula solenóide inicia a pressurização e a injeção, e a abertura causa uma queda da pressão de injeção e o fim da injeção. A duração do fechamento da válvula determina a quantidade de combustível injetado. A unidade mostrada usa êmbolos acionados pelo virabrequim / biela para gerar a pressão de injeção, e emprega bicos injetores de válvula de agulha de desenho convencional.

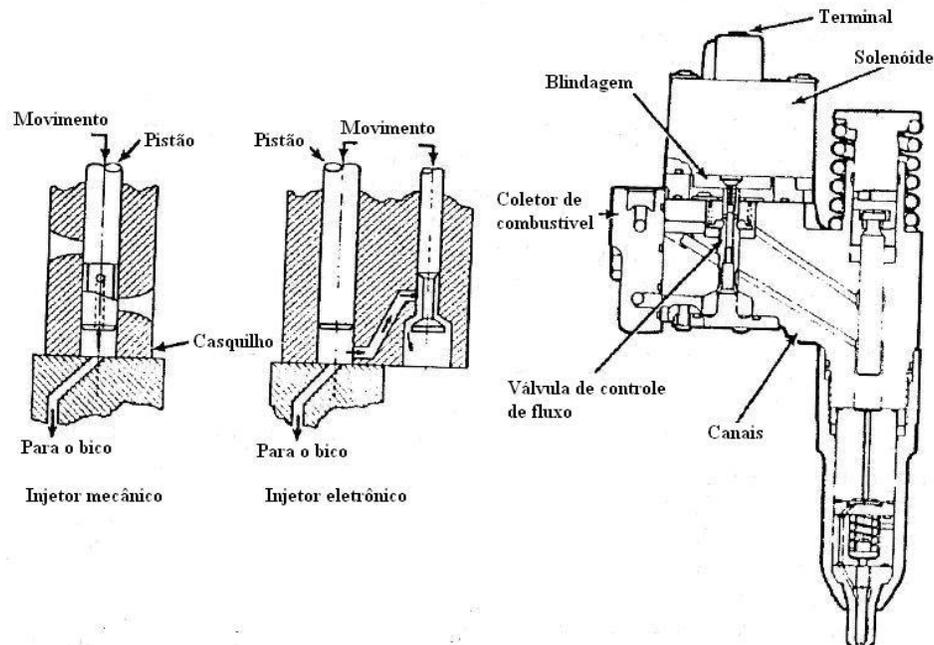


Figura 1 Sistema de injeção de combustível controlada eletronicamente  
 Fonte: Heywood (1988)

Previsões precisas do comportamento do combustível dentro do sistema de injeção requerem modelos hidráulicos sofisticados. Estimativas aproximadas da taxa de injeção através dos bicos injetores do sistema de injeção podem ser feitas. Se a pressão acima do bico injetor do sistema de injeção pode ser estimada ou medida, e assumindo que o fluxo através de cada bico injetor é quasi-estático, incompressível e unidimensional, a taxa do fluxo de massa do combustível injetado através do bico injetor  $m_f$  é dada por (HEYWOOD, 1988):

$$m_f = C_p \cdot A_n \cdot (2\rho_f \Delta p)^{1/2} \quad (1)$$

onde  $A_n$  é a área mínima do bico injetor,  $C_p$  o coeficiente de descarga,  $\rho_f$  a massa específica do combustível, e  $\Delta p$  a queda de pressão através do bico injetor. Se a queda de pressão através do bico injetor e a área de abertura do bico

injetor são constantes durante o período de injeção, a massa do combustível injetada é então:

$$m_f = C_p \cdot A_n \cdot (2\rho_f \Delta p)^{1/2} \cdot (\Delta\theta/360N) \quad (2)$$

onde:

$\Delta\theta$  é o período de abertura do bico injetor em graus do ângulo do eixo e  $N$  é a velocidade do motor (HEYWOOD, 1988).

### 3.1.2.1 Bombas de Injeção de Combustível tipo Distribuidor

As bombas tipo distribuidor têm somente um êmbolo de bomba e uma vareta (cano), que mede e distribui o combustível para todos os bicos injetores. Um esquema de uma bomba tipo-distribuidor é mostrado na Figura 2. A unidade contém uma bomba de combustível de pressão baixa (na esquerda), uma bomba de pressão alta (na direita), um governador de velocidade, e um temporizador de injeção. A alta pressão é gerada pelo êmbolo que é feito para descrever uma rotação combinada e o movimento de tempo ao se rodar o disco excêntrico ou o prato do eixo de comando; o movimento de rotação distribui o combustível para os bicos de injeção individualmente. A bomba de êmbolo é feita para descrever um movimento de tempo e rotação combinados pela rotação do prato do eixo. O combustível é exatamente medido para cada bico injetor por vez pelo êmbolo que age simultaneamente com o distribuidor. A bomba de injeção de combustível tipo distribuidor é combinada com o aparelho de tempo automático, governador e bomba de fornecimento para formar uma unidade única (HEYWOOD, 1988).

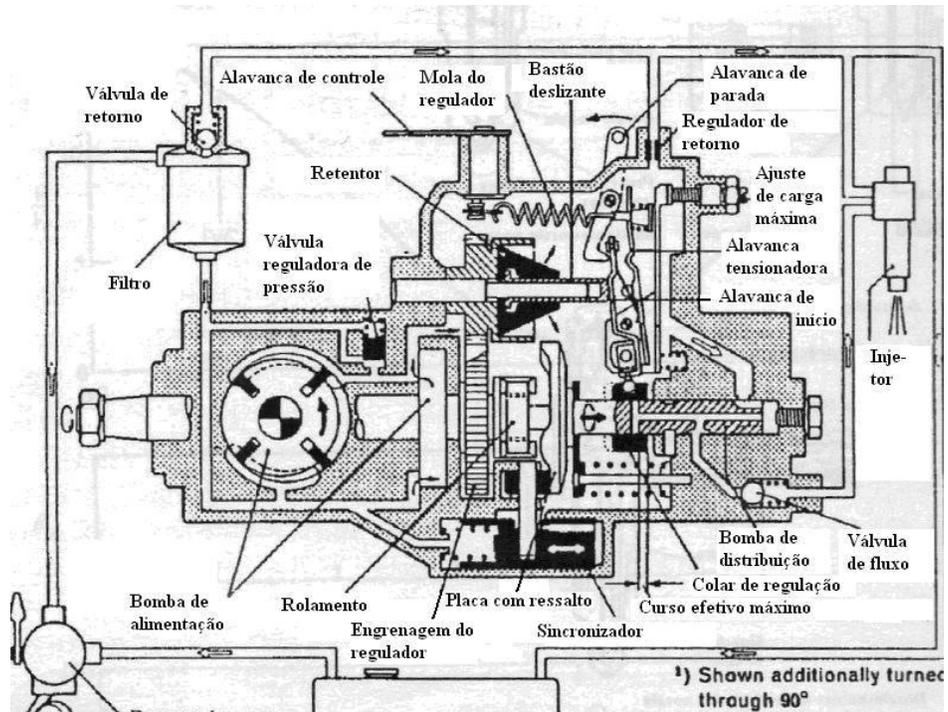


Figura 2 Sistema de combustível diesel com bomba de injeção de combustível do tipo distribuidora com governador mecânico  
 Fonte: Heywood (1988)

### 3.1.3 Comportamento do spray do combustível

#### 3.1.3.1 Estrutura geral do spray

Injetores diesel padrão normalmente operam com pressões de injeção de combustível entre 20 e 170 MPa. No tempo da injeção, o ar no cilindro tem uma pressão de 5 a 10 MPa, temperatura em torno de 730° C e massa específica entre 15 e 25  $\text{Kg.m}^{-3}$ . Os diâmetros dos bicos injetores cobrem a faixa de 0,2 a 1,0 mm, com razões de comprimento/diâmetro de 2 a 8. A Figura 3 ilustra a estrutura de um spray de combustível diesel. Quando o jato líquido deixa o bico

injetor, ele torna-se turbulento e se espalha quando ele entra e mistura com o ar dos arredores. A velocidade inicial do jato é maior que  $10^2 \text{ m.s}^{-1}$ . A superfície mais externa do jato dispersa-se em gotas da ordem de  $10 \mu\text{m}$  de diâmetro, próximo à saída do bico injetor. A coluna de líquido saindo do bico injetor desintegra-se dentro do cilindro cobrindo um comprimento finito, chamado de comprimento de desintegração (*breakuplength*), em gotas de diferentes tamanhos. Quando uma coluna de líquido se move para longe do bico injetor, a massa de ar dentro do spray aumenta, o spray diverge, sua largura aumenta e a velocidade diminui. As gotas de combustível se evaporam enquanto esse processo de entrada acontece. A ponta do spray penetra mais adiante para dentro da câmara enquanto a injeção se processa, mas a uma taxa decrescente(HEYWOOD, 1988).

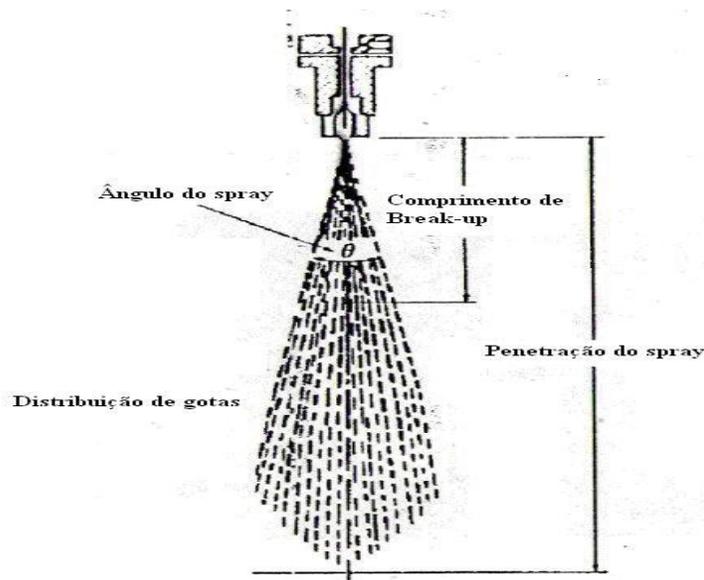


Figura 3 Esquema de um spray de combustível diesel definindo seus principais parâmetros

Fonte: Heywood (1988)

A configuração mais simples de spray envolve sprays múltiplos injetados no ar estacionário em motores de Ignição por Compressão de tamanhos maiores. Cada jato de combustível líquido atomiza-se em gotas e ligamentos na saída do orifício do bico injetor. O spray entra no ar, espalha-se, e diminui quando o fluxo de massa no spray aumenta. As gotículas na borda mais externa do spray evaporam-se primeiro, criando uma bainha de mistura ar-vapor de combustível ao redor do núcleo contendo líquido. As velocidades mais altas estão no eixo dos jatos. A razão de equivalência é mais alta na linha de centro (e combustível rico ao longo da maior parte do jato), diminuindo para zero (ar não misturado) na fronteira do spray. Uma vez que os sprays tenham penetrado para as regiões externas da câmara de combustão, eles interagem com as paredes da câmara. O spray é então forçado a fluir tangencialmente ao longo da parede. Eventualmente, os sprays de bicos injetores de múltiplos orifícios interagem uns com os outros. O spray que atinge a parede do cilindro divide-se com aproximadamente metade fluindo circunferencialmente em qualquer uma das direções. Os sprays adjacentes então forçam o fluxo radialmente para dentro em direção ao eixo da câmara (HEYWOOD, 1988).

Nos sistemas de combustão que usam ar turbulento para aumentar as taxas de misturas ar-combustível, um esquema de spray padrão resulta quando um jato de combustível é injetado radialmente para dentro de um fluxo turbulento. Pelo fato de não existir um movimento relativo em ambas direções radial e tangencial entre o jato inicial e o ar, a estrutura do jato é mais complexa. Quando o spray entra no ar e diminui a velocidade, ele torna-se deformado em direção à direção turbulenta; para as mesmas condições de injeção, ele irá penetrar menos com turbulência que sem turbulência. Uma importante característica do spray é a maior região contendo vapor abaixo do núcleo contendo líquido, conforme mostrado na Figura 4.

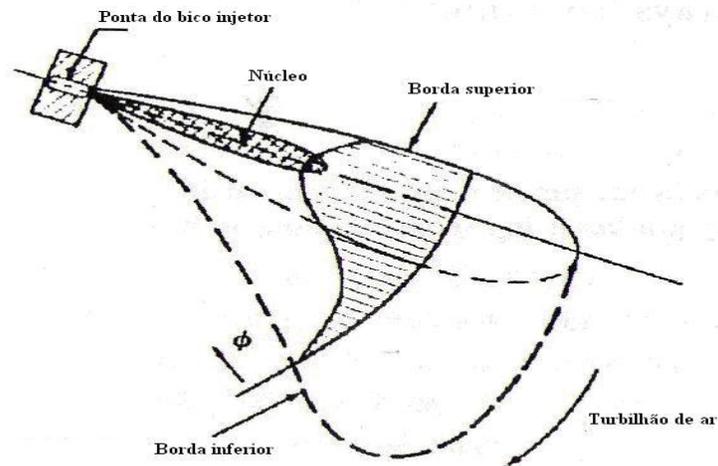


Figura 4 Esquema de um spray de combustível injetado radialmente ao eixo da câmara dentro de um fluxo de ar turbulento  
 Fonte: Heywood (1988).

Outros padrões de fluxo de spray são usados. O spray pode entrar no fluxo de ar girante tangencialmente. O spray então interage imediatamente com as paredes da câmara de combustão.

Para interagir o processo de desenvolvimento do spray com a fase de combustão, é importante saber quais regiões do spray contém o combustível injetado no início do processo de injeção. Essas regiões dos sprays são provavelmente as primeiras a autoignitar. Cada spray desenvolve-se na seguinte sequência: - no início da injeção, o combustível líquido entra na carga de ar estacionária, atomiza-se, move-se para longe do bico injetor, e diminui a velocidade rapidamente quando o ar entra no spray e é acelerado. Esse processo de partida forma um vórtice ou “sopro” na cabeça do spray. O combustível injetado que segue encontra menos resistência; assim gotas daquele combustível ultrapassam as gotas do combustível que foi primeiramente injetado, forçando-as para fora em direção à periferia do spray. Na ponta do spray não-permanente, as

gotas encontram a mais alta resistência aerodinâmica e diminuem de velocidade, mas o spray continua a penetrar a carga de ar porque as gotículas desaceleradas na ponta são continuamente substituídas pelas novas gotas que foram injetadas mais tarde e que têm momento mais alto. Conseqüentemente, gotículas na periferia do spray e atrás da ponta do spray vem do combustível injetado mais cedo (HEYWOOD, 1988).

### **3.1.3.2 Atomização:**

Sob condições de injeção do motor de ignição por compressão, o jato de combustível normalmente forma um spray no formato de um cone na saída do bico injetor, comportamento classificado como regime de ruptura de atomização (*atomizationbreakup regime*), produzindo gotículas com tamanhos muito menores que o diâmetro de saída do bico injetor. Esse comportamento é diferente de outros modelos de ruptura de jato líquido. Em baixa velocidade de jato, a ruptura é devido ao crescimento instável das ondas de superfície causadas pela tensão superficial e resulta em gotas maiores que o diâmetro do jato. Quando a velocidade do jato é aumentada, forças devido ao movimento relativo e o ar ao redor aumentam a força da tensão de superfície e levam a tamanhos de gota da ordem do diâmetro do jato. Isso é chamado de primeiro regime de ruptura induzido pelo escoamento de ar (*firstwind-inducedbreakup regime*). Um aumento na velocidade do jato mais adiante resulta em uma ruptura caracterizada pela divergência do spray do jato após um comprimento intacto e não perturbado abaixo do bico injetor. Nesse segundo regime de ruptura induzido pelo escoamento de ar (*secondwind-inducedbreakup regime*), o crescimento instável de ondas de curto comprimento de onda induzidas pelo movimento relativo entre o líquido e o ar ao redor produz gotículas cujo tamanho médio é muito menor que o diâmetro do jato. Um aumento na

velocidade do jato mais a frente leva a uma ruptura no regime de atomização, onde a ruptura da superfície mais externa do jato ocorre no plano de saída do bico injetor (ou antes) e resulta em gotículas cujo diâmetro médio é muito menor que o diâmetro do bico injetor. Interações aerodinâmicas na interface líquido/gás parecem ser um componente maior do mecanismo de atomização nesse regime (HEYWOOD, 1988).

A razão de massa específica gás/líquido e a geometria do bico injetor afetam o ângulo de espalhamento do jato inicial. Para uma dada geometria (ex.: furo cilíndrico e razão comprimento/diâmetro = 4), o espalhamento do jato inicial ou ângulo do spray aumenta com o aumento da razão de massa específica gás/líquido. Razões de massas específicas típicas para condições de injeção diesel estão entre  $15 \times 10^{-3}$  e  $30 \times 10^{-3}$ .

### **3.1.3.3 Penetração do Spray**

A velocidade e a extensão em que o spray de combustível penetra na câmara de combustão tem uma importante influência na utilização do ar e nas taxas de mistura ar-combustível. Em alguns projetos de motores, onde as paredes são quentes e a alta turbulência do ar está presente, a incidência do combustível em direção às paredes é desejada. Entretanto, nos sistemas de combustão diesel ID multi-spray, a penetração mais profunda (*overpenetration*) faz com que a incidência do combustível líquido nas superfícies que, especialmente com pouca ou nenhuma turbulência do ar, diminua as taxas de mistura e aumente as emissões de espécies queimadas parcialmente e espécies não queimadas. Já a penetração mais rasa (*underpenetration*) resulta em utilização pobre do ar, já que o ar na periferia da câmara não entra em contato com o combustível (HEYWOOD, 1988).

### 3.1.3.4 Distribuição do tamanho das gotículas:

A atomização do combustível líquido em um grande número de pequenas gotas é necessário para criar uma grande área superficial dentro da qual o combustível líquido possa evaporar. A distribuição do tamanho da gota no spray de combustível depende dos parâmetros de injeção e das propriedades do combustível e do ar.

Durante o período de injeção, as condições de injeção tais como pressão de injeção, área do orifício do bico injetor e taxa de injeção podem variar. Conseqüentemente, a distribuição do tamanho da gotícula em uma dada localização no spray pode também mudar com o tempo, durante o período de injeção. Além do mais, já que os detalhes do processo de atomização são diferentes no núcleo do spray e na borda do spray e as trajetórias das gotas individuais dependem do tamanho delas mesmas, da velocidade inicial e da localização dentro do spray, a distribuição do tamanho da gota irá variar com a posição dentro do spray (HEYWOOD, 1988).

Para caracterizar o spray, expressões para distribuição do tamanho da gota e diâmetro médio são desejáveis. Um diâmetro médio apropriado e comumente usado é o “Diâmetro Médio de Sauter”:

$$D_{MS} = (\int D_d^3 \cdot d_n) / (\int D_d^2 \cdot d_n) \quad (3)$$

Onde  $d_n$  é o número de gotas com diâmetro  $D_d$  na faixa  $D_d - dD_d/2 < D_d < D_d + dD_d/2$ .

A integração é normalmente executada somando-se um número apropriado de grupos de tamanho de gota. O Diâmetro Médio de Sauter é o

diâmetro da gotícula que tem a mesma relação superfície/volume que o spray total.

Uma expressão empírica para o Diâmetro Médio de Sauter DMS (em micrometro) para as propriedades de combustível diesel típicas é (HEYWOOD, 1988):

$$D_{MS} = A(\Delta p)^{-0,135} \cdot \rho_a^{0,121} \cdot V_f^{0,131} \quad (4)$$

Onde  $\Delta p$  é a queda de pressão média no bico injetor em megapascal,  $\rho_a$  é a massa específica do ar em quilograma por metro cúbico e  $V_f$  é a quantidade de combustível entregue por ciclo por cilindro em milímetros cúbicos por tempo do motor. A é uma constante que é igual a 25,1 para bicos injetores “*pintle*”, 23,9 para bicos injetores de orifícios e 22,4 para bicos injetores “*throttlingpintle*” (HEYWOOD, 1988).

### 3.1.3.5 Evaporação do spray:

O combustível líquido injetado, atomizado em pequenas gotas próximo da saída do bico injetor para formar um spray, tem que evaporar antes que ele possa se misturar com o ar e queimar. Existe um núcleo ao longo do eixo do spray onde os ligamentos do combustível líquido ou as gotas são suficientemente densas para atenuar o fecho de luz em condições típicas de um grande motor de injeção direta. Uma vez que a fase de inicialização (*start-up*) do processo de injeção esteja terminado, o comprimento desse núcleo permanece constante até que a injeção termine. Esse núcleo é envolvido por uma região muito maior do spray contendo vapor que continua a penetrar mais profundamente para dentro da câmara de combustão: o núcleo se estende somente parcialmente para a ponta do spray (Figura 10) (HEYWOOD, 1988).

No processo de evaporação de gotas, uma gota líquida em temperatura próxima da temperatura ambiente é injetada no ar nas condições típicas do final da compressão do motor. Três fenômenos determinarão a natureza da gota sob essas condições:

- a) desaceleração da gota devido ao arrasto aerodinâmico;
- b) transferência de calor do ar para a gota;
- c) transferência de massa de combustível vaporizado distante da gota.

Como a temperatura da gotícula aumenta devido a transferência de calor, a pressão de vapor do combustível aumenta e a taxa de evaporação aumenta. Como a taxa de transferência de massa do vapor distante da gota aumenta, assim a fração do calor transferida para a superfície da gota que está disponível para aumentar mais adiante faz com que a temperatura da gota diminua. Como a velocidade da gota diminui, o coeficiente de transferência de calor convectivo entre o ar e a gota diminui.

No núcleo do spray, onde as densidades do número de gotas são altas, o processo de evaporação tem um significativo efeito na temperatura e na concentração de vapor combustível-vapor no ar dentro do spray. Como o combustível vaporiza, a temperatura do ar local diminuirá e a pressão de vapor do combustível local irá aumentar.

Estudos fenomenológicos e computacionais indicam que, sob condições de motores diesel normais, 70 a 95 por cento do combustível injetado está na fase vapor no início da combustão. A evaporação está mais que 90 por cento completa após 1ms. Entretanto, somente 10 a 35 por cento do combustível vaporizado foi misturado para dentro dos limites de flamabilidade em um motor diesel de injeção direta de média velocidade. Assim, a combustão é grandemente limitada pela mistura, mais do que pela evaporação. Sob condições de partida a frio, a evaporação se torna uma restrição maior (HEYWOOD, 1988).

### 3.1.4 O Biodiesel

Os componentes que se encontram em maior quantidade nos óleos vegetais e nas gorduras animais são os triacilglicerídeos (frequentemente chamados de triglicerídeos). Quimicamente, os triacilglicerídeos são ésters de ácidos graxos com glicerol (glicerol é frequentemente chamado de glicerina). Os triacilglicerídeos de óleos vegetais e de gorduras animais contém diferentes ácidos graxos. Assim, diferentes ácidos graxos podem ser ligados a uma cadeia de glicerol. Os diferentes ácidos graxos que estão contidos nos triacilglicerídeos constituem os perfis dos ácidos graxos (ou composição dos ácidos graxos) dos óleos vegetais ou gorduras animais. Pelo fato dos diferentes ácidos graxos terem diferentes propriedades físicas e químicas, o perfil do ácido graxo é provavelmente o parâmetro que mais tem influencia em relação às propriedades de um óleo vegetal ou de uma gordura animal.

Para se obter biodiesel, o óleo vegetal ou a gordura animal é submetida a uma reação química conhecida como transesterificação, onde o óleo vegetal ou a gordura animal reage, na presença de um catalisador (normalmente uma base), com um álcool para formar os correspondentes éstersalquílicos (para o metanol, os ésters metílicos e para o etanol, os ésters etílicos) das misturas dos ácidos graxos que são encontrados nos óleos vegetais ou nas gorduras animais. A figura 5 mostra a reação de transesterificação. R é a mistura de várias cadeias de ácidos graxos. O álcool usado para produzir biodiesel é normalmente o metanol ( $R' = CH_3$ )(KNOTHE, 2005b).

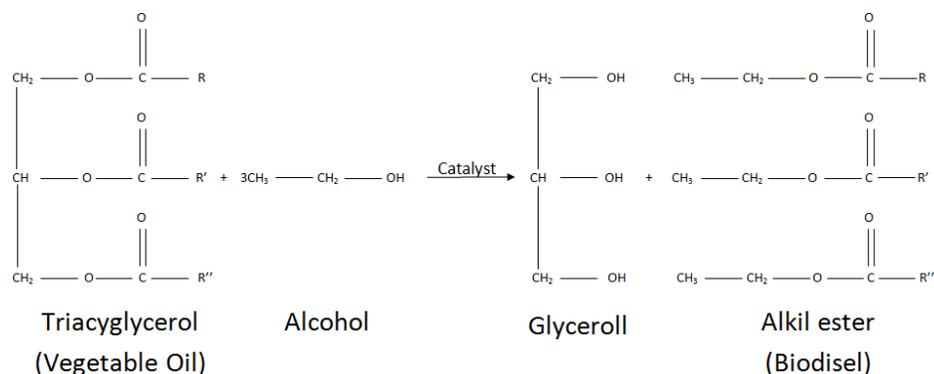


Figura 5 Reação de transesterificação

Os ésteres são derivados de ácidos carboxílicos, onde se substitui o hidrogênio da carboxila (-COOH) por um grupo alquila (-COOR), tendo como forma geral RCOOR' e podendo ser obtido através de reações de ácidos carboxílicos com alcoóis, em meio ácido. Essa reação é conhecida como esterificação. Os ésteres com baixa massa molecular são líquidos, voláteis e apresentam cheiro agradável e, à medida que sua massa molecular aumenta, vão se tornando viscosos, como os ácidos graxos, até chegarem a gorduras e ceras. Nesse caso, são conhecidos também como lipídios (SANTOS et al., 2005).

Os ácidos carboxílicos são caracterizados pelo grupo carbonila (C=O), sendo que ao carbono da carbonila liga-se um grupo hidróxi (-OH), formando-se assim outro grupo chamado de carboxila (-COOH). A fórmula geral dos ácidos carboxílicos é RCOOH (SANTOS et al., 2005).

Os alcoóis são substâncias orgânicas cujas moléculas possuem uma hidroxila (-OH), que é um grupo funcional, ligada a um carbono saturado da cadeia carbônica. Sua fórmula geral é R-OH, onde R é um grupo alquila (SANTOS et al., 2005).

Os ácidos graxos são ácidos carboxílicos de cadeia linear longa com número par (dez a vinte) de átomos de carbono (SANTOS et al., 2005).

As gorduras são ésteres originados da mistura de alcoóis e de ácidos graxos, substituindo-se o hidrogênio do grupo hidróxi do glicerol, um triálcool, por uma parte do ácido graxo. Caso a gordura seja resultante da substituição dos três hidrogênios dos grupos hidróxi do glicerol, obteremos os triglicerídeos; se for de dois, teremos um diglicerídeo e um monoglicerídeo (SANTOS et al., 2005).

Praticamente todas as gorduras são triglicerídeos, também chamados de trigliceróis ou triacilgliceróis. Quando são obtidos a partir de vegetais (milho, soja, etc.), denominados óleos vegetais, são constituídos por ácidos graxos que possuem ligações duplas (insaturados) e são líquidos à temperatura ambiente. Já os triglicerídeos de origem animal (gordura, manteiga, etc.) são normalmente formados por ácidos graxos saturados e são sólidos (SANTOS et al., 2005).

Os óleos vegetais são compostos de triglicerídeos e ácidos graxos livres (AGL). A reação para produção de biodiesel é chamada de esterificação, onde se reage ácido graxo com um álcool, na presença de um catalisador (ácido ou base). Os catalisadores alcalinos (NaOH e KOH) apresentam melhores rendimentos (COSTA NETO, 2000; SOLOMONS; FRHLE, 2002). No caso das gorduras, a recomendação é o uso de catalisadores ácidos. Para a reação de transesterificação é recomendável o uso de álcool em excesso e a mínima presença de água, fatores que reduzem o rendimento da reação. A presença de ácidos graxos livres deve ser detectada por titulação ácido-base, para se ter uma quantidade precisa de catalisador a ser utilizado na reação (LIMA; GONÇALVES, 1997; TCHE QUIMICA, 2008).

O biodiesel para ser utilizado deve ser de alta pureza, não contendo traços de glicerina, água, catalisador residual ou de álcool excedente. Para isso, devem ser feitas todas as etapas de filtração com acompanhamento necessário (ZAGONEL; COSTA NETO; RAMOS, 1999).

Segundo Moreira (2006), a fórmula química representativa do biodiesel é  $C_{6}H_{30}O_2$ .

O Biodiesel pode ser produzido de uma grande variedade de matérias-primas, incluindo os mais comuns óleos vegetais (soja, algodão, palma, amendoim, canola, girassol, etc.) e as gorduras animais como também os óleos vegetais usados (óleos de frituras, por exemplo).

O biodiesel tem diferentes vantagens ao ser comparado com o diesel mineral, além de ser completamente competitivo com o diesel mineral em muitos aspectos técnicos, tais como:

- a) derivado de uma fonte doméstica renovável, assim reduzindo a dependência do petróleo e preservando o mesmo;
- b) biodegradabilidade;
- c) redução da maioria das emissões de exaustão (com exceção dos óxidos de nitrogênio,  $NO_x$ );
- d) mais alto ponto de fulgor, levando a um manuseio e armazenamento mais seguro;
- e) excelente lubricidade, um fato de grande importância com o advento do baixo teor de enxofre do diesel de petróleo, o que tem reduzido grandemente a lubricidade do mesmo. Ao se acrescentar biodiesel em baixos níveis (1 – 2%) ao diesel mineral restaura-se a lubricidade (KNOTHE, 2005b).

O desempenho dos combustíveis oriundos de óleos vegetais tem sido reconhecido como satisfatório, entretanto, a potência de saída do motor tem se apresentada ligeiramente mais baixa que quando usando diesel combustível de petróleo e o consumo tem se mostrado ligeiramente mais alto. O intervalo de ignição foi reduzido com motores usando óleo de soja. Em muitas publicações, foi notado que os motores diesel usados operaram mais suavemente com

combustíveis à base de óleos vegetais do que com diesel combustível de petróleo. Devido às suas características de combustão, os óleos vegetais com uma alta quantidade de oxigênio foram sugeridos. Foi também sugerido que quando a quantidade de ácidos dos combustíveis de óleos vegetais é mantida em valores mínimos, resultados não adversos são verificados no equipamento de injeção e no motor (KNOTHE, 2005c).

Entretanto, a viscosidade cinemática dos óleos vegetais é aproximadamente uma ordem de magnitude maior que a do diesel combustível derivado do petróleo. A alta viscosidade causa uma pobre atomização do combustível na câmara de combustão do motor e resulta em problemas operacionais tais como depósitos no motor. Desde o ressurgimento do interesse nos combustíveis derivados de óleos vegetais durante os anos de 1970, quatro soluções possíveis para o problema da alta viscosidade foram investigadas: transesterificação, pirólise, diluição com diesel combustível convencional derivado do petróleo e microemulsificação. A transesterificação é o método mais comum e produz os ésteres monoalquílicos de óleos vegetais e de gorduras, chamado de biodiesel quando usado para o propósito de combustível. O metanol é normalmente usado para a transesterificação porque em muitos países ele é o álcool mais barato (KNOTHE, 2005c).

Um motivo relevante para que os óleos vegetais e as gorduras animais sejam transesterificados em ésteres alquílicos (biodiesel) é que esse processo faz com que a viscosidade cinemática do biodiesel torne-se muito próxima dos valores de viscosidade apresentados pelo diesel mineral.

O fato de que os óleos vegetais, as gorduras animais e seus derivados tais como ésteres alquílicos são apropriados como diesel combustível demonstra que existe alguma similaridade em relação ao combustível diesel de petróleo ou ao menos em alguns de seus componentes, sendo a propriedade do combustível que melhor demonstra essa adequação o chamado número de cetano.

Além da qualidade de ignição, como aquela expressa pela escala de cetano, muitas outras propriedades são importantes também para determinar a adequação do biodiesel como combustível. O calor de combustão, o ponto de orvalho, o ponto de névoa, a viscosidade cinemática, a estabilidade oxidativa e a lubrificidade são exemplos importantes dessas propriedades (KNOTHE, 2005b).

### **3.1.4.1 Algumas propriedades do Biodiesel**

#### **3.1.4.1.1 Número de Cetano**

O número de cetano é um descritivo adimensional da qualidade de ignição de um combustível diesel. É o principal indicador da qualidade do diesel combustível.

O diesel convencional de petróleo é um produto do craqueamento do petróleo, uma fração da evaporação na faixa central dos produtos de craqueamento; assim, é também chamado de “destilados centrais”. O diesel de petróleo é classificado como número 1, 2 e 4 nos Estados Unidos pela norma ASTM D975. O número 1 é obtido da faixa de evaporação de 170 a 270° C (como é o querosene e o combustível de jatos) e é aplicável em motores de alta velocidade cuja operação envolve frequentes e relativamente grandes variações na carga e na velocidade do motor. É normalmente requerido para uso em baixas temperaturas. O diesel de petróleo número 2 é o combustível do transporte e é aquele com o qual o biodiesel é normalmente comparado. O diesel de petróleo número 4 constitui-se de mais destilados viscosos e as misturas deles com óleos residuais combustíveis normalmente são satisfatórias somente para motores de baixa e média velocidades operados sob cargas sustentadas em velocidades quase constante (KNOTHE, 2005a).

Uma escala, o “Número de Cetano”, conceitualmente similar à escala de octano usada para a gasolina, foi estabelecida para descrever a qualidade do diesel de petróleo e de seus componentes. Geralmente, um composto que tem um alto número de octano tende a ter um baixo número de cetano e vice-versa. Assim, o trimetilpentano 2,2,4 (isooctano) é o padrão de alta qualidade (combustível de referência principal) para a escala de octano da gasolina (e também dá a essa escala o seu nome); ela tem um número de octano de 100, enquanto o n-heptano é o combustível de referência principal para baixa qualidade com um número de octano de 0. Para a escala de cetano, um hidrocarboneto de cadeia reta longa, hexadecano ( $C_{16}H_{34}$ ; nome trivial cetano, dando à escala de cetano o seu nome), é o padrão de qualidade alta (e um combustível de referência principal); a ele foi designado um número de cetano de 100. No outro lado da escala, um composto altamente ramificado chamado de heptametilnonano 2,2,4,4,6,8,8 (HMN, também  $C_{16}H_{34}$ ), com qualidade de ignição pobre em um motor diesel, foi designado um número de cetano de 15, sendo também um combustível de referência principal. O número de cetano de um diesel de petróleo é determinado pelo tempo de atraso da ignição, isto é, o tempo que passa entre a injeção de combustível dentro do cilindro e o início da ignição. Quanto menor o tempo de atraso da ignição, maior o número de cetano e vice-versa (KNOTHE, 2005a).

#### **3.1.4.1.2 Calor de Combustão**

O calor de combustão superior é uma propriedade que vem comprovando o uso de compostos graxos como combustível diesel. A quantidade de calor dos óleos vegetais e seus éster salquílicos corresponde a aproximadamente 90% do diesel combustível número 2. Os calores de combustão dos ésteres graxos e triacilgliceróis estão na faixa de 5400 a 14600

kJ/mol para ácidos graxos  $C_8$ -  $C_{22}$  e ésters. Para propósitos de comparação, o valor da literatura para o calor de combustão do hexadecano (cetano) é 10707,3 kJ/mol (a 20° C); assim, essa é a mesma faixa para os compostos graxos (KNOTHE, 2005a).

#### 3.1.4.1.3 Viscosidade do biodiesel

A viscosidade de um fluido diz respeito à resistência que uma lâmina de partícula impõe à outra a ela adjacente, quando existe movimento relativo. Para se definir a viscosidade, é necessário definir escoamento laminar como aquele em que as partículas movem em lâminas planas bem definidas, sem que haja fuga de partícula de uma lâmina para outra. Neste caso, tudo ocorre como se as lâminas escorregassem umas sobre a outras.

Em um escoamento onde se destaca um elemento de área  $\partial A$ , paralelo aos vetores de velocidade, cuja normal é  $n$ , as velocidades em pontos desta normal definem um perfil de velocidade, cuja inclinação em relação a  $n$ , na posição que corresponde ao elemento de área,  $\partial V/\partial n$ .

A viscosidade é definida através da Lei de Viscosidade de Newton, que especifica que, “para certos fluidos, denominados newtonianos, a tensão de cisalhamento numa interface paralela à direção do escoamento é diretamente proporcional à razão de variação de velocidade na direção normal à interface”. Assim,  $\tau \propto \partial V/\partial n$ , sendo o coeficiente de proporcionalidade definido como  $\mu$ , coeficiente de viscosidade, ou seja,  $\tau = \mu \partial V/\partial n$  ( $\tau$  é a tensão de cisalhamento).

O coeficiente de viscosidade é função da temperatura e da pressão. Para líquidos, ele decresce com a temperatura e é praticamente independente de pressão, fenômeno cuja explicação decorre do fato de que a viscosidade se relaciona a forças de atração moleculares, que decrescem com a temperatura. Nos gases, o coeficiente de viscosidade cresce com a temperatura: tal variação é

explicada pelo fato de que acréscimos desta grandeza causam maior agitação molecular e maior transferência da quantidade de movimento entre lâminas adjacentes, parâmetro este responsável pela intensidade de viscosidade nos gases.

O coeficiente de viscosidade cinemática é definido como a razão entre o coeficiente de viscosidade e a massa específica  $\rho$ . O nome desta relação decorre de sua dimensão envolver apenas grandezas cinemáticas (SCHIOZER, 1996).

A viscosidade dinâmica ( $\eta$ ) é definida como a razão da tensão cisalhante existente entre camadas de fluídos que se movem e a taxa de cisalhamento entre as camadas.

A viscosidade afeta a atomização de um combustível na injeção dentro da câmara de combustão e assim, por fim, a formação de depósitos no motor. Quanto mais alta a viscosidade, maior a tendência do combustível causar tais problemas. A alta viscosidade é a propriedade que mais explica o motivo pelo qual os óleos vegetais brutos tem sido abandonados como óleo diesel alternativo.

A maioria dos fluídos tais como o diesel de petróleo e o biodiesel aumentam a viscosidade com a diminuição da temperatura. As normas de combustível para diesel de petróleo e biodiesel limitam a viscosidade cinemática ( $\nu$ ). Como exemplo, a diminuição da temperatura de 40 para  $-3^\circ\text{C}$  aumenta a viscosidade cinemática ( $\nu$ ) de 2,81 para 10,4  $\text{mm}^2/\text{s}$  para D-2 e de 1,59 para 4,20  $\text{mm}^2/\text{s}$  para D-1.

Aumentos significativos na viscosidade cinemática ( $\nu$ ) podem ser acompanhados por uma transição para comportamento não-Newtoniano, definido como um fluído que não mostra viscosidade constante em todas taxas cisalhantes. Como resultado, mudanças nas propriedades reológicas do fluxo (viscosidade) podem levar a uma maneira de restringir o fluxo através das telas

de fios juntamente com o bloqueio de cristais de cera maiores, durante os testes CFPP (Ponto de Entupimento de Filtro no Frio) e LTFT (Teste de Fluxo em Temperaturas Baixas). Óleos refinados sem aditivos poliméricos, tais como o diesel de petróleo são tipicamente Newtonianos. Entretanto, estudos sobre biodiesel sugerem que uma transição para o comportamento não-Newtoniano afetará a viscosidade e outras propriedades de fluxo em baixas temperaturas (DUNN, 2005).

#### 3.1.4.1.4 Poder calorífico

De acordo com Boulanger (1978), poder calorífico é quando a combustão de um quilograma de combustível qualquer em sua combustão com oxigênio libera certa quantidade de calor avaliada em Joules. Como exemplo, tem-se o poder calorífico da gasolina igual a 42 MJ por kg (para um litro de gasolina, densidade 0,73, aproximadamente 34 MJ) e o poder calorífico do óleo combustível é de 45 MJ por quilo (para um litro de óleo combustível, densidade 0,85, aproximadamente 38 MJ).

Para combustíveis sólidos e líquidos, o poder calorífico pode ser calculado, com boa aproximação, pela equação (MOREIRA, 2006):

$$PCS = 33900C + 141800(H - O/8) + 9200S \quad (5)$$

em que:

- a) PCS = poder calorífico superior ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
- b) C = teor de carbono no combustível ( $\text{kg}(\text{carbono}) \cdot \text{kg} \text{combustível}^{-1}$ )
- c) H = teor de hidrogênio no combustível ( $\text{kg}(\text{hidrogênio}) \cdot \text{kg} \text{combustível}^{-1}$ )
- d) S = teor de enxofre no combustível ( $\text{kg}(\text{enxofre}) \cdot \text{kg} \text{combustível}^{-1}$ )
- e) O = teor de oxigênio no combustível ( $\text{kg}(\text{oxigênio}) \cdot \text{kg} \text{combustível}^{-1}$ )

O cálculo do poder calorífico inferior (PCI) é feito descontando-se do poder calorífico superior (PCS) o calor latente que acompanha o vapor d'água que sai pela descarga. Esse vapor d'água é oriundo da reação do hidrogênio com o oxigênio e da umidade presente no combustível.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 2440(9\text{H} + \text{W}) \quad (6)$$

Em que:

- a) PCI = poder calorífico inferior ( $\text{kJ.kg}^{-1}$  de combustível)
- b) W = umidade do combustível ( $\text{kg umidade.kg combustível}^{-1}$ )

A umidade é conhecida a partir da composição química do combustível e “9H” representa a parcela de vapor d'água formada pela combustão do hidrogênio. O calor latente é tomado de acordo com a pressão parcial do vapor d'água, na temperatura de 25° C e 760 mmHg (MOREIRA, 2006).

#### **3.1.4.1.5 Tensão superficial**

Sempre que um líquido está em contato com outros líquidos ou gases ou com uma superfície gás/sólido, uma interface se desenvolve agindo como uma membrana elástica esticada e criando tensão superficial. Esta membrana exibe duas características: o ângulo de contato  $\theta$  e a magnitude da tensão superficial,  $\sigma$  ( $\text{N/m}$  ou  $\text{lbf/ft}$ ). Ambas dependem do tipo de fluido e do tipo da superfície sólida (ou do outro líquido ou gás) com a qual ele compartilha uma interface.

Um balanço de forças em um segmento de interface mostra que há um salto de pressão através da suposta membrana elástica sempre que a interface é curva. Para uma gota de água no ar, a pressão na água é maior que a pressão ambiente: o mesmo é verdade para uma bolha de gás num líquido.

Em engenharia, provavelmente, o efeito mais importante da tensão superficial é a criação de um menisco curvo nos tubos de leitura de manômetros ou barômetros, causando a (normalmente indesejável) ascensão (ou depressão) capilar. A ascensão capilar pode ser pronunciada se o líquido está em um tubo de diâmetro pequeno ou em uma fenda estreita (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2004).

A tensão superficial é uma grandeza física decorrente de forças de atrações moleculares. Uma partícula líquida, em consequência de forças de atração entre suas moléculas e sem o efeito de outras forças que não essa atração molecular assume uma forma esférica. Imagine-se uma partícula líquida que se encontre na superfície de separação com outras fases gasosas ou líquidas. Tal partícula sofre, na direção perpendicular à superfície, efeitos de forças que tendem a atraí-la para o interior do meio mais denso, o que resulta numa tendência de deformar a superfície para uma geometria não-plana, cuja área, portanto, cresce em relação à de superfície plana. Então, mais moléculas devem ser removidas do interior para a superfície, para garantir a maior ocupação de área: para isto, deve ser realizado trabalho, o que envolve energia. Tal energia, que se entende como potencial por unidade de área, se apresenta como força por unidade de comprimento e é denominada tensão superficial. A tensão superficial depende da natureza dos fluidos em contato, da temperatura e da pressão, o que afeta a atomização (SCHIOZER, 1996).

### **3.1.5 Emissões de Exaustão dos motores de ignição por compressão**

Nos Estados Unidos, os motores diesel são regulados pela opacidade da fumaça, pelos óxidos totais do nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), pelos particulados totais  $< 10 \mu\text{m}$ , pelo monóxido de carbono (CO), e pelos hidrocarbonetos totais não queimados (THC) de acordo com os procedimentos de testes definidos pela

Agência de Proteção Ambiental (EPA). Pelo fato da magnitude das emissões do diesel depender da composição do combustível, o teste de certificação de emissão é conduzido com uma certificação de combustível diesel que representa a média nacional dos Estados Unidos. Outras emissões dos motores diesel tais como aldeídos e hidrocarbonetos poli-aromáticos (PAH) devem ser reguladas no futuro em uma tentativa de controlar os níveis ambientais de substâncias tóxicas no ar (MCCORMICK; ALLEMAN, 2005).

Motores diesel são significativos contribuidores de  $\text{NO}_x$  e de material particulado para inventários de poluentes do ar ambiental. Já a quantidade de CO e de THC derivada dos motores diesel é geralmente pequena se for comparada com as emissões geradas pelos veículos à gasolina de carga leve (MCCORMICK; ALLEMAN, 2005).

No Brasil, o Proconve (Programa de Controle da Poluição do ar por Veículos Automotores) foi baseado na experiência internacional dos países desenvolvidos e exige que motores novos atendam a limites máximos de emissão, em ensaios padronizados. Como exemplo, os limites máximos de emissão para veículos leves novos (Janeiro de 2009) é de 2,0 g/km de CO, 0,25 g/km de  $\text{NO}_x$  e 0,05 g/km de particulados (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB, 2010).

Em relação aos motores diesel dos veículos pesados, a nova etapa do Proconve, designada por P7, estabelece limites de emissões bem rígidos, exigindo para isso novas tecnologias e um diesel com teor muito reduzido de enxofre. Essa redução é da ordem de 60% de óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e de 80% de material particulado (MP) em relação à fase P5 (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA, 2014).

Os limites de emissões para veículos pesados na fase P5 eram, em ppm, de 2,1 para CO, 0,66 para HC, 5,0 para  $\text{NO}_x$  e 0,10 para MP (material

particulado). Já na fase P6, esses limites seriam de 1,5 para CO, 0,46 para HC, 3,5 para NO<sub>x</sub> e 0,02 para MP (BRASIL, 2014b).

Apesar do marco regulatório ter sido estabelecido na resolução CONAMA n°315/2002, a fase P6 não foi implantada na data estipulada em função de atrasos acontecidos na especificação do diesel combustível que seria comercializado no interior e nas metrópoles brasileiras. Assim, em 2005, especificou-se o diesel contendo o máximo de 2000 ppm (partes por milhão) de enxofre para o combustível comercializado no interior e de 500 ppm de enxofre para o comercializado nas regiões metropolitanas, passando a concentração de enxofre no diesel de 13000 ppm para 500 ppm (BRASIL, 2014b; CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA, 2002))

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em novembro de 2008, através da resolução n° 403, aprovou a chamada fase P7 na qual determinou-se que o óleo diesel disponibilizado ao mercado tivesse um teor aproximado de 10 ppm de enxofre (conhecido como diesel S-10). De acordo com o cronograma em vigor, as indústrias automobilísticas e de combustíveis têm prazo até o ano de 2016 para se adaptarem às novas normas técnicas (BRASIL, 2014b; CONAMA, 2008).

No Brasil, a partir de Janeiro de 2013, esse novo óleo diesel denominado de S10 passou a ser distribuído pela Petrobras, contendo um teor máximo de enxofre de 10 mg/kg (ppm = partes por milhão) de combustível. Este tipo de diesel combustível foi desenvolvido para atender aos requisitos dos mais modernos motores diesel que foram projetados para emitirem menores teores de material particulado e de NO<sub>x</sub> do que os motores fabricados até dezembro de 2011. Além do mais, esse novo combustível tem alto número de cetano (mínimo 48) e uma faixa estreita de variação da massa específica, na faixa de 820 a 850 kg/m<sup>3</sup>. Esse óleo diesel apresenta características físicas e

químicas ligeiramente diferentes do óleo Diesel Metropolitano S500 e do Interior de 1800 mg/kg (ppm) de enxofre (BR DISTRIBUIDORA, 2013).

Para atender os novos limites de emissões, foram criadas novas tecnologias para caminhões e ônibus. A EGR (ExhaustGasRecirculation) é uma tecnologia na qual existe a recirculação do gás de escapamento fazendo com que esse gás retorne à admissão, reduzindo, assim, a temperatura de combustão e, conseqüentemente, eliminando o  $\text{NO}_x$ . Nessa tecnologia, torna-se necessário o uso de um sistema de turboalimentação mais sofisticado e de um filtro de partículas no escape. Uma outra tecnologia criada foi a chamada redução catalítica seletiva (SCR – SelectiveCatalitycReduction) onde um reagente líquido conhecido como Arla 32 é pulverizado no gás de escapamento com o intuito de promover uma reação química no catalisador neutralizando, assim, a emissão de  $\text{NO}_x$ , transformando o mesmo em nitrogênio e vapor d'água. Caso o veículo não esteja abastecido corretamente com Arla 32, dependendo de sua categoria, o motor pode perder 25% ou 40% de seu torque. Nessa tecnologia, o material particulado é reduzido durante a combustão no próprio motor (ANFAVEA, 2014)

Visando atender os novos limites de emissões, os veículos que atendem a etapa P7 foram munidos de sistemas de pós-tratamento sensíveis ao enxofre, tornando-se necessária a utilização de um diesel com um nível mais baixo de enxofre, inicialmente, à partir de 2013, o chamado S50 (50 ppm de enxofre) e posteriormente, o S10 (10 ppm de enxofre) (ANFAVEA, 2014)

Uma importante propriedade do biodiesel é sua habilidade de reduzir as emissões de particulados totais de um motor. As emissões de particulados são definidas pela EPA como condensado ou material sólido coletado em um filtro apropriado em uma temperatura menor ou igual a 52° C. A questão do particulado, assim, inclui fuligem de carbono, derivados do combustível e do

óleo lubrificante e aerossóis de ácido sulfúrico (MCCORMICK; ALLEMAN, 2005).

As diferenças nas propriedades físicas dos combustíveis podem resultar em anomalias no spray causando um aumento desnecessário das emissões de poluentes. Alta viscosidade afeta a pressão da linha, vazamentos e a fricção dos roletes na bomba, a taxa de pressão líquida se eleva e o tempo de injeção é avançado por causa do mais alto módulo de elasticidade volumétrico (*bulk modulus*) do biodiesel. A pressão de injeção mais alta aumenta a velocidade relativa entre o combustível injetado e a carga do cilindro resultando em uma diminuição do tamanho médio de gota, o que melhora as características de evaporação do spray. Uma mais alta velocidade inicial do spray também influencia seu comprimento de penetração e seu ângulo de cone. Por outro lado, a mais alta massa específica, a mais alta viscosidade e a mais alta tensão superficial do biodiesel aumentam a fricção entre o combustível e as paredes do bico injetor e conseqüentemente diminuem a velocidade de injeção. O aumento da viscosidade e da tensão superficial do combustível causam um tamanho médio de gota maior e uma menor vaporização da gota. Combustíveis com massa específica e viscosidade mais elevadas possuem menores comprimentos de penetração e maiores ângulos do cone do spray; a mistura de ar e combustível pode ser deteriorada e uma mistura rica ser formada (LEE; PARK; KWON, 2005; YAMANE; UETA; SHIMAMOTO, 2001).

### **3.1.6 Caracterização do biodiesel conforme ANP**

Através da Portaria 255 de 15 de setembro de 2003, a Agência Nacional do Petróleo – ANP estabeleceu as especificações brasileiras iniciais para o biodiesel puro a ser misturado no óleo diesel automotivo para testes em frotas cativas ou para uso em processo industrial específico de acordo com a Portaria

ANP 240, de 25 de agosto de 2003. Posteriormente saiu a especificação para o biodiesel no Brasil, através da Resolução número 42, de 24 de novembro de 2004 (AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GAS NATURAL E BIODIESEL - ANP, 2003a, 2003b, 2004).

A Lei nº 11.097, publicada em 13 de janeiro de 2005, introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira e ampliou a competência administrativa da ANP, que passou desde então a denominar-se Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. A partir daí, a ANP passou a regular e fiscalizar as atividades inerentes à produção, controle de qualidade, distribuição, revenda e comercialização do biodiesel e da mistura óleo diesel biodiesel (Bx)(ANP, 2010; BRASIL, 2005).

O biodiesel é um combustível produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais, sendo que dezenas de espécies vegetais existentes no Brasil podem ser utilizadas como matérias-primas na produção do biodiesel, entre elas a soja, o dendê, o girassol, o babaçu, o amendoim, a mamona e o pinhão-manso(ANP, 2010).

A Resolução ANP nº 14, de 11 de maio de 2012, publicada no Diário Oficial da União (DOU) de 18 de maio de 2012, estabelece no Regulamento Técnico ANP nº 4/2012, parte integrante dessa Resolução, a especificação do biodiesel a ser comercializado pelos diversos agentes econômicos autorizados em todo o território nacional (ANP, 2012).

Segundo essa Resolução, a análise do produto deverá ser realizada em uma amostra representativa do mesmo obtida segundo métodos ABNT NBR 14883 – Petróleo e produtos de petróleo – Amostragem manual ou ASTM D 4057 – Prática para Amostragem de Petróleo e Produtos Líquidos de Petróleo (*Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products*) ou ISO 5555 (*Animal and vegetable fats and oils – Sampling*) (ANP, 2014).

A determinação das características do biodiesel será feita mediante o emprego das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), das normas internacionais “*American Society for Testing and Materials*” (ASTM), da “*International Organization for Standardization*” (ISO) e do “*Comitê Européen de Normalisation*” (CEN) (ANP, 2014).

A Tabela 1 - Especificação do Biodiesel mostra as características do biodiesel que deverão ser determinadas segundo a Resolução ANP n° 14, de 11/05/2012.

Tabela 1 Especificação do Biodiesel

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO ABNT NBR	MÉTODO ASTM D	MÉTODO EN/ISO
Aspecto (com anotação da temperatura de ensaio)	-	LII – Límpido e isento de impurezas.	-	-	-
Massa específica a 20° C	kg/m <sup>3</sup>	850 – 900	7148/14065	1298/4052	EN ISO 3675/EN ISO12185
Viscosidade Cinemática a 40° C	mm <sup>2</sup> /s	3,0 – 6,0	10441	445	EN ISO3104
Teor de Água, máx.	mg/kg	200	-	6304	EN ISO12937
Contaminação total, máx.	mg/kg	24	-	-	EN ISO12662
Ponto de fulgor, min (quando superior a 130° C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol)	° C	100,0	14598	93	EN ISO3679
Teor de éster, min	% massa	96,5	15764	-	EN14103
Resíduo de carbono (deve ser avaliado em 100% da amostra)	% massa	0,050	15586	4530	-
Cinzas sulfatadas, máx	% massa	0,020	6294	874	EN ISO3987
Enxofre total, máx	% massa	10	15867	5453	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Sódio + Potássio, máx	mg/kg	5	15554/15555/15553/15556	-	EN 14108/EN 14109/EN 14538
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/Kg	5	15553/15556	-	EN14538
Fósforo, máx.	mg/kg	10	15553	4951	EN 14107
Corrosividade ao cobre, 3h a 50° C, máx.	-	1	14359	130	EN ISO2160
Número de Cetano	-	Anotar	-	613 6890	EN ISO5165
Ponto entupimento de filtro a frio, máx	° C	19 (tabela)	14747	6371	EN 116

Tabela 1, conclusão

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO ABNT NBR	MÉTODO ASTM D	MÉTODO EN/ISO
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50	14448	664	EN 14104
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15341/15771	6584	EN 14105/EN 14106
Glicerol total, máx.	% massa	0,25	15344 /15908	6584 (10)	EN 14105
Monoacilglicerol	% massa	0,80	15342/15344/1 5908	6584	EN 14105
Diacilglicerol	% massa	0,20	15342/15344/1 5908	6584	EN 14105
Triacilglicerol	% massa	0,20	15342/15344/1 5908	6584	EN 14105
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,20	15343	-	EN 14110
Índice de Iodo	g/100g	Anotar	-	-	EN 14111
Estabilidade à oxidação a 110° C, min.	H	6	-	-	EN 14112/EN 15751

Fonte: ANP (2012)

### 3.2 O Estado da Arte do uso do biodiesel no Brasil

No Brasil, o uso energético dos óleos vegetais como combustível ocorre desde a década de 1920. O Instituto Nacional de Tecnologia (INT), através do Instituto de Óleo do Ministério da Agricultura e do Instituto de Tecnologia Industrial de Minas Gerais, iniciou as pesquisas com os combustíveis alternativos e renováveis. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) vem desenvolvendo projetos sobre óleos vegetais para uso como combustíveis, em especial para o Dendiesel, desde a década de 1970. Naquela mesma época, a Universidade Federal do Ceará (UFCE) desenvolveu pesquisas a respeito de um novo processo baseado na biomassa com o intuito de desenvolver fontes alternativas de energia. Um novo combustível oriundo de óleos vegetais e com propriedades similares às do óleo diesel fóssil, o biodiesel, foi obtido (OSAKI; BATALHA, 2008).

O uso energético de óleos vegetais no Brasil foi proposto em 1975, originando o Pró-óleo – Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos, sendo seu objetivo gerar um excedente de óleo vegetal cujos custos de produção fossem competitivos com os do petróleo. Previa-se uma mistura de 30% do óleo vegetal no óleo diesel, com perspectivas para sua substituição integral em longo prazo.

No dia 30 de outubro de 1980, foi anunciado o Probiodiesel, estando envolvidas instituições de pesquisas da Petrobrás e do Ministério da Aeronáutica (OSAKI; BATALHA, 2008; PARENTE, 2003).

No final de 1982, a Universidade Federal do Ceará (UFCE) desenvolveu o querosene vegetal de aviação para o Ministério da Aeronáutica, denominado Prosene. Após os testes em turbinas de aviões a jato, o combustível

foi homologado pelo Centro Técnico Aeroespacial (OSAKI; BATALHA, 2008).

O Governo Federal lançou o programa de Óleos Vegetais (OVEG) em 1983 motivado pela alta nos preços do petróleo, assim, foi testada a utilização de biodiesel e de misturas combustíveis em veículos (OSAKI; BATALHA, 2008).

A produção e o consumo de biodiesel no Brasil foram autorizados através da Medida Provisória nº 214/2004, transformada em Lei nº 11.097/05, sendo essa contida no Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). A principal diretriz do PNPB é implantar um modelo de energia sustentável, formalizado a partir da produção e uso do biodiesel obtido de diferentes fontes oleaginosas, sendo o mesmo capaz de promover a inclusão social, garantir preços competitivos, obter um produto de qualidade e manter o abastecimento. A mistura de biodiesel ao diesel fóssil iniciou-se em dezembro de 2004, em caráter não obrigatório. A partir de janeiro de 2008, tornou-se obrigatória a mistura de 2% (B2), abrangendo todo o território nacional. Com a expansão e fortalecimento do mercado brasileiro, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aumentou gradativamente o percentual de mistura do biodiesel ao diesel fóssil até alcançar o patamar de 5% (B5) em janeiro de 2010, antecipando, assim, em três anos o que era estabelecido pela Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005 (BRASIL, 2004, 2005; TAPANES et al., 2013).

Os testes realizados com diferentes proporções de misturas de biodiesel no diesel combustível mostraram resultados técnicos viáveis, mas dois fatores paralisaram o avanço do uso comercial do biodiesel no Brasil e no mundo: a redução do preço do petróleo e o elevado custo de produção em relação ao diesel. No entanto, problemas ligados à disponibilidade do petróleo com preços

acessíveis e aos seus impactos no meio-ambiente reavivaram essa discussão em todo mundo (OSAKI; BATALHA, 2008)

No ano de 2005, a produção se concentrou nos estados do Pará e do Piauí, nos quais foram produzidos 90% do biodiesel brasileiro (OSAKI; BATALHA, 2008).

No ano de 2006, a empresa Brasil Ecodiesel foi a principal produtora de biodiesel, seguida da Granol. Juntas responderam por 50% e 44%, respectivamente, da produção de biodiesel. No ano de 2007, cerca de 88% da produção de biodiesel ficou concentrada em quatro empresas, sendo que a Brasil Ecodiesel produziu 53%, seguida pela Granol, Caramuru e Biocapital, com 17%, 11% e 8% da produção, respectivamente.

O Brasil produziu 402,72 mil m<sup>3</sup> de biodiesel no ano de 2007, com média mensal de 30,98 mil m<sup>3</sup>. No ano de 2008, as unidades produtoras autorizadas pela ANP produziram 51,78 mil m<sup>3</sup>, o que equivale a 12,8% da produção total de 2007.

A produção regional do biodiesel está concentrada na Região Nordeste, que produziu 42% do Biodiesel no ano de 2007, seguida pelas regiões Centro-Oeste (31%), Sul (11%), Sudeste (9%) e Norte (7%) (OSAKI; BATALHA, 2008).

A produção de biodiesel em 2008 foi de 1,16 bilhão de litros, o que significa um aumento representativo frente aos anos anteriores: em 2005 produziu-se 735 mil litros, no ano de 2006, 69 milhões de litros e, em 2007, a produção alcançou a margem dos 404 milhões de litros (NACHILUK; FREITAS, 2010). Em 2009, a produção de biodiesel chegou a 1,6 bilhão de litros (ANP, 2010).

A capacidade instalada de produção, no mês de julho de 2009, foi de aproximadamente 3,6 milhões de metros cúbicos anuais, dos quais 92% têm o

Selo Combustível Social, no âmbito do programa do Governo Federal de incentivo à produção de biodiesel.

É relevante o fato de o óleo de soja ser a matéria-prima mais utilizada na fabricação do biodiesel, seguida pelo sebo (gordura animal e do óleo de algodão). No mês de fevereiro de 2009, segundo o Ministério das Minas e Energia, a participação ficou em 74% para o óleo de soja, 19% para o sebo, 2% para o óleo de algodão e 2% para outras matérias-primas graxas (PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BIODIESEL, 2009).

Levando-se em consideração a disponibilidade de oferta de matéria-prima, verifica-se que o potencial da produção brasileira de óleos vegetais ultrapassa a casa de 4 bilhões. As estimativas de produção de sebo bovino, segunda matéria-prima mais utilizada para a produção de biodiesel, para 2009, são de 685 mil toneladas. Percebe-se, portanto, que estes números estão acima da demanda para B5 estimada em 2.238.197 m<sup>3</sup>/ano (NACHILUK; FREITAS, 2010).

Com relação à capacidade instalada, o Brasil possui um total de 65 usinas autorizadas a operar na produção de biodiesel, com capacidade anual de 3.878.697m<sup>3</sup>/ano, ou seja, 3,8 bilhões de litros (ANP, 2010).

A capacidade instalada para produção de biodiesel está distribuída da seguinte forma nas regiões brasileiras: Centro-Oeste possui a maior capacidade instalada (1.642.283 m<sup>3</sup>/ano) distribuída em 30 usinas; Sudeste, com 16 usinas, produz 769.390m<sup>3</sup>/ano; Sul, 727.802 m<sup>3</sup>/ano e 7 usinas no Nordeste, com 8 instalações, tem capacidade para produzir 698.904 m<sup>3</sup>/ano; e Norte, com 4 usinas juntas, pode produzir 40.320 m<sup>3</sup>/ano (NACHILUK; FREITAS, 2010).

Estudos divulgados pela National Biodiesel Board dos Estados Unidos, dão conta que o Brasil apresenta condições de liderar a produção mundial de biodiesel, podendo assim, promover a substituição de 60% da demanda mundial de óleo diesel mineral. No País, são cultivadas diversas espécies oleaginosas

que possuem potencial para serem utilizadas como matéria-prima na produção de biodiesel, tais como a soja, a mamona, o girassol e o dendê (FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO ESTADO DE SÃO PAULO-FAESP, 2009).

O Brasil está entre os maiores produtores e consumidores de biodiesel do mundo com uma produção anual, em 2008, de 1,2 bilhões de litros e uma produção anual, em 2009, de 1,6 bilhões de litros e uma capacidade instalada, em janeiro de 2010, para cerca de 4,7 bilhões de litros (ANP, 2010).

A produção total de biodiesel no Brasil por ano tem crescido de maneira vertiginosa. A produção, em m<sup>3</sup>, de 2005 a 2011, totalizou os seguintes valores, sucessivamente: 736, 69.002, 404.329, 1.167.128, 1.608.053, 2.386.399 e 2.672.760 (BRASIL, 2013). Em 2012, o total produzido foi de 2.717.483 m<sup>3</sup> de biodiesel. Já em 2013, essa produção subiu para 2.917.488 m<sup>3</sup> de biodiesel (ANP, 2014).

A produção e o uso do biodiesel no Brasil propiciam o desenvolvimento de uma fonte energética sustentável sob os aspectos ambiental, econômico e social e também trazem a perspectiva da redução das importações de óleo diesel. Em 2008, o uso do biodiesel evitou a importação de 1,1 bilhões de litros de diesel de petróleo resultando numa economia de cerca de US\$ 976 milhões, gerando divisas para o País. Além da diminuição da dependência do diesel importado, o biodiesel traz outros efeitos indiretos de sua produção e uso, como o incremento a economias locais e regionais, tanto na etapa agrícola como na indústria de bens e serviços. Com a ampliação do mercado do biodiesel, milhares de famílias brasileiras serão beneficiadas, principalmente agricultores do semi-árido brasileiro, com o aumento de renda proveniente do cultivo e comercialização das plantas oleaginosas utilizadas na produção do biodiesel. A produção de biodiesel já gerou cerca de 600 mil postos de trabalho no campo, de acordo com dados do Ministério do

Desenvolvimento Agrário. Outro benefício para a sociedade, resultante da ampliação do uso do biodiesel, é o efeito positivo sobre o meio ambiente, acarretando a diminuição das principais emissões veiculares em comparação ao diesel derivado de petróleo (ANP, 2010).

Desde 1º de janeiro de 2010, o óleo diesel comercializado em todo o Brasil contém 5% de biodiesel. Esta regra foi estabelecida pela Resolução no 6/2009 do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE (2009), publicada no Diário Oficial da União (DOU) em 26 de Outubro de 2009, que aumentou de 4% para 5% o percentual obrigatório de mistura de biodiesel no óleo diesel (ANP, 2010).

Assim sendo, a partir de 1º de janeiro de 2010, passou-se a ser obrigatória a mistura de 5% de biodiesel em todo óleo diesel consumido no Brasil, exceto óleo diesel marítimo. Para os atuais dados de mercado, a nova mistura deverá gerar economia de divisas da ordem de US\$ 1,4 bilhão/ano devido à redução das importações de óleo diesel. Segundo estudo realizado pela ANP, cada litro da nova mistura diminui em 3% a emissão de CO<sub>2</sub>, além de reduzir também a emissão de material particulado (ANP, 2010).

O total de plantas autorizadas para operação é 64, correspondendo a uma capacidade total autorizada de 21.957,79 m<sup>3</sup>/dia. Entretanto, 62 plantas possuem autorização para comercialização de biodiesel produzido, correspondendo a 20.815,77 m<sup>3</sup>/dia de capacidade autorizada para comercialização (ANP, 2013).

Em Minas Gerais, as três plantas de produção de biodiesel autorizadas pela ANP (ANP, 2010, 2013) são:

- a) AbdieselLtda, localizada em Araguari, com capacidade estimada de 6,0 m<sup>3</sup>/dia, óleo vegetal; Matérias-primas: Girassol, Nabo Forrageiro, Mamona e outras oleaginosas; Rota tecnológica: etílica;

- b) AbdieselLtda, localizada em Varginha, com capacidade estimada de 2,4 m<sup>3</sup>/dia, rotas metílica e etílica, várias oleaginosas; Matérias-primas: óleo de soja e óleo residual;
- c) Petrobrás Biocombustíveis S.A., localizada em Montes Claros, com capacidade estimada de 422,73 m<sup>3</sup>/dia, rota metílica, várias oleaginosas; Matérias-primas: Algodão, Amendoim, Girassol, Mamona e óleos residuais;

Em dezembro de 2013, a autorização para operação e comercialização da empresa BIOSEP, em Três Pontas – MG, foi revogada.

O preço médio arrematado nos últimos leilões de biodiesel, em R\$/l, foi de R\$1,74 no 19º leilão, R\$ 2,30 no 20º, R\$2,05 no 21º, R\$2,21 no 22º e R\$2,40 no 23º (BRASIL, 2013).

### **3.3 Fontes de biodiesel disponíveis**

Apesar da maior parte do biodiesel produzido mundialmente ser proveniente do óleo de soja, pode-se obter este produto de qualquer óleo vegetal considerado um óleo fixo ou ainda de gordura animal. No Brasil, os óleos vegetais mais comumente usados são os óleos de soja, milho, mamona, girassol, amendoim, algodão, palma, entre outros. Uma outra matéria-prima de grande interesse são os óleos e gorduras residuais, podendo ser obtido de variadas formas. Os óleos de frituras representam um potencial de oferta relevante. Tais óleos têm origem em determinadas indústrias de produção de alimentos, nos restaurantes comerciais e institucionais, e ainda, nas lanchonetes (PARENTE, 2003). Outra forma de obtenção de biodiesel é através dos óleos e gorduras de animais, já que essas substâncias possuem estruturas químicas semelhantes às dos óleos vegetais, sendo moléculas triglicéridicas de ácidos

graxos, havendo somente pequenas diferenças entre os ácidos graxos predominantes em óleos e gorduras. Desta forma, devido às semelhanças, as gorduras animais também podem ser transformadas em biodiesel. Alguns exemplos dessas gorduras animais são sebo bovino, óleos de peixes, entre outros (PARAIZO; EDGAR JÚNIOR; PARAIZO, 2005).

É possível, também, usar mais de uma fonte vegetal no mesmo biodiesel. A mamona, por exemplo, se usada em mistura com outros óleos, agrega propriedades positivas ao produto final, como a redução do ponto de congelamento, sem alterar as especificações exigidas pela ANP (ANP, 2010).

Em 2013, das matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel, 69,24% foi de óleo de soja, 26,18% de gordura bovina, 3,07% de óleo de algodão, 0,65% de óleo de fritura, 0,57% de gordura de porco e 0,29% de outros materiais graxos (ANP, 2013).

### **3.3.1 Características das principais oleaginosas utilizadas para a produção de biodiesel no Brasil**

#### **3.3.1.1 Mamona (*Ricinus communis* L.)**

A mamona é cientificamente denominada de *Ricinus communis* L. e é uma planta da família Euphorbiaceae, sendo conhecida no Brasil por mamoneira, rícino, carrapateira, bafureira, baga e palma-criste. Nos Estados Unidos e na Inglaterra, a mamona é conhecida como “*castor bean*” e como “*castor seed*” (BIODIESELBR, 2013).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a mamona apresenta um ciclo de 105 – 135 dias, teor de óleo na baga de 20%, produtividade média em grão de 1000 kg/ha, rendimento em óleo de 4700 kg/ha, poder calorífico do óleo in natura de 8913 kcal/kg, poder calorífico do

biocombustível de 9046 kcal/kg e balanço energético do biocombustível de 1:1,85. Existem 23 tipos de cultivares registrados (BRASIL, 2013).

Considerando-se sua capacidade produtiva na região Nordeste do Brasil e pelo fato de constituir-se em alternativa para estabelecimento da agricultura familiar, a mamona foi a cultura inicial utilizada pelo PNPB. Apesar dessa região do país apresentar aptidão agrônômica para o cultivo desta matéria-prima, as práticas e tecnologias de manejo da mesma demonstraram-se inadequadas, tornando o uso dessa oleaginosa o menos competitivo (US\$1.00/litro – sem impostos) para a produção de biodiesel. Além do mais, a mamona tem apresentado preços elevados e crescentes no mercado internacional, em média de US\$1650.00/tonelada nos últimos anos (PINOTTI; AMARAL, 2013).

O óleo da mamona é o principal produto da planta, possuindo diversos usos, dentre eles: lubrificante de turbinas, fabricação de náilon e resinas, tecidos, adesivos, cosméticos, fios, tubos plásticos e tintas aproveitadas em pinturas de automóveis e em impressoras, além de ser componente também utilizado nas telecomunicações e na biomedicina. Deve-se ainda, dar destaque aos sub-produtos dessa planta (SLUSZZ; MACHADO, 2006).

O uso da torta da mamona tem sido, com maior frequência, como adubo orgânico, sendo esse de boa qualidade e eficiente na recuperação de terras esgotadas. Diferentemente de várias outras culturas, essa torta não pode ser utilizada na alimentação animal devido à presença da ricina (substância tóxica quando ingerida pelos animais ou humanos) (SLUSZZ; MACHADO, 2006). Atualmente, já existem estudos em que se consegue que essa substância tóxica seja inativada.

A produção, a área plantada e a produtividade da mamona no Brasil na safra 2000/2001 foram, respectivamente, de 80 mil toneladas, 161 mil hectares e 495 kg/ha. Na safra de 2005/2006, esses valores foram de 104, 148 e 703,

respectivamente. Os valores, na safra 2010/2011, atingiram a ordem de 141, 219 e 644, respectivamente. Já na safra 2011/2012, percebe-se uma queda na produção, passando para 73 mil toneladas, sendo a área plantada de 145 mil hectares e a produtividade de 504 kg/ha (BRASIL, 2013).

A composição de ácidos graxos do óleo de mamona, percentual em peso, é palmítico (1,1%), esteárico (3,1%), oléico cis-9 (4,9%), linoleico cis 9 – cis 12 (1,3%) e ácido ricinóico (89,6%) (SINGH, 2010).

### **3.3.1.2 Soja (*Glycine Max L Merrill*)**

A soja é uma planta da família *Fabaceae*, sendo considerada uma das principais fontes de proteína e óleo vegetal do mundo. Ela tem sido cultivada comercialmente e utilizada nas alimentações humana e animal por milênios, sem nenhum registro de danos causados aos consumidores ou ao meio ambiente (PORTAL DO BIODIESEL, 2006 apud SLUSZZ, 2006,p. 14).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a soja apresenta um ciclo de 105 – 135 dias, teor de óleo no grão de 20%, produtividade média do grão de 2800 kg/ha, rendimento em óleo de 560 kg/ha, poder calorífico do óleo in natura de 9421 kcal/kg e balanço energético do biocombustível de 1:3,95. Existem 909 tipos de cultivares registrados (BRASIL, 2013).

Embora ela tenha origem em clima temperado, depois de amplo melhoramento genético, a soja é produzida em condições de climas subtropical e tropical. É uma planta anual, arbustiva, com ciclo variando de 70 a 180 dias, dependendo das variedades, regiões e condições edafoclimáticas. As condições ótimas para obtenção do máximo potencial produtivo são de necessidade de água variando de 450 a 800 mm e temperatura do ar entre 20 e 30° C. A soja tem melhor potencial de desenvolvimento em sistema de plantio direto, com

solo corrigido de acordo com as necessidades nutricionais das cultivares utilizadas (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA SOJA, 2006).

Trata-se de um grão muito versátil que dá origem a produtos e subprodutos muito usados pela agroindústria, indústria química e de alimentos. Na alimentação humana, a soja entra na composição de vários produtos embutidos, em chocolates, temperos para saladas, entre outros. A proteína da soja é a base de ingredientes de padaria, massas, produtos de carne, cereais, misturas preparadas, bebidas, alimentação para bebês e alimentos dietéticos. A soja também é muito usada pela indústria de adesivos e nutrientes, alimentação animal, adubos, formulados de espumas, fabricação de fibra, revestimento, papel emulsão de água para tintas. Seu uso mais conhecido, no entanto, é como óleo refinado, obtido a partir do óleo bruto. Nesse processo, também é produzida a lecitina, um agente emulsificante, muito usada na fabricação de salsichas, maioneses, achocolatados, entre outros produtos (SLUSZZ; MACHADO, 2006).

O Brasil vem se destacando como um dos principais produtores de soja do mundo. Na safra 2011/2012, os Estados Unidos lideraram a produção mundial de soja com 83,17 milhões de toneladas, seguido pelo Brasil com 66,68 milhões de toneladas. Já a Argentina, ficou em 3º lugar com 42,50 milhões de toneladas (BRASIL, 2013).

Fazendo um breve histórico, a produção, a área plantada e a produtividade da soja no Brasil na safra 2000/2001 foram, respectivamente, de 38,43 milhões de toneladas, 14 milhões de hectares e 2751 kg/ha. Na safra de 2005/2006, esses valores foram de 55,03;22,7 e 2419, respectivamente. Os valores, na safra 2010/2011, alcançaram o patamar de 75,32;24,18 e 3115, respectivamente. Já na safra 2011/2012, percebe-se uma queda na produção,

passando para 66,68 milhões de toneladas, sendo a área plantada de 25,02 milhões de hectares e a produtividade de 2665kg/ha (BRASIL, 2013).

A produção estimada de campo para a safra 2013 de soja em grão é de 80.927.337 t. numa área plantada de 27.569.970 ha, sendo assim previsto um rendimento médio de 2.938 kg/ha, valores maiores respectivamente em 23,2 %, 10,0% e 11,5% do que os obtidos na safra de 2012 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2013).

Em 2012, aproximadamente 80% da produção de biodiesel no Brasil foi oriunda do óleo de soja (EMBRAPA, 2012).

A composição de ácidos graxos do óleo de soja, percentual em peso, é palmítico (13,9%), esteárico (2,1%), oléico cis-9 (23,2%), linoleico cis 9 – cis 12 (56,2%) e linolenico (4,3%) (SINGH, 2010).

### **3.3.1.3 Algodão (*Gossypiumhirsutum*L.*rlatifolium*Hutch)**

O algodão é uma planta da família das *Malvaceae*, subarborescente e, na produção comercial, o ciclo é anual. Os frutos, conhecidos como maçãs, produzem as plumas (fibras) e as sementes (caroços). A produção do biodiesel é a partir do esmagamento do caroço, sendo uma alternativa ainda pouco divulgada, mas que começa a atrair o interesse de grandes empresas (PORTAL DO BIODIESEL, 2006 apud SLUSZZ, 2006, p. 14).

O algodoeiro é muito sensível à temperatura, por isso é recomendado para as regiões Nordeste e Centro-Oeste do Brasil, onde as temperaturas permanecem entre 18° e 30° C, nunca ultrapassando o limite inferior de 14° C (EMBRAPA ALGODÃO, 2006).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o algodão apresenta um ciclo de 120 – 180 dias, teor de óleo no caroço de 19%, teor de farelo do caroço de 80% - 82%, produtividade média de caroço de

algodão de 1900 kg/ha, rendimento em caroço de 58% - 72%, rendimento em pluma de 28% - 42%, rendimento em óleo vegetal de 361 kg/ha e poder calorífico do biocombustível de 9520 kcal/kg . Existem 83 cultivares do tipo *Gossypiumhirsutum L.*, 22 *Gossypiumhirsutum Lvar.latifoliumHutch*, 2 *Gossypiumhirsutum Lvar. marie galante (Watt) Hutche* 16 *Gossypium* Lregistrados (BRASIL, 2013).

Segundo Royo (2010), o algodão é a terceira matéria-prima mais importante para a produção do biodiesel nacional, fica atrás apenas da soja e do resíduo de suínos. O óleo de algodão contribui com 5% dos dois bilhões de litros de óleo que o Brasil usa atualmente para a produção de biodiesel. A quantidade de óleo presente na semente de algodão é baixa em relação a outras culturas, com uma média de 14%. Apesar do baixo potencial de óleo, a vantagem do algodão em relação às outras culturas é o preço. O custo da produção para conversão em biodiesel é um dos mais baratos que existem.

Em uma retrospectiva, a produção, a área plantada e a produtividade de algodão no Brasil na safra 2000/2001 foram, respectivamente, de 1522 mil toneladas, 868 mil hectares e 1753 kg/ha. Na safra de 2005/2006, esses valores foram de 1686, 856 e 1969, respectivamente. Os valores, na safra 2010/2011, alcançaram o patamar de 3229, 1400 e 2306, respectivamente. Já na safra 2011/2012, percebe-se uma ligeira queda na produção, passando para 3222 mil toneladas, sendo a área plantada de 1391 mil hectares e a produtividade de 2315kg/ha (BRASIL, 2013).

A expectativa de produção de algodão herbáceo (em caroço) no ano de 2013 é de 3.464.693 toneladas, correspondendo a uma redução de 30,2% se comparado com o ano de 2012. Com o alto custo de produção por área e um risco mais elevado do que a soja, vários estados produtores optaram por plantar a leguminosa em detrimento do algodão, culminando em uma redução média de

área de 31,7% do plantio nacional se comparado com o ano de 2012 (IBGE, 2013).

A utilização mais comum do algodão refere-se às plumas, que têm muitas utilidades, principalmente na fiação e tecelagem, enquanto que das sementes são obtidos óleo para alimentação humana e farelo para ração animal, além de grande número de produtos secundários (SLUSZZ; MACHADO, 2006).

A semente de algodão contém de 14 a 25% em média de óleo, sendo 47,8% de ácido linoléico, 23,4% de palmítico e 22,9% de oléico (LIMA et al., 2009).

#### **3.3.1.4 Características gerais das principais oleaginosas**

As características de culturas oleaginosas quanto ao teor de óleo, demanda de área para produção de 1000 toneladas de óleo, número de meses de colheita e rendimento do óleo por hectare são apresentadas na Tabela 2 (SLUSZZ; MACHADO, 2006).

Tabela 2 Características de algumas culturas oleaginosas

Espécie	Teor de óleo (%)	Demanda de área média cultivada (ha) para produção de 1000 t. de óleo	Meses de colheita/ano	Rendimento (t. óleo/ha)
Girassol	38,0 a 48,0	1.090	3	0,5 a 1,9
Mamona	45,0 a 50,0	1.400	3	0,5 a 0,9
Soja	18,0	2.850	3	0,2 a 0,4
Algodão	15,0	6.250	3	0,1 a 0,2
Pinhão Manso	32 a 35			2,0
Nabo Forrageiro	35		4	0,4 a 0,6
Dendê	22,0	200	12	3,0 a 6,0
Amendoim	40,0 a 43,0	1.420	3	0,6 a 0,8
Macaúba	55,6(amêndoa)	250	5	4,0

### 3.3.1.5 Seleção das fontes de biodiesel

A análise da seleção de matérias-primas para a produção de biodiesel envolve aspectos relevantes como grande teor de óleo por área e por período de cultivo; a cultura deve apresentar um balanço energético favorável; o preço da matéria-prima deveria ser compatível com a necessidade de fornecer biodiesel com preços equivalentes ao diesel; o subproduto de extração do óleo deve ser aproveitado sempre que possível na alimentação humana ou animal; a cultura oleaginosa deve ser parte da rotação de culturas regionais e o biodiesel produzido deve atender as especificações dos motores (TEIXEIRA; MORALES, 2008).

As principais matérias-primas utilizadas são: a soja, a mamona, o dendê, entre outras. A soja tem potencial para oferecer todo o óleo necessário mesmo para a mistura dos 5%, porém ela sofre restrições de natureza econômica. A mamona é uma cultura que apresenta viabilidade para dar sustentabilidade aos assentamentos rurais no semi-árido, sendo a base de uma das cadeias produtivas do semi-árido. Outras oleaginosas vêm sendo testadas

em plantas experimentais como o girassol, o algodão, o amendoim, o nabo forrageiro e o milho (TEIXEIRA; MORALES, 2008).

A Inclusão de outras biomassas na cadeia produtiva do biodiesel não é somente um fator para se atender o mercado mas um fator de suma importância para regionalizar a produção, concentrada atualmente na região Centro-Sul do país. No intuito de que essa diversificação de matérias-primas aconteça, pesquisas utilizando-se plantas com elevado rendimento de óleo estão sendo realizadas, podendo ser citada a palma-de-óleo (dendê), o pinhão-manso e a macaúba (EMBRAPA, 2012).

O cultivo de matérias-primas e a produção industrial de biodiesel tem grande potencial de geração de empregos, promovendo, dessa forma, a inclusão social, especialmente quando se considera o amplo potencial produtivo da agricultura familiar. No semi-árido brasileiro e na região Norte, a inclusão social é ainda mais premente e pode ser alcançada com a produção de biodiesel de mamona e de palma (dendê) (PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BIODIESEL, 2005).

### **3.4 A Macaúba**

Almeida et al. (2011), citando Lorenzi et al. (2006) descreve que a macaúba pertence à família Arecaceae, a espécie *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart, sendo encontrada em grande parte do Brasil e amplamente distribuída nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais e afirma que o produto economicamente mais expressivo desta palmeira é o fruto, principalmente devido aos óleos que produzem, fornecendo em torno de 30% de seu peso total, sendo seu potencial econômico semelhante ou superior ao de plantas mais usadas. O óleo de macaúba pode ser extraído da polpa e da amêndoa do fruto, porém existem diferenças quanto à composição e utilidades

dos tipos de óleo. O óleo da polpa do fruto é vermelho amarelado eo óleo da amêndoa é transparente. Da amêndoa extrai-se um óleo que representa em torno de 15% do total de óleo da planta, rico em ácido láurico e oléico, tendo potencial para utilizações nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética (HIANE et al.,2005).

Almeida et al. (2011) destaca que a macaúba é uma palmeira nativa das florestas tropicais cujo estipe atinge de 10 a 15 metros de altura e 20 a 30 centímetros de diâmetro. A região dos nós é coberta de espinhos escuros, pontiagudos com cerca de 10 centímetros de comprimento. O estipe é coberto pelas bases dos pecíolos, que permanecem aderidas a este por muitos anos. As folhas verdes, ordenadas em diferentes planos dando um aspecto plumoso à copa, são pinadas com comprimento variando de 4 a 5 metros, apresentando aproximadamente 130 folíolos de cada lado e espinhos na região central (ARBOLES..., 2005; INTERNATIONAL CENTER FOR TROPICAL AGRICULTURE- CIAT, 2014; GRUPO VERDE, 2005; LORENZI, 2006; MIRANDA et al., 2001; MISSOURIBOTANICAL GARDEN, 2005; TEIXEIRA, 1996).

Entre as folhas destaca-se a espata de até 2,0 metros de comprimento, sendo as inflorescências amareladas e os cachos de frutos de tom marrom-amarelado. A inflorescência é em espádice, com 50 a 80 centímetros de comprimento, pendente, protegida por espata de acúleos castanhos. As flores de coloração amarelo-claro são unissexuais e ambos os sexos aparecem numa mesma inflorescência. As flores femininas nascem na base da inflorescência e as masculinas no topo. Os frutos são esféricos ou ligeiramente achatados, em forma de drupa globosa com diâmetro variando de 2,5 a 5,0 centímetros. O epicarpo rompe-se facilmente quando maduro. O mesocarpo é fibroso, mucilaginoso, de sabor adocicado, rico em glicérido, de coloração amarelo ou esbranquiçado, comestível. O endocarpo é fortemente aderido à polpa

(mesocarpo), com parede óssea enegrecida e as amêndoas oleaginosas, comestíveis e revestida de uma fina camada de tegumento. Cada fruto contém, geralmente, uma semente envolvida por endocarpo duro e escuro com aproximadamente 3 mm de espessura (BONDAR, 2005; CIAT, 2014; GRAY, 2005; HENDERSON; GALEANO; BERNAL, 1995; SILVA, 1994).

A Figura 6 mostra uma palmeira Macaúba (*Acrocomiaaculeata* (Jacq) *Loddex Mart*).



Figura 6 Palmeira Macaúba (*Acrocomiaaculeata* (Jacq) *Loddex Mart*)

Considerando-se sua dispersão e semelhanças existentes entre as palmeiras do gênero *Acrocomia*, Bondar (2005) observa que existem diferentes nomes regionais para designar tais palmeiras como, por exemplo: mucujá, mocujá, mocajá, macaúba, macaíba, macaiúva, bacaiúva, umbocaiúva, imbocaiá ou coco-de-espinhos.

Segundo o pesquisador da Embrapa Agroenergia (Brasília, DF), Leonardo Bhering, esta palmácea se destaca pelo seu potencial para a produção de grandes quantidades de óleo por unidade de área, além da possibilidade de utilização em sistemas agrosilvopastoris. Existem vários relatos de utilização

tradicional da macaúba como fonte de óleo para fins alimentícios, fabricação de sabões e queima para fins de iluminação e aquecimento. Essa palmeira apresenta significativo potencial de produção devido ao elevado teor de óleo e capacidade de adaptação a densas populações. As produtividades potenciais por área assemelham-se à do dendê, podendo chegar a mais de 4 mil quilos de óleo por hectare (BHERING, 2010).

Ainda segundo Bhering (2010),

Assim como ocorre com o dendê, os frutos devem ser processados logo após a colheita, pois se degradam rapidamente, aumentando a acidez e prejudicando a produção do biocombustível. As tortas produzidas a partir do processamento da polpa e da amêndoa são aproveitáveis em rações animais com ótimas características nutricionais e boapalatabilidade.

### **3.4.1 Composição do fruto da macaúba**

O fruto é a parte mais importante da planta, cuja polpa é consumida *in natura* ou usada para extração de gordura comestível; a amêndoa fornece óleo claro com quantidades semelhantes ao da azeitona (BHERING, 2009).

Os frutos são formados por cerca de 20% de casca, 40% de polpa, 33% de endocarpo e 7% de amêndoa. Os teores de óleo são em torno de 60% na polpa e de 55% na amêndoa, sendo que, como o do dendê, são extraídos dois tipos de óleo da macaúba. Da amêndoa é retirado um óleo fino que representa aproximadamente 15% do total de óleo da planta, rico em ácido láurico (44%) e oléico (26%), tendo potencial para utilizações nobres na indústria alimentícia, farmacêutica e de cosméticos (BERHING, 2010).

A frutificação ocorre durante todo o ano e os frutos amadurecem, principalmente, entre os meses de setembro e janeiro. Os principais polinizadores são coleópteros das famílias *Curculionidae*, *Nitidulidae* e

*Escarabaeidae*. A inflorescência é visitada pelas abelhas do grupo *Trigonia*, que coletam o pólen das flores masculinas e polinizam as flores femininas (HENDERSON; GALEANO; BERNAL, 1995; SCARIOT, 1998).

O fruto fresco possui características intrínsecas que dificultam o despulpamento automatizado, sendo que a secagem artificial dos frutos seria uma alternativa para melhorar esse processo, mas corre-se o risco de alterar indesejavelmente a qualidade do óleo, aumentando a acidez e promovendo a formação de compostos de degradação (SOUZA et al., 2010).

Vários fatores contribuem para que os valores encontrados de certas características da composição dos frutos da macaúbaseja discrepante. Um deles relaciona-se à colheita do fruto que, ao amadurecer, se solta do cacho e cai no chão, onde a polpa pode ser atacada por microrganismos e sofrer deterioração, modificando as relações de massa entre as diversas partes do fruto. O tempo decorrente entre a colheita do fruto e sua análise em laboratório é outro fator, juntamente com o efeito que poderá ser causado pela diferença de variedades e de grau de maturação (SZPIZ et al., 1989).

Segundo o Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais- Cetec (1983), o teor de óleo no fruto fresco chega a 16,2% com umidade de 36,5% e do fruto seco 25,5% óleo. Hianeet al. (2005) por outro lado, indicam que esta percentagem de óleo em g 100 g<sup>-1</sup>, pode variar entre a polpa (16,5%) e a farinha da polpa (19,3%).

### **3.4.2 Aproveitamento da macaúba: vantagens e desvantagens**

Os frutos da macaúba fornecem dois tipos de óleo economicamente importantes: o óleo da polpa e o óleo da amêndoa (SZPIZ et al., 1989). As tortas produzidas a partir do processamento da polpa e da amêndoa são aproveitáveis em rações animais com ótimas características nutricionais e

boapalatabilidade. Tem-se, ainda, como importante subproduto o carvão produzido a partir do endocarpo (casca rígida que envolve a amêndoa), que apresenta elevado poder calorífico. Pesquisas publicadas na Revista FAPESP de Dezembro de 2002 mostraram que as cascas, secas e trituradas, podem ser utilizadas como fonte valiosa no combate à desnutrição infantil, por terem teor de ferro quatro vezes mais elevado do que a multimistura, além de concentrações razoáveis de cálcio e fosfato (BHERING, 2009).

#### **3.4.2.1 Vantagens**

As vantagens advindas do cultivo da macaúba, além da obtenção de insumos energéticos ou alimentícios, residem ainda no possível aproveitamento dos espaços desocupados entre as palmeiras com plantios intercalares de outras oleaginosas, ou de culturas para fins alimentícios.

Uma grande vantagem da macaúba é a possibilidade da produção consorciada com outras espécies. Podem ser produzidos alimentos (feijão, milho, etc.) durante a implantação da cultura e após quatro anos, quando as palmeiras atingirem a altura de 7 a 10 metros e estiverem em produção normal de frutos, pode-se plantar capim para criar gado. É um sistema integrado com bom rendimento, pois o gado se alimenta do capim e dos frutos que, eventualmente, caem das árvores e o esterco produzido pelos animais fertiliza as palmeiras (BHERING, 2009).

#### **3.4.2.2 Desvantagens**

A macaúba apresenta duas características menos favoráveis: sazonalidade e maturação irregular dos frutos no cacho. A safra de macaúba se estende de setembro a janeiro, o que exigiria um cultivo alternativo com safra

oposta para manter o funcionamento de uma fábrica. A maturação irregular reduz o teor de óleo no cacho, pois uma colheita única incluiria frutos maduros, semi-maduros e imaturos, e resulta em muito menos óleo do que os cálculos sugerem. Todavia, é possível estender a safra de palmeiras com adubação e irrigação apropriadas (CETEC, 1983; CLEMENT; LERAS PÉREZ; VAN LEEUWEN, 2005; FURLAN, 2006).

O processamento da macaúba compreende diversas fases que vão desde a produção e colheita do coco até o beneficiamento final dos produtos derivados. A etapa de pós-colheita do fruto é ainda muito pouco estudada e a extração do óleo é feita aplicando-se tecnologias adaptadas de outras oleaginosas. Estes fatores contribuem para a baixa qualidade do óleo comercializado no cerrado brasileiro. Estudo conduzido por Mariano, Couri e Freitas(2008) mostrou que o óleo do coco da macaúba pode atingir valores de ácidos graxos livres acima de 30% em poucas semanas após queda do cacho.

### **3.4.3 Características do óleo de macaúba**

Segundo Szpizet al. (1989), a macaúba (*Acrocomiaaculeata*) é uma matéria prima promissora para a obtenção de óleos vegetais tendo em vista seu alto teor de óleo na polpa (60 a 70%, em base seca) e na castanha (40 a 50%, em base seca) e sua elevada produtividade em relação aos óleos comercializados como a soja. O óleo da polpa de macaúba possui um acentuado grau de insaturação cuja composição em ácidos graxos o consagra entre os óleos de alta qualidade para fins comestíveis, principalmente em razão do alto teor de ácido oléico (53 a 55%). Já o óleo da castanha de macaúba apresenta alto teor de ácidos saturados, principalmente o ácido láurico (40 a 45%) e palmítico (10 a 15%) (HIANE, 2005; NOVAES 1952).

Os óleos vegetais podem ser classificados em: saturado quando constituído de glicerídeos derivados de ácido láurico, insaturados devido os glicerídeos serem provenientes de ácido oléico e ácido palmítico e polinsaturados quando os glicerídeos são formados principalmente por ácido linoléico e ácido linolênico (CETEC, 1983).

As análises de algumas características físico-químicas revelam a composição dos óleos vegetais e sua qualidade (CETEC, 1983). Entre as características, tem-se a acidez, que é uma das que precisa ser avaliada para a melhor aplicação do óleo, pois reflete principalmente as condições de armazenamento a que o material foi submetido, sendo necessária sua modificação para o aproveitamento na indústria química. Tal característica tem importante impacto sobre seu preço e as diferenças observadas na acidez do óleo não são normalmente características do genótipo (ARAÚJO et al., 2006).

De acordo com Cetec (1983), algumas características dos óleos da macaúba (amêndoa e polpa) são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 Características dos óleos de macaúba

Características	Amêndoa da Macaúba	Polpa da Macaúba
Teor de ácidos graxos livres (oléico, %)	0,2-0,7	0,3-1,0
Massa específica 25° C $\text{g} \cdot (\text{cm}^3)^{-1}$	0,9176	0,9256
Viscosidade a 37,8° C (CSt)	35,2	46,4

Os valores do poder calorífico do epicarpo, mesocarpo (após a extração do óleo) e endocarpo de macaúba, em  $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ , são, respectivamente 4378, 3783 e 4379. Já os valores encontrados de massa específica para o óleo da amêndoa foram de  $(0,913 \text{g} \cdot \text{cm}^3)^{-1}$  e para o óleo da polpa de  $(0,908 \text{g} \cdot \text{cm}^3)^{-1}$  (AMARAL, 2007).

### 3.4.4 O biodiesel de óleo de macaúba

O óleo extraído da polpa da macaúba, com maior potencial para a fabricação de biodiesel, é dominado por ácido oléico (53%) e palmítico (19%) e tem boas características para o processamento industrial, mas apresenta sérios problemas de perda de qualidade com o armazenamento. Assim, como ocorre com o dendê, os frutos devem ser processados logo após a colheita, pois se degradam rapidamente, aumentando a acidez e prejudicando a produção de biocombustível (BHERING, 2009).

#### 3.4.4.1 Características físico-químicas dos ésteres etílicos e metílicos do óleo de macaúba

A Tabela 4 apresenta algumas características físico-químicas dos ésteres etílicos e metílicos de macaúba, de acordo com Rodrigues (2007).

Tabela 4 Características dos ésteres etílicos e metílicos de macaúba

BIODIESEL DE MACAÚBA	Metílico (amêndoa)	Etílico (amêndoa)	Metílico (mesocarpo)	Etílico (mesocarpo)
Densidade relativa 25° C (óleo/água)	0,8788	0,8688	0,8734	0,8567
Viscosidade cinemática 40° C CSt	3,0986	3,3717	4,525	4,782
Ponto de fulgor °C	115	122	139	146

### **3.5 Estudos experimentais realizados**

#### **3.5.1 Avaliação do desempenho e das emissões de biodiesel e misturas em motor de Ignição por Compressão para aplicação em geração de energia elétrica**

Wilhelm et al.(2009) avaliaram o desempenho em bancada dinamométrica e as emissões gasosas geradas a partir do uso de biodiesel metílico de óleo de soja (B100) e de suas misturas com óleo diesel metropolitano (500 ppm de enxofre), nas proporções de 60 e 80% (B60 e B80, respectivamente). O motor usado nos ensaios faz parte de um sistema de grupo gerador de energia elétrica, fabricado pela MWM, de potência nominal de 132 kW a 1780 rpm. Nos testes de motor de ignição por compressão, a potência e o torque foram analisados em regime de 1850 rpm. Os resultados da variação de torque do motor em diferentes condições de carga, obtidos respectivamente com aplicação de óleo diesel, B100 e das misturas B60 e B80, indicaram que em plena carga, o torque máximo foi de 699,4 Nm para o diesel e 623,63 Nm para o B100. Considerando todo o regime de carga, a redução média de torque para o biodiesel foi de 10,94%. As misturas B80 e B60 apresentaram respectivamente 7,20 e 7,79% de redução média do torque nas condições do experimento. Os ensaios de variação de potência do motor em diferentes condições de carga, com aplicação de óleo diesel metropolitano, em plena carga, mostraram uma potência máxima de 128,10 kW para o diesel e de 116,05 kW para o B100. Considerando todo o regime de carga, a redução média de potência para o B100 foi de 10,16% e para as misturas (B80 e B60), foi 7,26 e 8,27% respectivamente. Explicando essa redução, de acordo com Utlu e Koçak (2008), a viscosidade e a massa específica superior do biodiesel, em relação ao diesel, contribuem para a diminuição das eficiências térmica e de combustão devido à dificuldade de

atomização do biocombustível. Segundo Al-Widyan, Tashtoush e Abu-Qudais(2009) as misturas biodiesel/diesel queimam com maior eficácia, resultando em maior eficiência térmica do motor, mesmo provocando um pequeno aumento no consumo de combustível. Para as emissões dos gases de combustão, monitorados de forma online durante os testes com os combustíveis (diesel padrão, biodiesel puro e misturas), verificou-se que, em média, houve redução superior a 20% de Hidrocarbonetos totais para B100, B80 e B60 em relação ao diesel. No entanto, a redução com B100 foi de apenas 20,55%. A fuligem apresentou para o B100 e suas respectivas misturas uma redução média de 75% em relação ao óleo diesel padrão. A emissão de gases  $\text{NO}_x$ , tanto do B100 quanto de suas misturas, foi superior ao diesel em mais de 10%. Os resultados das medidas de  $\text{NO}_x$  foram realizadas em regime de carga constante a 1850 rpm e com avanço de injeção nas condições originais do motor. Segundo Zhang eBoehman (2007), a emissão de  $\text{NO}_x$  de biodiesel e de suas misturas com diesel depende das condições de operação do motor. Ou seja, em condições de baixa carga, a emissão de  $\text{NO}_x$  é levemente inferior ao diesel e, em alta carga, superior. Segundo o mesmo autor, o ajuste de parâmetros do sistema de injeção, pode diminuir a emissão de gases  $\text{NO}_x$  do biodiesel e de suas misturas quando usados em motor de ciclo diesel.

### **3.5.2 Avaliação de emissões de poluentes de um motor de Ignição por Compressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível**

Maziero et al. (2006) avaliaram os efeitos da substituição do óleo diesel por éster etílico de óleo de girassol (EEOG) como combustível em um motor de Ignição por Compressão em relação aos níveis de emissões de poluentes. Os ensaios foram realizados em bancada dinamométrica de acordo com a norma

NBR 14489 (Ciclo 13 pontos), utilizando um analisador de gases de escapamento. Nos valores das emissões ponderadas observaram-se diferenças percentuais de -32,2% para CO; -4,8% para CO<sub>2</sub>; + 5,7% para NO<sub>x</sub>; - 31,0% para HC e - 41,0% para MP com o uso de EEOG, enquanto que a potência ponderada do motor diminuiu 10,0% e o respectivo consumo específico de combustível aumentou em 21,8%. Quanto aos níveis de emissões, com exceção dos níveis de NO<sub>x</sub> que foram mais elevados, a utilização de EEOG reduziu significativamente os níveis de CO, HC e MP. As reduções das emissões específicas de CO e HC podem ser explicadas pela presença de oxigênio na molécula de biodiesel, uma vez que a disponibilidade deste comburente na câmara de combustão desloca a reação de queima do combustível no sentido de produzir maiores quantidades de CO<sub>2</sub>. No caso do biodiesel, como simultaneamente se observa redução nas emissões de CO<sub>2</sub>, a eficiência de queima pode ter se reduzido, apesar da diminuição observada da concentração de HC nos gases de escapamento.

### **3.5.3Influência do uso do biodiesel em um motor Mercedes-Benz OM904 LA tanto no que se refere ao seu desempenho e emissão de poluentes**

Várias misturas de biodiesel foram preparadas com ésteres metílico e etílico de óleos de soja e mamona com óleo diesel metropolitano e utilizadas na realização de ensaios comparativos de desempenho do motor Mercedes-Benz OM904 LA com sistema de injeção UPS (*Unit Pump System*) operando em plena carga. Seguindo o ciclo Euro 3 de 13 pontos, foram avaliadas também as mudanças nos seus resultados de emissões (PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BODIESEL, 2009).

Foram escolhidos, para a realização dos testes, os monoésteres de óleo de mamona e de soja, levando em conta a estrutura molecular diferenciada do óleo de mamona e a grande produção agrícola de soja no país.

Os resultados com mistura até B100 de biodiesel de soja em diesel mostraram um aumento médio do consumo específico de 0,116% para cada 1% de biodiesel na mistura. Os resultados com biodiesel de mamona (até B20) indicaram um aumento médio de 0,144% para cada 1% de biodiesel na mistura. Considerando o poder calorífico dos combustíveis, em ambos os casos houve aumento da eficiência de conversão de energia química em mecânica de aproximadamente 3% para biodiesel de soja e de aproximadamente 5% para biodiesel de mamona relativamente à fração de diesel substituída.

Os testes de emissões de 13 modos com misturas de biodiesel de soja mostraram um aumento da emissão específica de NO<sub>x</sub> de 0,186 % para cada 1% de biodiesel. Para o mesmo aumento de biodiesel, as emissões foram reduzidas em 0,277% em CO, 0,49% em HC e 0,25% em material particulado. Com biodiesel de mamona, os resultados foram aumento de 0,209% em NO<sub>x</sub> e redução de 0,40% em CO para cada 1% de biodiesel na mistura, sem variações significativas em HC ou material particulado, usando-se até B20 (PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BIODIESEL, 2009).

#### **3.5.4 Uso de óleo de cozinha reciclado em um motor diesel de injeção direta em um trator**

Mohebbiet al. (2012) testaram um motor marca Motorsazan MT4.244 de trator agrícola de 3,99 litros, turbinado, 4 cilindros, injeção direta utilizando diesel e biodiesel de óleo de cozinha usado. O aumento do percentual de biodiesel na mistura combustível reduziu o torque e a potência do motor. Com B100, a perda de potência e torque comparada ao diesel combustível foi de

5,3%. O consumo específico de combustível no freio aumentou quando o percentual de biodiesel na mistura aumentou, aproximadamente 13% mais alto com B100 do que quando utilizando diesel combustível. A eficiência térmica no freio do motor não foi afetada significativamente pela combustão das misturas combustíveis. A máxima eficiência térmica no freio foi obtida para 5% de mistura. Na condição de plena carga, o aumento de biodiesel na mistura combustível reduziu os materiais particulados mas aumentaram as emissões de  $\text{NO}_x$ . O valor do aumento de  $\text{NO}_x$  foi de 16% enquanto a diminuição de material particulado foi em torno de 70% quando se usou B100 ao invés de diesel combustível.

### **3.5.5 Desempenho e emissões de um motor diesel agrícola alimentado com misturas de diesel e ésteres metílicos diferentes**

Milán et al. (2010) investigaram o desempenho de um motor diesel agrícola de injeção indireta marca Kubota, potência de 19,7 kW, alimentado com misturas de biodiesel e éster metílico obtido da mistura de 75% em volume de óleo de girassol e 25% de óleo de cozinha usado de acordo com a norma OECD, código de teste 2, para teste de desempenho de tratores. Diferentes misturas (B10, B20, B50, B75, B100) foram testadas e mostraram que não houve uma redução significativa na potência de saída e no torque quando se usou misturas inferiores a B50. A potência do motor (kW) para as diferentes misturas de combustíveis e nos diferentes pontos de teste do motor foram em média 12,25 para o óleo diesel; 12,20 para B10; 12,08 para B20; 12,07 para B30; 11,75 para B50; 11,68 para B70 e 11,46 para B100. Os valores de torque (N.m) foram, em média, 49,88; 49,42; 49,17; 48,96; 47,74; 47,69 e 46,07 para óleo diesel, B10, B20, B30, B50, B70 e B100, respectivamente. Os consumos de combustíveis com biodiesel foram mais elevados do que quando se utilizou

diesel mas essas diferenças não foram marcantes até misturas de 30%. As emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) mostraram-se menores quando a concentração de biodiesel aumentou, principalmente com misturas de 70% e de 100%. Na média, as emissões com B100 foram 8% menores do que aquelas quando se utilizou diesel combustível puro. As emissões de monóxido de carbono (CO) foram menores e aumentaram a uma razão menor com a concentração de oxigênio da exaustão quando as misturas de biodiesel foram iguais ou mais altas do que 50%. As emissões específicas no freio de CO cresceram exponencialmente com a concentração de oxigênio nos gases de exaustão, sendo B50, B70 e B100 as misturas combustíveis com as menores emissões. As razões de emissões de CO com B100 e B70 foram 48% menores do que a do diesel puro e com B50 foi 55% menor do que com diesel combustível.

### **3.5.6 Efeitos das misturas de diesel fóssil e biodiesel no desempenho e nas emissões de motores de tratores agrícolas**

Tomicet al. (2013) investigaram a influência do biodiesel de óleo de girassol misturado com óleo diesel mineral no desempenho e nas emissões de gases de exaustão de um motor diesel marca Mahindra NE 462R de 4 cilindros, injeção direta, com potência nominal de 48,4 kW a 2200 r.p.m. e torque máximo de 217,4 N.m a 1398 r.p.m. de um trator agrícola. As misturas combustíveis testadas foram B0, B15, B25, B50, B75 e B100. Os testes de desempenho foram realizados de acordo com o teste OECD código 2 e as emissões dos gases de exaustão foram testadas de acordo com a norma ISO 8178-4 C1. O uso do diesel combustível produziu uma potência nominal de 44,01 kW a 2200 r.p.m. As potências nominais produzidas quando se utilizou B15, B25, B50, B75 e B100 foram, respectivamente, 44,25; 42,85; 42,26; 41,41 e 41,21 kW. Em relação ao

diesel mineral, em termos percentuais, essas reduções de potência foram de 1,51%, 1,21%, 2,86%, 5,36% e 5,74% respectivamente. As emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram com o aumento da carga do motor. Comparando-se com o diesel fóssil, os combustíveis B15, B25, B50, B75 e B100 causaram reduções nas emissões de CO<sub>2</sub>, em média, de 2,05%, 5,01%, 5,91%, 7,70% e 8,99% respectivamente. O aumento da quantidade de biodiesel na mistura causou uma emissão de NO<sub>x</sub> elevada. Ao se comparar com o diesel fóssil, os combustíveis B15, B25, B50, B75 e B100 apresentaram emissões mais altas de NO<sub>x</sub>, em média, de 1,51%, 3,10%, 4,89%, 9,50% e de 11,38%, respectivamente. O aumento na carga levou ao aumento da emissão de CO, o que é consequência da redução da taxa de excesso de ar no cilindro do motor. As mais altas concentrações de CO foram verificadas quando se utilizou diesel fóssil e as mais baixas foram quando se utilizou B100. O diesel fóssil, o B15, o B25, o B50, o B75 e o B100 causaram reduções nas emissões de CO, em média, de 1,84%, 3,79%, 9,30%, 11,43% e 13,15%, respectivamente.

### **3.5.7 Desempenho e emissões de um motor diesel de trator alimentado com diesel marítimo e éster metílico de soja**

Gokalp, Buyukkayae Soyhan(2011) estudaram as propriedades do éster metílico de soja e suas misturas com diesel marítimo nas proporções de 5%, 20% e 50% em volume e, posteriormente, acionaram um motor diesel de 4 tempos, 4 cilindros, naturalmente aspirado, injeção, potência máxima de 40 kW a 2400 r.p.m. e torque máximo de 205 N.m a 1600 r.p.m.com esses combustíveis. Não houve diferença significativa nas potências medidas de saída do motor entre o diesel marítimo e o combustível B5. A redução máxima na potência do motor para B20, B50 e B100 foi de 2,35%, 3,0% e 5,0%, respectivamente. O torque máximo do motor em plena carga foi obtido na

rotação de 1600 r.p.m. para cada tipo de combustível. Em relação ao diesel, o torque quando se utilizou B5 foi bastante semelhante. A queda de torque média entre o diesel e quando se utilizou B20, B50 e B100 foi de 2,29 N.m, 3,68 N.m e 6,72 N.m, respectivamente. Em 1600 r.p.m., o consumo específico de combustível no freio foi de 214 g.kWh<sup>-1</sup> quando o diesel marítimo foi utilizado e de 240 g.kWh<sup>-1</sup> quando se utilizou B100. O aumento nas emissões de NO<sub>x</sub> foi proporcional à quantidade de biodiesel na mistura combustível. No caso de B100, o aumento da emissão de No<sub>x</sub> foi, em média, de 15,5% em relação ao diesel marítimo. Para B20, esse aumento de emissão de NO<sub>x</sub> foi de 4,5% e para B50 foi de 10%. A redução da opacidade da fumaça foi de 62% com B50 e de 74% com biodiesel puro. O nível de emissão de CO diminuiu com o aumento do percentual de biodiesel no diesel. Em velocidades baixas do motor, as emissões de CO com B5, B20, B50 e B100 foram, respectivamente, 3%, 13%, 27% e 39% mais baixas do que quando se utilizou diesel marítimo. Na rotação de 1800 r.p.m. em plena carga, as emissões de CO foram para o diesel marítimo de 725 ppm enquanto que para o éster metílico de soja foram de 475 ppm.

### **3.5.8 Análise do desempenho e das emissões do éster metílico de óleo de algodão em um motor diesel**

Aydine Bayindir (2010) testaram as misturas B5, B20, B50, B75 e B100 do éster metílico de óleo de algodão em comparação ao óleo diesel mineral em um motor ciclo diesel monocilíndrico tipo Rainbow – 186 Diesel, de potência máxima de 10 HP, taxa de compressão 18:1, 4 tempos, injeção direta e refrigerado a ar sob várias velocidades do motor e em carga plena. O uso de B5 aumentou levemente o torque do motor em velocidades médias e mais altas do motor. Em carga plena, os testes foram feitos nas velocidades do motor de 1250, 1500, 1750, 2000, 2250 e 2500 rpm. A variação de torque entre os instantes em

que se utilizou diesel mineral e B100 na rotação de 2500 rpm foi da ordem de 16,16%, ficando em torno de 35 Nm quando se utilizou diesel mineral e aproximadamente 30 Nm quando se utilizou B100. Não houve diferenças significativas quanto ao desempenho do motor quando se utilizou as misturas B5 e B20 quando comparadas ao diesel mineral. Os valores máximos de potência foram obtidos também em torno de 2500 rpm mas foi menor do que quando se utilizou diesel mineral, isto é, aproximadamente 7,5 kW com diesel mineral e 6,0 kW com B100. As diferenças de potência máxima entre quando se utilizou diesel mineral e quando se utilizou misturas de biodiesel aumentaram com o aumento da quantidade de biodiesel na mistura. Em plena carga, os menores consumos específicos de combustível no freio foram observados em 2000 rpm quando se utilizou diesel mineral, B5 e B20, sendo que para diesel mineral esse consumo foi de 168 g/kW.h, de 174 g/kW.h com B5 e de 179 g/kW.h com B20. Já com B50, B75 e B100, esses valores foram de 194 g/kW.h, 198 g/kW.h e 205 g/kW.h, respectivamente. As emissões de CO diminuíram com o uso de biodiesel, ficando, na rotação de 1750 rpm, em torno de 750 ppm com diesel mineral e 250 ppm com B100. Ao contrário de resultados obtidos por muitos pesquisadores, as emissões de NO<sub>x</sub> diminuíram em todas as misturas, inclusive com B100, exceto com B5, sendo, na rotação de 1750 rpm, ao redor de 380 ppm com o diesel mineral e de 320 ppm com B100. Na rotação de 1750 rpm, as emissões de SO<sub>2</sub> com diesel mineral foram em torno de 20 ppm. As emissões de SO<sub>2</sub> foram bastante menores para biodiesel. O biodiesel puro B100 não emitiu SO<sub>2</sub>. Quanto à opacidade da fumaça, em 1750 rpm, foi de aproximadamente 65% com B100 e de aproximadamente 52% com diesel mineral.

### **3.5.9 Um teste em motor diesel ID alimentado com ésteres metílicos de óleo de dendê usado**

Sharon et al. (2012) testaram um motor ciclo diesel, injeção direta, 4 tempos, potência máxima de saída 5,2 kW, alimentado com biodiesel de óleo de palma usado nas proporções B25, B50 e B75 e com diesel mineral. O experimento foi realizado em velocidades constantes de 1500 rpm, variando as cargas entre 20% e 100%. A eficiência térmica no freio de todos os combustíveis testados aumentou com o aumento da carga. Em plena carga, a eficiência térmica no freio quando se utilizou diesel mineral, B25, B50, B75 e B100 foram 30,89%, 30,56%, 29,22%, 29,58% e 28,65%, respectivamente. O consumo específico de combustível no freio foi, em plena carga, de 274,90 g/kW.h com diesel e de 314,91 g/kW.h com B100. Com B25, B50 e B75, os consumos específicos no freio foram, respectivamente, 2,95%, 8,93% e 9,25% maiores do que quando se utilizou diesel mineral. As emissões de CO, em plena carga, quando se utilizou B100, B75, B50 e B25 foram, respectivamente, 52,9%, 35,2%, 35,2% e 21,4% menores do que quando se utilizou diesel mineral. Na potência no freio de 5,2 kW, a emissão de CO foi de, aproximadamente, 0,17% em volume com diesel mineral. As emissões de CO<sub>2</sub> quando se utilizou o biodiesel e suas misturas foi maior do que quando se utilizou diesel mineral. Na potência de freio de 5,2 kW, a emissão de CO<sub>2</sub> com B100 foi de aproximadamente 6,5 % em volume. A emissão de NO<sub>x</sub> aumentou com o aumento da carga, sendo que as emissões quando se utilizou B100, B75, B50 e B25 foram maiores do que quando se utilizou diesel mineral. A mistura B25 apresentou emissão de HC 9,52% mais alta do que com diesel mineral. B50, B75 e B100 apresentaram emissões de HC mais baixas em 9,53%, 19,05%, 38,09%, respectivamente, do que quando se utilizou diesel mineral. A mistura B25 produziu 9,8% a mais de fumaça do que o diesel mineral enquanto B75 e B100

produziram uma densidade de fumaça 10% e 19% mais baixa do que com diesel mineral, em plena carga. Na potência do freio de 5,2 kW, B25 apresentou uma densidade de fumaça de aproximadamente 60 HSU (*HartridgeSmoke Unit* – Unidade de Fumaça Hartridge), B50 de 55 HSU, B75 de 50 HSU, B100 de 45 HSU e o diesel mineral de 53 HSU.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado no Laboratório de Tratores e Motores do Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), na cidade de Lavras, Minas Gerais, em março e abril de 2016.

### **4.1 Material**

#### **4.1.1 Trator**

Os ensaios foram conduzidos utilizando-se um trator Valtra modelo A950 (Figura 7) equipado com um motor modelo AGCO Sisu Power 420DS, combustível diesel ou biodiesel B100 ANP – 07/2008, potência máxima de 90 cv (66,2 kW) a 2200 rpm (norma ISO 1585), torque máximo de 330Nm a 1400 rpm (norma ISO 1585), cilindrada total de 4400 cm<sup>3</sup>, 4 cilindros, turbo aspirado, sistema de injeção com bomba rotativa e injeção direta..

A tomada de potência é do tipo independente, com acionamento mecânico, velocidade rpm do motor – rpm da TDP de 540 rpm – 1890 rpm, Econômica 540 – 1594, 1000 – 274, potência máxima (cv) – rotação do motor 82cv – 2200 rpm. O trator utilizado para os ensaios é destinado a serviços gerais diversos próprios para pequenas e médias propriedades agrícolas.



Figura 7 Trator Valtra A950

#### 4.1.2 Dinamômetro

O motor de teste foi acoplado através da tomada de potência a um dinamômetro marca AW Dynamometer, modelo NEB 200 (Figura 8), no qual há a transformação da energia mecânica em calor por meio da utilização de um freio hidráulico, sendo o calor gerado nesse freio dissipado pela passagem de água de arrefecimento.



Figura 8 Dinamômetro AW Dynamometer NEB 200

### 4.1.3 Analisador de gases

Para realização das análises das emissões foi utilizado um Analisador Multigás Discovery G4 ALFATEST – G4(Figura 9).



Figura 9 Analisador Multigás Discovery G4 ALFATEST

O analisador de gases é um equipamento capaz de determinar o volume percentual de CO, CO<sub>2</sub>, HC e O<sub>2</sub> dos gases que são emitidos devido à combustão dos combustíveis nos motores de combustão interna.

Tais gases, fluindo por uma sonda, são captados através do duto de descarga do motor, sendo, em seguida, separados da água por meio de filtros e direcionados a um banco de medição onde um fecho de luz de raios infravermelho, gerado por um transmissor, é enviado através dos filtros óticos para os elementos de medição. Tais gases, no banco de medição, absorvem o fecho de luz em diversos comprimentos de onda segundo sua concentração.

Os gases  $H_2$ ,  $N_2$  e  $O_2$ , devido suas composições, não são capazes de absorver os raios emitidos e, portanto, não possibilitam que suas concentrações sejam medidas através do sistema infravermelho.

Entretanto, os gases  $CO$ ,  $CO_2$  e  $HC$ , contidos nesses gases, absorvem os raios infravermelhos em comprimentos de onda específicos. Um sensor químico é utilizado para se obter o percentual de oxigênio ( $O_2$ ) (ALFATEST, 2013a).

Para se analisar os gases emitidos pelo motor de ignição por compressão, foi necessária a utilização de um filtro de ar composto por um feltro de lã de rocha. Este filtro foi colocado na saída dos gases de descarga, antes da sonda do Analisador de Gases, fazendo com que os materiais particulados dos gases emitidos fossem retidos no mesmo, não alcançando tal Analisador.

Os campos de medições do Analisador de Gases Discovery G4 ALFATEST são os seguintes:

- a)  $HC$ : de 0 a 2000 ppm vol. (hexano);
- b)  $HC$ : de 0 a 4000 ppmvol (propano);
- c)  $CO$ : de 0 a 15% vol.;
- d)  $CO_2$ : de 0 a 20% vol.;
- e)  $O_2$ : de 0 a 25% vol.;
- f)  $NO_x$ : de 0 a 5000 ppm vol.

#### **4.1.4 Opacímetro**

Para as medições dos particulados, foi utilizado um Opacímetro Discovery OPA 495 ALFATEST, equipamento que atende à Norma NBR 12897 (ABNT, 1993) – Emprego do Opacímetro para Medição do Teor de Fuligem de Motor Diesel – Método de Absorção de Luz e certificado pelo

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO (Figura 10).



Figura 10 Opacímetro Discovery OPA 495 ALFATEST

O opacímetro é um equipamento utilizado para executar a medição da fumaça de gás de escapamento, sendo essa feita através da absorção da luz. A fumaça é captada por uma sonda que é introduzida no escapamento do veículo e levada até a câmara de medição, onde existe um emissor e um receptor de luz. O fecho de luz enviado pelo emissor é interceptado pela fumaça, sendo então medida a opacidade, determinada através da absorção da luz emitida (TECNOMOTOR, 2013).

Os opacímetros podem ser de fluxo parcial (de amostragem), onde a medição da fuligem do gás de escapamento compreende somente uma parte do fluxo total do gás, sendo feita através de um tubo de captação e uma sonda. Já nos opacímetros de fluxo total, a fonte de luz/receptor é montada de maneira que se obtenha uma leitura de todo o fluxo de gás de escapamento (TECNOMOTOR, 2013).

A fumaça do gás de escapamento dos motores diesel é formada, principalmente, por partículas suspensas no gás de escapamento que obscurecem, refletem ou refratam a luz. Essas partículas, na maior parte, são compostas de carbono com tamanho normalmente menor que 300 nm resultante do processo de combustão do motor (TECNOMOTOR, 2013).

Geralmente, a emissão de uma fumaça muito escura significa mistura rica, isto é, excesso de combustível, podendo ser causada pelo fato da bomba injetora e/ou dos bicos injetores estarem desregulados, os filtros estarem sujos e devido a outros componentes. A fumaça preta ou particulada é o principal fator para que seja realizada a análise de emissões nos motores diesel (TECNOMOTOR, 2013).

A coloração da fumaça pode ser um indicativo de sua composição. Normalmente, uma fumaça preta é sinal de excesso de combustível, uma fumaça branca é composta por vapor d'água condensado e combustível líquido não queimado e uma fumaça azul é aquela composta por gotículas resultantes da combustão incompleta de combustível e/ou óleo lubrificante (TECNOMOTOR, 2013).

As medições de opacidade são dadas em porcentagem (%) ou pelo coeficiente (k) em  $m^{-1}$ . Opacidade é a medida de absorção de luz sofrida por um feixe luminoso ao atravessar uma coluna de gás de escapamento, expressa em  $m^{-1}$ , entre os fluxos de luz emergente e incidente.

Os campos de medições do Analisador de Opacidade OPA 495 ALFATEST são os seguintes (ALFATEST, 2013b):

- a) opacidade: de 0 a 99,9%;
- b) opacidade: de 0 a 9,99  $m^{-1}$ ;
- c) conta-giros: de 300 a 9990 rpm;
- d) temperatura do óleo: de 20 a 150° C;
- e) temperatura dos fumos: de 20 a 400° C.

#### 4.1.5 Combustíveis

Atualmente, no Brasil, o diesel mineral comercial consiste de uma mistura contendo 7% de biodiesel adicionado ao diesel mineral puro (B7). Na execução dos ensaios, esse diesel com 7% de biodiesel (B7) foi considerado como combustível de referência, em relação ao qual todas as outras misturas combustíveis foram comparadas. Para facilitar o entendimento, as misturas combustíveis foram designadas, nesse trabalho, como (B7+20)- constituída de 80% de diesel B7 e 20% de biodiesel de óleo de macaúba, (B7+50)- constituída de 50% de diesel B7 e 50% de biodiesel de óleo de macaúba, (B7+80)- constituída de 20% de diesel B7 e 80% de biodiesel de óleo de macaúba, e B100 - constituída 100% de biodiesel de óleo de macaúba, sendo as mesmas avaliadas em comparação com o diesel mineral comercial B7.

Para se formar cada mistura combustível foi necessário misturar o percentual adequado de diesel e de biodiesel. Assim, para cada mistura, foi acrescentada a quantidade de óleo diesel correspondente.

Os valores de viscosidade dos combustíveis utilizados durante o experimento foram determinados utilizando-se um viscosímetro marca Logende propriedade da UFLA – Universidade Federal de Lavras.



Figura 11 Viscosímetro Logen

Para a determinação dos valores de poder calorífico dos combustíveis usados durante os testes, foi utilizado um calorímetro adiabático marca Parr modelo 1241 EA pertencente ao Laboratório de Ensino de Físico-química do Departamento de Química da UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais.

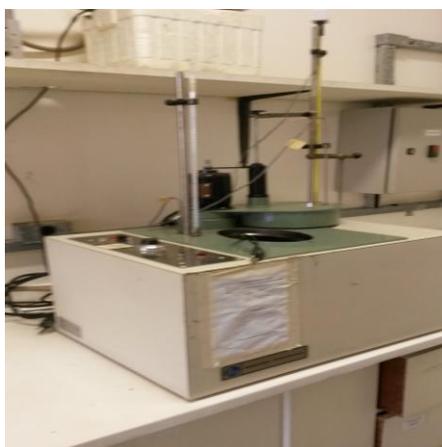


Figura 12 Calorímetro adiabático Parr 1241 EA

## 4.2 Métodos

No trabalho em questão, não foram avaliadas as condições dos componentes mecânicos internos do motor. A alimentação do motor diesel de injeção direta se deu em etapas distintas, sendo que primeiramente foi utilizado o diesel mineral (B7), disponível nos postos de abastecimento comerciais (tomando-se esse diesel como referência para a análise das diversas misturas do mesmo com as diferentes proporções de biodiesel). Há de se realçar aqui que esse diesel, tomado como referência durante a execução do experimento, contém 7% de biodiesel de matéria-prima não especificada. Em seguida, foram utilizadas misturas deste diesel tomado como referência com biodiesel de óleo de macaúba em diferentes proporções, assim descritas: diesel mineral comercial(B7),(B7+20), (B7+50), (B7+80)e (B100), sendo as mesmas equivalentes, respectivamente, a 100% de diesel(B7),80% de diesel (B7)e 20% de biodiesel de óleo de macaúba, 50% de diesel (B7)e 50% de biodiesel de óleo de macaúba, 20% de diesel (B7)e 80% de biodiesel de óleo de macaúbae 100% de biodiesel de óleo de macaúba.

Para a realização dos ensaios do motor, foram adotadas as metodologias estabelecidas pelasnormas NBR 14489 (ABNT, 2000) – Motor Diesel – Análise e Determinação dos Gases e do Material Particulado Emitidos por Motores do Ciclo Diesel – Ciclo de 13 pontos e NBR ISO 1585 (ABNT, 1996) - Veículos rodoviários – Código de ensaio de motores – Potência líquida efetiva antiga NBR 5484 (ABNT, 1985).

Os valores de temperatura e pressão atmosférica dos dias de realização dos experimentos são mostrados no Apêndice.

#### **4.2.1 Determinação das características físico-químicas dos combustíveis analisados**

A determinação das características físico-químicas dos combustíveis utilizados durante o experimento foi executada pelo Laboratório de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel da UFLA – Universidade Federal de Lavras e pelo Laboratório de Ensino de Físico-química do Departamento de Química da UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais.

A tabela 5 apresenta tais características físico-químicas.

Tabela 5 Características Físico-Químicas dos combustíveis

Combustível	Massa Específica (Kg.m <sup>-3</sup> )	Viscosidade dinâmica (cP) a 40° C	Viscosidade cinemática (c.St)	Poder calorífico superior (KJ.kg <sup>-1</sup> )	Poder calorífico inferior (KJ.kg <sup>-1</sup> )	Acidez (mg de NaOH/g )	Índice de Iodo
Diesel (B7)	0,85246	3,48	4,08	46500	43900	0,0673	58,6750
(B7+20)	0,82478	3,88	4,70	43200	40700	0,0574	47,8088
(B7+50)	0,83664	4,66	5,57	41000	38500	0,0385	64,1621
(B7+80)	0,85850	6,17	7,19	39900	37400	0,0386	86,2174
(B100)	0,8763	7,77	8,87	39400	36800	0,0580	66,2225

#### **4.2.2 Determinação da Potência Efetiva do Motor**

A potência efetiva do motor é a potência desenvolvida por um torque (valor fornecido pela bancada de testes) e corresponde ao produto desse torque pelo deslocamento angular na unidade de tempo.

Para os ensaios de potência, foi considerada a norma NBR ISO 1585 (antiga ABNT NBR 5484) (ABNT, 1996). Ela se aplica à avaliação do desempenho, observando, em particular, a apresentação das curvas de potência a plena carga em função da rotação do motor, isto é, somente para a avaliação da potência líquida - potência obtida em uma bancada de ensaio na saída da árvore de manivelas ou seu equivalente na rotação correspondente do motor, que no caso em questão foi na TDP do trator.

De acordo com tal norma, para a execução dos ensaios, as medições devem ser tomadas em um número tal de rotações do motor de modo que seja possível definir completamente a curva de potência no intervalo entre a menor e a maior das rotações do motor recomendadas pelo fabricante, devendo-se incluir nessa faixa de rotações aquela rotação na qual o motor produz sua potência máxima.

Segundo o fabricante do trator, tem-se a potência máxima de 90 cv (66,2 kW) a 2200 rpm e o torque máximo de 330Nm a 1400 rpm - NBR ISO 1585(ABNT, 1996).

Para a obtenção dos valores de potência, torque e rotação, o dinamômetro foi devidamente acoplado à TDP (Tomada de Potência) do trator.

### **4.2.3 Emissão de Gases**

#### **4.2.3.1 Determinação dos Níveis de Emissão de Gases**

Os ensaios com relação às emissões foram realizados de acordo com a norma NBR 14489 (ABNT, 2000) – Motor Diesel – Análise e Determinação dos Gases e do Material Particulado Emitidos por Motores do Ciclo Diesel – Ciclo de 13 pontos. Para assegurar a representatividade estatística dos resultados, foram realizados quatro conjuntos de medidas para cada combustível.

De acordo com a norma NBR 14489 (ABNT, 2000), o motor foi submetido a uma sequência de treze condições variadas de cargas e rotações, conhecido como Ciclo de 13 pontos, com fatores ponderais especificados. Durante a execução dos treze pontos do ciclo, tiveram instantes em que o motor operou em marcha lenta sem carga e em situações de rotação operacional de 540 rpm da TDP e em rotação intermediária de 324 rpm da TDP, sendo as cargas correspondentes aos percentuais de 10%, 25%, 50%, 75% e 100 % do torque máximo. Para cada condição de operação especificada pela norma, foram efetuados quatro conjuntos de ensaios de emissões, primeiramente com óleo diesel (B7) e, posteriormente, com as diferentes misturas de biodiesel de óleo de macaúba ((B7+20), (B7+50), (B7+80) e B100), de forma tal que foram determinados os níveis de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>) e o material particulado (MP), juntamente com a determinação de parâmetros de desempenho do motor (potência e torque) em função dos fatores de peso de cada ponto do ciclo de carga.

Um analisador de gases Discovery G4 – ALFATEST foi utilizado para a análise e determinação das emissões supracitadas.

Segundo a norma, define-se como rotação de marcha lenta aquela rotação sem torque especificada pelo fabricante do motor. A rotação nominal é a rotação máxima de plena carga permitida pelo regulador, conforme especificado pelo fabricante. Já a rotação intermediária é a rotação do torque máximo se esta estiver entre os limites de 60% e 75% da rotação nominal, caso contrário, considera-se o limite de 60%. Pelo fato do motor estar acoplado à TDP, considerou-se a rotação operacional do trator de 540 rpm da TDP e a rotação intermediária correspondente a 60% desse valor, isto é, 324 rpm da TDP.

Uma outra definição importante citada pela norma é a de regime constante. Define-se o regime constante como sendo aquele no qual o motor é submetido à ação de torque e rotação constantes, dentro de mais ou menos 50 rpm.

O ensaio foi realizado com o motor acoplado ao dinamômetro, determinando-se primeiramente o torque do motor a plena carga nas diferentes rotações indicadas pela norma. Durante o ciclo de 13 pontos, todas as emissões (CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub> e particulados) foram determinadas simultaneamente, estando o motor em regime constante.

#### **4.2.3.2 Determinação da Opacidade**

Para as medições da opacidade da fumaça, foi utilizado um Opacímetro Discovery OPA 495 ALFATEST, equipamento que atende à Norma NBR 12897 (ABNT, 1993) – Emprego do Opacímetro para Medição do Teor de Fuligem de Motor Diesel – Método de Absorção de Luz e certificado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO (Figura 10).

Os ensaios foram realizados conforme o método de aceleração livre, isto é, regime no qual o motor é submetido com o débito máximo de combustível. A norma adotada para a execução do ensaio é a NBR 13037/2001 (ABNT, 2001) - Veículos rodoviários automotores - Gás de escapamento emitido por motor Diesel em aceleração livre – Determinação da opacidade. De acordo com essa norma, o teste de aceleração livre consiste em medir a opacidade acelerando rapidamente até o fim, até que a rotação máxima se estabilize (corte da bomba) (TECNOMOTOR, 2013).

De acordo com a Portaria 38 de 01 de abril de 2014 do DENATRAN (BRASIL, 2014a), para os veículos automotores do ciclo Diesel os limites máximos de opacidade em aceleração livre são os valores certificados e divulgados pelo fabricante. Para veículos automotores do ciclo Diesel que não tiverem seus limites máximos de opacidade em aceleração livre divulgados pelo fabricante, tais limites são de  $2,8 \text{ m}^{-1}$  para veículos ano-modelo 1996-1999 e de  $2,3 \text{ m}^{-1}$  para veículos ano-modelo 2000 e posteriores.

Opacidade é a medida de absorção de luz sofrida por um feixe luminoso ao atravessar uma coluna de gás de escapamento, expressa em  $\text{m}^{-1}$ , entre os fluxos de luz emergente e incidente.

No início do ensaio, com a sonda do opacímetro desconectada do sistema de escapamento do motor, foi verificado o zero do opacímetro, conforme prescrição do fabricante.

Para a execução das medições da opacidade da fumaça, foi informado ao software de gerenciamento do opacímetro as velocidades angulares de marcha lenta e de máxima livre (corte).

Para a verificação de tais velocidades angulares, o motor funcionou sem carga para a medição e registro do valor da rotação de marcha lenta por até 10 segundos e, em seguida, foi acelerado lentamente desde a rotação de marcha lenta até atingir a rotação máxima livre, certificando-se de suas estabilizações

nas faixas recomendadas pelo fabricante, com a tolerância adicional de 100 rpm e -200 rpm na rotação máxima livre e de -100 rpm para a rotação de marcha lenta.

Após a comprovação de que as rotações de marcha lenta e de corte estavam conformes, a sonda do opacímetro foi introduzida, no mínimo 300 mm, no escapamento do trator com o motor em rotação de marcha lenta.

Para a realização do procedimento de medição da opacidade, o acelerador foi acionado de modo contínuo e rapidamente (no máximo em 1s), sem golpes, até atingir o final de seu curso. Foram registrados os tempos de aceleração entre o limite superior da faixa de rotação de marcha lenta e o limite inferior da faixa de rotação de máxima livre.

A posição do acelerador foi mantida, conforme descrito anteriormente, até que o motor se estabilizasse na faixa de rotação máxima, permanecendo nesta condição por um tempo máximo de 5 segundos. Após, desacelerou-se o motor e aguardou-se que o mesmo se estabilizasse na rotação de marcha lenta e que o opacímetro retornasse ao valor original obtido nessa mesma condição. O valor máximo da opacidade atingido durante essa sequência de operações foi registrado como a opacidade medida, juntamente com o valor da rotação máxima atingida. Na leitura seguinte, repetiu-se o procedimento descrito anteriormente reacelerando o motor, no máximo em 5 segundos após a última estabilização em marcha lenta.

O software de gerenciamento do opacímetro Discovery OPA 495 ALFATEST executa automaticamente as seguintes orientações determinadas pela Portaria 38 do CONTRAN:

- a) se em determinada aceleração, a rotação máxima atingida estiver abaixo da faixa de rotação de corte especificada com as respectivas tolerâncias, o valor máximo de opacidade verificado não será registrado e a operação será desprezada devendo ser repetida;

- b) se ocorrer em três acelerações consecutivas que a rotação máxima atingida esteja abaixo da faixa de rotação de corte especificada com as respectivas tolerâncias, o veículo será reprovado;
- c) em cada aceleração, se o tempo de elevação da rotação desde o limite superior da faixa de rotação de marcha lenta até o limite inferior da faixa de rotação de máxima livre registrado ultrapassar 4,5 s, a aceleração será desconsiderada e uma nova aceleração será realizada em seu lugar. Se essa mesma condição ocorrer pela terceira vez durante o teste de aceleração livre, o mesmo será interrompido e o veículo será rejeitado, por funcionamento irregular do motor;
- d) o procedimento de medição de opacidade deve ser realizado de 4 a 10 vezes e o cálculo dos resultados deve ser efetuado conforme a seguir:
  - a) desprezando-se a primeira aceleração para eliminação de resíduos acumulados no escapamento, os valores de opacidade obtidos em três medições consecutivas a partir da segunda medição inclusive, devem ser analisados e só podem ser considerados válidos quando a diferença entre o valor máximo e o mínimo neste intervalo não for superior a  $0,5 \text{ m}^{-1}$ ;
  - b) o primeiro grupo de três valores consecutivos que atenda as condições de variação determinadas no subitem acima é considerado como o grupo de medições válidas, encerrando-se o ensaio;
  - c) o resultado do ensaio é a média aritmética dos três valores consecutivos válidos.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Desempenho do motor**

Os resultados obtidos durante os ensaios dinamométricos podem ser observados na Tabela 7, destacando-se cada uma das condições de alimentação preestabelecidas para o motor. Os ensaios foram executados com o motor a plena carga. Não foram feitas modificações mecânicas no motor para a realização dos testes. Portanto, a pressão da linha de alimentação de combustível do motor não foi alterada para a realização dos mesmos.

De acordo com a Tabela 6, na rotação de 540 rpm da TDP, equivalente a 1890 rpm do motor, observou-se uma redução da potência ao se utilizar biodiesel B100 de 28,6% em relação ao diesel mineral comercial. Nessa mesma rotação, ao se utilizar (B7+20), o motor apresentou um ganho de potência de 1,6% em relação ao diesel mineral comercial.

Na rotação de 324 rpm da TDP, equivalente a 1134 rpm do motor, a redução de potência foi de 38,3% ao se utilizar B100. Ao se utilizar (B7+20), o valor de potência permaneceu próximo do valor em relação ao diesel mineral comercial.

Tabela 6 Ensaio dinamométrico do trator com motor a plena carga para os diferentes combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016

Rotação na TDP (rpm)	Rotação equivalente no motor (rpm)	Potência na TDP (kW)	Torque (N.m)
100% diesel (B7)			
228	800	4,3	206,0
324	1134	8,1	252,5
540	1890	18,2	327,5
628	2200	23,2	351,8
80% diesel B7 e 20% biodiesel -(B7+20)			
228	800	3,85	176,0
324	1134	8,1	256,0
540	1890	18,5	333,8
628	2200	22,2	342,5
50% diesel B7 e 50% biodiesel -(B7+50)			
228	800	3,4	147,0
324	1134	7,1	226,5
540	1890	15,4	282,3
628	2200	21,2	332,8
20% diesel B7 e 80% biodiesel -(B7+80)			
228	800	3,0	134,3
324	1134	6,3	201,5
540	1890	15,5	287,3
628	2200	19,3	302,3
100% biodiesel -(B100)			
228	800	2,1	93,5
324	1134	5,0	161,3
540	1890	13,0	271,0
628	2200	18,0	283,8

Com o intuito de facilitar a visualização e a análise dos resultados obtidos, foram traçadas as curvas de potência e torque. Os valores apresentados representam a média de quatro repetições para cada tomada de tempo.

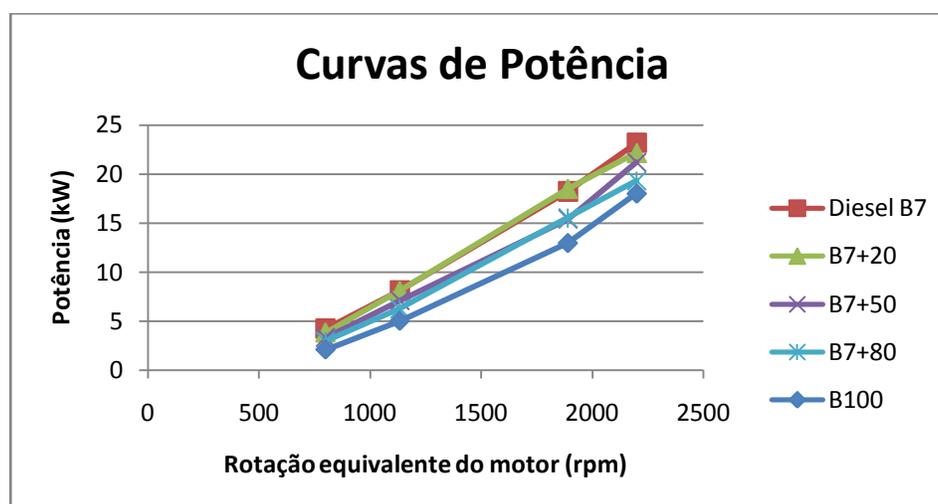


Figura 13 Curvas de potência do motor do trator a plena carga para os combustíveis utilizados

Com relação ao torque desenvolvido pelo motor, também de acordo com a Tabela 7, observou-se na rotação de 540 rpm da TDP, equivalente a 1890 rpm do motor, quando utilizando biodiesel B100, uma redução de 17,3% em relação ao diesel mineral comercial. Já quando se utilizou (B7+20), notou-se um ganho de 1,9% em relação ao diesel mineral comercial.

A redução de torque na rotação de 324 rpm da TDP foi de 36,2% ao se utilizar B100 em relação ao diesel (B7). Quando se utilizou (B7+20), observou-se um ganho de 1,4% no torque em relação ao diesel mineral comercial.

Segundo AydineBayindir (2010), o torque do motor aumenta até um ponto máximo com o aumento da velocidade do motor. Após esse ponto, o torque diminui passo a passo. Isso pode ser atribuído à mais alta viscosidade e ao menor poder calorífico do biodiesel. Quando a viscosidade do combustível aumenta, a quantidade de combustível que deveria encher a bomba de óleo diminui e a eficiência volumétrica do motor fica mais baixa, consequentemente resultando em uma redução do torque.

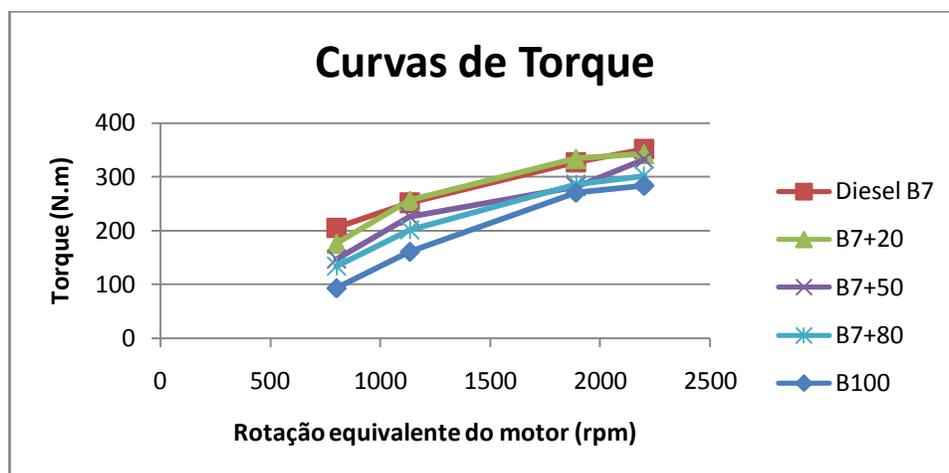


Figura 14 Curvas de torque do motor do trator a plena carga, para os combustíveis utilizados

## 5.2 Emissões do motor

Ao analisarmos as emissões do motor em questão, devemos ter em mente que o combustível tomado como referência para a análise dos dados foi o diesel mineral comercial (B7) que já contém em sua composição um percentual de 7% de biodiesel de matéria-prima desconhecida.

Os valores correspondentes aos níveis de emissões são apresentados em Tabelas e, posteriormente, para melhor visualização, são apresentados em Gráficos.

### 5.2.1 Opacidade

A opacidade, conforme se observa na Tabela 7, diminui à medida que aumenta a proporção de biodiesel na mistura combustível em relação ao diesel mineral comercial. Quando se utilizou B100, a redução foi de 30% em relação ao diesel mineral comercial.

Conforme já citado no item 3.5 desse trabalho – Estudos Experimentais realizados, Maziero et al. (2006) obtiveram 41% de redução dos materiais particulados quando usaram biodiesel, Gokalp, Buyukkayae Soyhan(2011) observaram uma redução de 62% ao utilizar B50 e de 74% ao utilizar B100. Sharon et al. (2012) perceberam um aumento de 25% ao utilizar B25, uma redução de 10% ao utilizar B75 e uma redução de 19% ao utilizar B100. Aydine Bayindir (2010) observaram uma redução significativa de fumaça quando se utilizou misturas intermediárias de biodiesel (B20 e B50) em médias velocidades do motor quando comparado ao diesel de petróleo. Isso pode ser devido à combustão estável e completa dessas misturas combustíveis. Eles também observaram que com B75 e B100, devido as mais altas massa específica e viscosidade resultaram em maior emissão de fumaça que quando comparado ao diesel mineral e outras misturas de biodiesel. A alta viscosidade do biodiesel puro prejudica a atomização do combustível e conseqüentemente, aumenta a quantidade de fumaça de exaustão.

De acordo com Liaquat et al. (2011), a fumaça produzida pela combustão incompleta do combustível é resultante do efeito de resfriamento do combustível ou de problemas relacionados à mistura ar/combustível.

Tabela 7 Opacidade dos diferentes combustíveis utilizados. UFPA, LAVRAS/MG, 2016

Combustível	Opacidade (m <sup>-1</sup> )	Temperatura (°C)	Tempo máximo de aceleração (s)	Marcha lenta	Rotação de corte
Diesel(B7)	0,10	70	4,5	800	2500
B7+20	0,08	79	4,5	800	2500
B7+50	0,06	81	4,5	800	2500
B7+80	0,06	78	4,5	800	2500
B100	0,07	76	4,5	800	2500

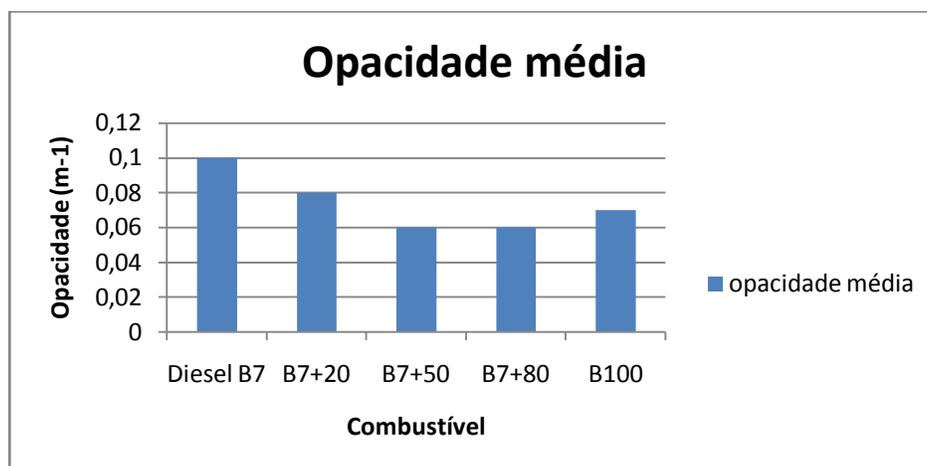


Figura 15 Opacidade média emitida pelo motor do trator sem carga, para os combustíveis utilizados

### 5.2.2 Níveis de HC

Os valores dos níveis de HC (ppm) emitidos pelo motor de acordo com o Ciclo de 13 pontos são apresentados na Tabela 8.

Na rotação de 324 rpm da TDP a plena carga, os valores de HC ao se utilizar as misturas (B7+20), (B7+50) e (B7+80) foram menores 47,1%, 47,0%, 17,7%, respectivamente, do que quando se utilizou diesel (B7). Quando se utilizou B100 nessa mesma rotação e nessa mesma carga, houve um aumento nas emissões de HC de 35,3%. Já na rotação de 540 rpm da TDP a plena carga, a redução de HC foi de 14,3% quando se utilizou (B7+20) mas os valores de HC aumentaram em 42,8%, 85,7% e 314,3% quando, respectivamente, se utilizou (B7+50), (B7+80) e (B100).

Conforme citado no item 3.5 desse trabalho – Estudos Experimentais realizados, Maziero et al. (2006) obtiveram 31% de redução nas emissões de HC quando usaram biodiesel e Sharon et al. (2012) notaram um aumento de 9,52%

ao utilizar B25, uma redução de 9,53% ao utilizar B50, uma redução de 19,05% ao utilizar B75 e uma redução de 38,09% ao utilizar B100.

Segundo Domkundwar (2009 apud SHARON et al., 2012), a concentração de HC na exaustão de diesel varia de poucos ppm a milhares de ppm, dependendo da carga no motor e de sua rotação. Os hidrocarbonetos na exaustão do diesel são compostos de uma mistura de muitos hidrocarbonetos individuais fornecidos para o motor como também por hidrocarbonetoparcialmente queimados produzidos durante o processo de combustão.

Hidrocarbonetos não queimados são resultantes da combustão incompleta do combustível. Semelhantemente ao monóxido de carbono, os hidrocarbonetos não queimados são resultantes da extinção da chama em regiões de fendas e nas paredes do cilindro. Outras causas dos hidrocarbonetos não queimados são o acionamento do motor em razões ar/combustível muito ricas com insuficiente oxigênio e a combustão incompleta do óleo lubrificante. Uma outra causa é que o filme de óleo ao redor do cilindro absorve hidrocarbonetos impedindo-os de queimar e assim libera-os nos gases de exaustão (LIAQUAT et al., 2011).

Tabela 8 Valores de HC (ppm) dos diversos combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016

Ciclo – Rotação-Carga	Rotação na TDP (rpm)	Rotação equivalent e no motor (rpm)	HC Diesel (B7)	HC (B7+20)	HC (B7+50)	HC(B7+80)	HC (B100)
1 - Marcha lenta – 0%	228	800	10	8	7	9	10
2 - Intermediária – 10%	324	1134	10	9	6	7	8
3 - Intermediária – 25%	324	1134	12	5	6	6	6
4 - Intermediária – 50%	324	1134	13	7	8	8	12
5 - Intermediária – 80%	324	1134	15	9	8	14	18
6 - Intermediária – 100%	324	1134	17	9	8	14	23
7 - Marcha lenta – 0%	228	800	12	3	2	9	21
8 - Nominal – 100%	540	1890	7	6	10	13	29
9 - Nominal – 75%	540	1890	11	9	1	12	21
10 - Nominal – 50%	540	1890	10	7	2	2	24
11 - Nominal – 25%	540	1890	10	4	5	7	24
12 - Nominal – 10%	540	1890	12	2	5	6	25
13 - Marcha lenta – 0%	540	800	9	6	8	2	21

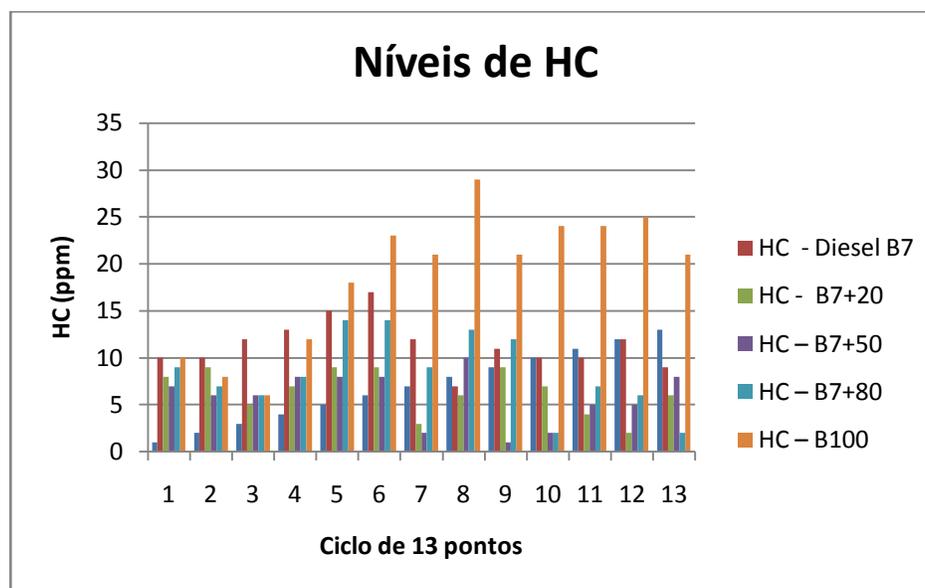


Figura 16 Níveis de HC emitidos pelo motor do trator de acordo com o ciclo de 13 pontos, para os combustíveis utilizados

### 5.2.3 Níveis de CO

Na Tabela 9, são apresentados os níveis de CO emitidos pelo motor de acordo com o Ciclo de 13 pontos.

De acordo com a Tabela 9, percebe-se que os maiores valores de CO encontram-se quando foi utilizado (B7+80), em todos os pontos do Ciclo de 13 pontos. Os menores valores de CO foram apresentados quando se utilizou o Biodiesel (B100). Na rotação de 324 rpm da TDP a plena carga, observou-se que as emissões de CO quando se utilizou (B100) foram equivalentes às emissões quando se utilizou diesel mineral comercial (B7). Já na rotação de 540 rpm da TDP a plena carga, as emissões de CO quando se utilizou (B100) foram 33,3% menores do que quando se utilizou diesel (B7).

Conforme citado no item 3.5 desse trabalho – Estudos Experimentais realizados, Maziero et al. (2006) obtiveram 32,2% de redução nas emissões de

CO quando usaram biodiesel; Milan et al. (2010) concluíram que as razões de emissões de CO com B100 e B70 foram 48% menores do que a do diesel puro e com B50 foi 55% menor do que com diesel combustível; Tomic et al. (2013) observaram que o aumento na carga levou ao aumento da emissão de CO, o que é consequência da redução da taxa de excesso de ar no cilindro do motor e que o B15, o B25, o B50, o B75 e o B100 causaram reduções nas emissões de CO, em média, de 1,84%, 3,79%, 9,30%, 11,43% e 13,15%, respectivamente; Gokalp, Buyukkayae Soyhan(2011) notaram que o nível de emissão de CO diminuiu com o aumento do percentual de biodiesel no diesel. Em velocidades baixas do motor, as emissões de CO com B5, B20, B50 e B100 foram, respectivamente, 3%, 13%, 27% e 39% mais baixas do que quando se utilizou diesel marítimo. Na rotação de 1800 r.p.m. em plena carga, as emissões de CO foram para o diesel marítimo de 725 ppm enquanto que para o éster metílico de soja foram de 475 ppm; AydineBayindir (2010) verificaram que as emissões de CO diminuíram com o uso de biodiesel, ficando, na rotação de 1750 rpm, em torno de 750 ppm com diesel mineral e 250 ppm com B100; Sharon et al. (2012) avaliaram que as emissões de CO, em plena carga, quando se utilizou B100, B75, B50 e B25 foram, respectivamente, 52,9%, 35,2%, 35,2% e 21,4% menores do que quando se utilizou diesel mineral. Na potência no freio de 5,2 kW, a emissão de CO foi de, aproximadamente, 0,17% em volume com diesel mineral.

Segundo Mazieiro et al. (2006), reduções nas emissões de monóxido de carbono podem ser justificadas devido a presença de oxigênio na molécula de biodiesel, visto que o fato desse comburente estar disponível na câmara de combustão desloca a reação de queima do combustível no sentido de produzir maiores quantidades de CO<sub>2</sub>.

De acordo com Roskilly et al. (2008), em cargas baixas, a temperatura do cilindro do motor é baixa também e a atomização do biodiesel se torna

ineficiente devido sua alta viscosidade. Entretanto, quando a carga do motor é aumentada, a temperatura do cilindro do motor fica mais alta e a atomização do biodiesel melhora, resultando em uma mistura ar/combustível melhorada, melhorando a combustão e, conseqüentemente, proporcionando uma redução nas emissões de CO.

De acordo com Liaquat et al. (2011), o monóxido de carbono é um gás tóxico resultante da combustão incompleta. As emissões de CO são extremamente dependentes da razão ar/combustível relativa às proporções estequiométricas. As emissões de CO dependem de muitos parâmetros tais como a razão ar/combustível e o desempenho da combustão do combustível dentro do cilindro do motor.

Tabela 9 Valores de CO (%) dos diversos combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016

Ciclo – Rotação-Carga	Rotação na TDP (rpm)	Rotação equivalente no motor (rpm)	CODiesel (B7)	CO(B7+20)	CO (B7+50)	CO (B7+80)	CO (B100)
1 - Marcha lenta – 0%	228	800	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05
2 - Intermediária – 10%	324	1134	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04
3 - Intermediária – 25%	324	1134	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03
4 - Intermediária – 50%	324	1134	0,02	0,04	0,04	0,05	0,03
5 - Intermediária – 80%	324	1134	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04
6 - Intermediária – 100%	324	1134	0,03	0,03	0,03	0,06	0,03
7 - Marcha lenta – 0%	228	800	0,04	0,03	0,03	0,05	0,03
8 - Nominal – 100%	540	1890	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02
9 - Nominal – 75%	540	1890	0,03	0,03	0,05	0,05	0,02
10 - Nominal – 50%	540	1890	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03
11 - Nominal – 25%	540	1890	0,02	0,04	0,03	0,05	0,03
12 - Nominal – 10%	540	1890	0,02	0,04	0,04	0,05	0,03
13 - Marcha lenta – 0%	540	800	0,03	0,03	0,04	0,05	0,03

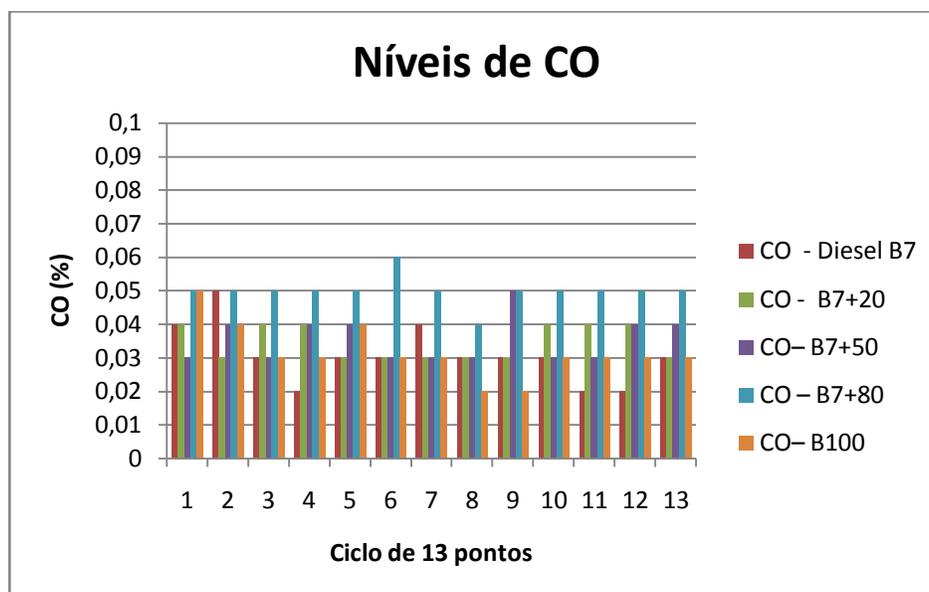


Figura 17 Níveis de CO emitidos pelo motor do trator de acordo com o ciclo de 13 pontos, para os combustíveis utilizados

#### 5.2.4 Níveis de CO<sub>2</sub>

São demonstrados na Tabela 10 os níveis de CO<sub>2</sub> emitidos pelo motor de acordo com o Ciclo de 13 pontos.

De acordo com a Tabela 10, os maiores valores de CO<sub>2</sub> aconteceram quando da utilização do (B100) em todos os 13 pontos do Ciclo de 13 pontos. Justifica-se esse fato conforme explicação dada por Mazieiro et al. (2006) citada anteriormente. Verifica-se também que tais emissões de dióxido de carbono apresentaram maiores valores quando do aumento do teor de biodiesel na mistura combustível. Observa-se, ainda, que o teor de CO<sub>2</sub> aumentou à medida que se aumentou a carga no motor. Na rotação de 324 rpm da TDP a plena carga, o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> foram de 25,0% quando se utilizou (B100) em relação ao diesel mineral comercial (B7). Já na rotação de 540 rpm da TDP a plena carga, esse aumento foi de 4,1%.

Conforme citado no item 3.5 desse trabalho – Estudos Experimentais realizados, Maziero et al. (2006) obtiveram 4,8% de redução nas emissões de CO<sub>2</sub> quando usaram biodiesel. Tomice et al. (2013) notaram que as emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram com o aumento da carga do motor. Comparando-se com o diesel fóssil, os combustíveis B15, B25, B50, B75 e B100 causaram reduções nas emissões de CO<sub>2</sub>, em média, de 2,05%, 5,01%, 5,91%, 7,70% e 8,99% respectivamente. Sharon et al. (2012) observaram que as emissões de CO<sub>2</sub> quando se utilizou o biodiesel e suas misturas foi maior do que quando se utilizou diesel mineral. Na potência de freio de 5,2 kW, a emissão de CO<sub>2</sub> com B100 foi de aproximadamente 6,5 % em volume.

Segundo Liaquat et al. (2011), o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> significa melhor combustão.

Tabela 10 Valores de CO<sub>2</sub> (%) dos diversos combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016

Ciclo – Rotação-Carga	Rotação na TDP (rpm)	Rotação equivalente no motor (rpm)	CO <sub>2</sub> Diesel (B7)	CO <sub>2</sub> (B7+20)	CO <sub>2</sub> (B7+50)	CO <sub>2</sub> (B7+80)	CO <sub>2</sub> (B100)
1 - Marcha lenta – 0%	228	800	2	2	2,1	2	2,1
2 - Intermediária – 10%	324	1134	2,3	2,3	2,4	2,3	2,4
3 - Intermediária – 25%	324	1134	2,4	2,4	2,5	2,4	2,6
4 - Intermediária – 50%	324	1134	2,8	2,8	2,9	2,8	3,2
5 - Intermediária – 80%	324	1134	3,3	3,2	3,5	3,2	3,9
6 - Intermediária – 100%	324	1134	3,6	3,6	4,1	3,4	4,5
7 - Marcha lenta – 0%	228	800	1,9	1,9	2	1,9	2
8 - Nominal – 100%	540	1890	4,9	5	4,9	4,8	5,1
9 - Nominal – 75%	540	1890	4,2	4,3	4,2	4,2	4,3
10 - Nominal – 50%	540	1890	3,6	3,7	3,6	3,6	3,8
11 - Nominal – 25%	540	1890	3	3,1	3	3,1	3,2
12 - Nominal – 10%	540	1890	2,8	2,9	2,8	2,9	3
13 - Marcha lenta – 0%	540	800	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9

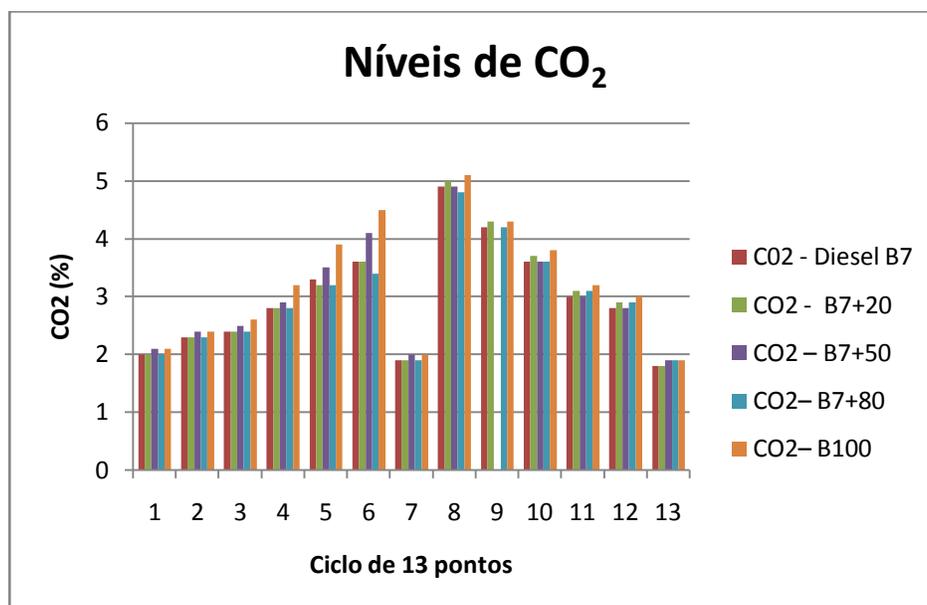


Figura 18 Níveis de CO<sub>2</sub> emitidos pelo motor do trator de acordo com o ciclo de 13 pontos, para os combustíveis utilizados

### 5.2.5 Níveis de O<sub>2</sub>

Conforme o Ciclo de 13 pontos, os níveis de O<sub>2</sub> são demonstrados na Tabela 11.

Os valores de O<sub>2</sub>, de acordo com a Tabela 11, foram menores quando se utilizou (B100) do que quando se utilizou diesel mineral comercial (B7). Percebe-se, também, que, geralmente, à medida que se aumenta o teor de biodiesel na mistura combustível, a quantidade de O<sub>2</sub> vai diminuindo. A mistura biodiesel (B7+80) apresentou comportamento diferente das demais misturas combustíveis. Além do mais, nota-se que tanto na rotação de 324 rpm da TDP quanto na rotação de 540 rpm da TDP, à medida que se aumentou a carga no motor, a quantidade de O<sub>2</sub> emitida foi diminuindo. Inversamente ao que ocorreram com as emissões de CO<sub>2</sub>, à medida que se aumentou a carga no

motor, a quantidade de  $O_2$  diminuiu. Na rotação de 324 rpm da TDP a plena carga, as emissões de  $O_2$  quando se utilizou (B100) foram 6,6% menores em relação ao diesel mineral comercial (B7). Na rotação de 540 rpm da TDP a plena carga, essa redução foi de 2,1%.

Segundo Liaquat et al. (2011), o aumento da rotação do motor diminui a concentração de  $O_2$  devido a melhor combustão.

Tabela 11 Valores de O<sub>2</sub> (%) dos diversos combustíveis utilizados. UFLA, LAVRAS/MG, 2016

Ciclo – Rotação-Carga	Rotação na TDP (rpm)	Rotação equivalent e no motor (rpm)	O <sub>2</sub> Diesel (B7)	O <sub>2</sub> (B7+20)	O <sub>2</sub> (B7+50)	O <sub>2</sub> (B7+80)	O <sub>2</sub> (B100)
1 - Marcha lenta – 0%	228	800	16,49	16,34	15,61	16,47	16,48
2 - Intermediária – 10%	324	1134	16,12	16,01	15,19	16,19	16,03
3 - Intermediária – 25%	324	1134	15,91	15,88	15,18	15,9	15,68
4 - Intermediária – 50%	324	1134	15,43	15,37	14,61	15,43	14,85
5 - Intermediária – 80%	324	1134	14,83	14,8	14,11	14,98	14,07
6 - Intermediária – 100%	324	1134	14,28	14,38	13,61	14,67	13,34
7 - Marcha lenta – 0%	228	800	16,53	16,52	16,53	16,57	16,24
8 - Nominal – 100%	540	1890	12,78	12,87	13	13,11	12,52
9 - Nominal – 75%	540	1890	13,5	13,5	13,63	13,63	13,47
10 - Nominal – 50%	540	1890	14,27	14,15	14,54	14,41	14,19
11 - Nominal – 25%	540	1890	15,11	14,87	15,11	14,98	14,94
12 - Nominal – 10%	540	1890	15,3	15,2	15,39	15,29	15,15
13 - Marcha lenta – 0%	540	800	16,65	16,65	16,64	16,7	16,61

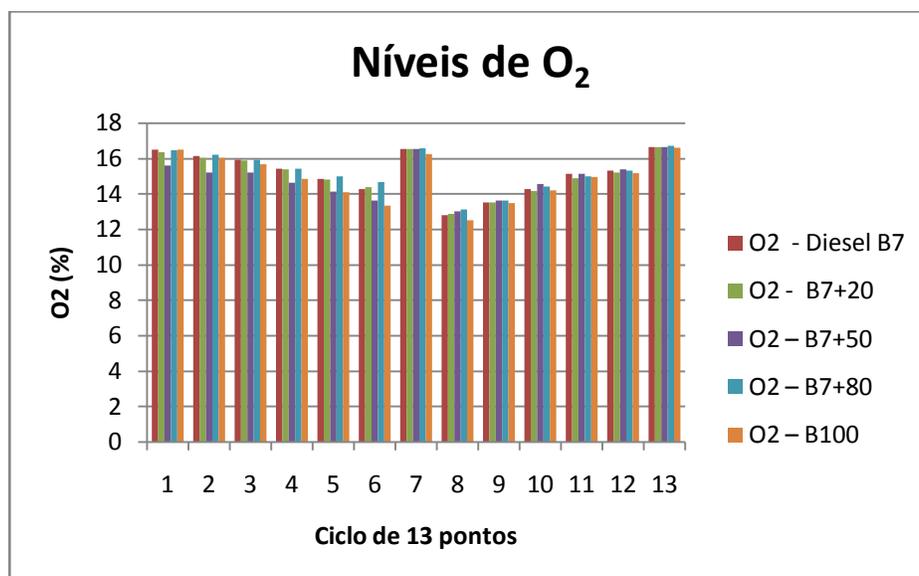


Figura 19 Níveis de O<sub>2</sub> emitidos pelo motor do trator de acordo com o ciclo de 13 pontos, para os combustíveis utilizados

## 6 CONCLUSÕES

Os valores de opacidade diminuíram à medida que se aumentou a proporção de biodiesel na mistura combustível, exceto quando se utilizou (B100) onde apresentou um aumento.

Na rotação de 324 rpm da TDP a plena carga, os valores de HC ao se utilizar as misturas (B7+20), (B7+50) e (B7+80) foram menores do que quando se utilizou diesel mineral comercial (B7). Já na rotação de 540 rpm da TDP a plena carga, o valor de HC foi menor do que quando se utilizou (B7+20) mas aumentaram quando se utilizou (B7+50), (B7+80) e B100.

Na rotação de 324 rpm da TDP a plena carga, observou-se que os valores das emissões de CO quando se utilizou (B100) foram próximos aos valores quando se utilizou diesel mineral comercial (B7). Já na rotação de 540 rpm da TDP a plena carga, as emissões de CO quando se utilizou (B100) foram menores do que quando se utilizou diesel mineral comercial.

Os maiores valores de CO<sub>2</sub> aconteceram quando da utilização do (B100) em todos os 13 pontos do Ciclo de 13 pontos. Na rotação de 324 rpm da TDP a plena carga, houve um aumento das emissões de CO<sub>2</sub> quando se utilizou (B100) em relação ao diesel mineral comercial (B7). Na rotação de 540 rpm da TDP a plena carga também houve um aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, porém menor do que na rotação de 324 rpm da TDP.

Os valores de O<sub>2</sub> foram menores quando se utilizou (B100) do que quando se utilizou diesel mineral comercial (B7). A mistura biodiesel (B7+80) apresentou comportamento diferente das demais misturas combustíveis. Nas rotações de 324 rpm e de 540 rpm da TDP a plena carga, as emissões de O<sub>2</sub> quando se utilizou (B100) foram menores em relação ao diesel mineral comercial (B7).

A potência do motor com o uso de biodiesel de óleo de macaúba em 100% ou, em misturas com diesel, foi inferior à potência apresentada com diesel mineral comercial (B7), chegando a uma redução média de 18,4%.

Os valores obtidos de torque, quando se utilizou diesel, foram, em média, 17,4% maiores do que quando se utilizou 100% biodiesel.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GAS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biodiesel**: introdução. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GAS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim mensal do biodiesel**. Disponível em: <[www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br/)>. Acesso em: 28 dez. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GAS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Portaria ANP nº 240, de 25 de agosto de 2003a**. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder\\_portarias\\_anp/portarias\\_anp\\_tec/2003/agosto/panp%2040%20-%202003.xml](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder_portarias_anp/portarias_anp_tec/2003/agosto/panp%2040%20-%202003.xml)>. Acesso em: 21 maio 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GAS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Portaria ANP nº 255, de 15 de setembro de 2003b**. Estabelece a especificação do biodiesel puro a ser adicionado ao óleo diesel automotivo para testes em frotas cativas ou para uso em processo industrial específico nos termos da Portaria ANP nº 240, de 25 de agosto de 2003. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=185852>>. Acesso em: 22 abr. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GAS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Produção de biodiesel**. Disponível em: <[www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br/)>. Acesso em: 12 mar. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GAS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 7, de 19 de março de 2008**. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml)>. Acesso em: 22 jun. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GAS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 14, de 11 de maio de 2012**. Disponível em: <[http://www.lex.com.br/legis\\_23365001\\_RESOLUCAO\\_N\\_14\\_DE\\_11\\_DE\\_MAIO](http://www.lex.com.br/legis_23365001_RESOLUCAO_N_14_DE_11_DE_MAIO)>. Acesso em: 20 jan. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GAS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 42, de 24 de novembro de 2004**. Disponível em:

<[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2004/novembro/ra np%2042%20-%202004.xml](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2004/novembro/ra np%2042%20-%202004.xml)>. Acesso em: 23 jan. 2015.

ALFATEST. **Discovery G4**: analisador de gases: manual de instruções. Disponível em: <[http://alfatest.com.br/wordpress/wp-content/uploads/manuais/Anal\\_Gases\\_Discovery\\_G4\\_PT.pdf](http://alfatest.com.br/wordpress/wp-content/uploads/manuais/Anal_Gases_Discovery_G4_PT.pdf)>. Acesso em: 22 jan. 2013a.

ALFATEST. **Opa 495**: analisador de Opacidade: manual do usuário. Disponível em: <[http://alfatest.com.br/wordpress/wp-content/themes/twentyten/Opacimetro%20OPA\\_495\\_PT.PDF](http://alfatest.com.br/wordpress/wp-content/themes/twentyten/Opacimetro%20OPA_495_PT.PDF)>. Acesso em: 28 jan. 2013b.

ALMEIDA, D.F. R. et al. Acidez do óleo da semente de macaúba, *Acrocomiaaculeata*, em função do tempo e do método de armazenamento. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO, 12., 2011, Montes Claros. **Anais...** Montes Claros: Universidade Estadual de Montes Claros, 2011.

AL-WIDYAN, M.I.; TASHTOUSH, G.; ABU-QUDAIS, M. Fuelprocesstechnology. 2002. In: WILHELM, H. M. et al. Avaliação do desempenho e das emissões de biodiesel e misturas em motor do ciclo diesel para aplicação em geração de energia elétrica. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 3., 2009, Brasília. **Anais...** Brasília: MCT, 2009.1 CD-ROM.

AMARAL, F.P. **Estudo das características físico-químicas dos óleos da amêndoa e polpa da Macaúba [*Acrocomiaaculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart]**. 2007. 53 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) -UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, Botucatu, 2007.

ARAÚJO, J.B. et al. Índice de acidez do óleo de quatro cultivares de mamona extraído por mini-prensa laboratorial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 2., 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa Algodão, 2006.

ARBOLES del área del canal del Panamá *Acrocomiaaculeata* (Jacq.) Lodd. Ex. Mart. Disponível em: <<http://www.ctfs.si.edu/webatlas/spanish/acropa.html>>. Acesso em: 18 jul. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 1985. 8 p. (Cancelada e substituída pela ABNT NBR ISO 1585; Antiga ABNT MB-372).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12897**: emprego do opacímetro para medição do teor de fuligem do motor diesel - método de absorção de luz - procedimento. Rio de Janeiro, 1993. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13037**: veículos rodoviários automotores - gás de escapamento emitido por motor diesel em aceleração livre – determinação da opacidade. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14489**: motor diesel – análise e determinação dos gases e do material particulado emitidos por motores do ciclo diesel – ciclo de 13 pontos. Rio de Janeiro, 2000. 41 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 1585**: veículos rodoviários – código de ensaio de motores – potência líquida efetiva. Rio de Janeiro, 1996. 26 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Diesel e emissões**: a nova legislação 2012: Proconve P7. Disponível em: <<http://www.cntdespoluir.org.br/Documents/PDFs/Cartilha%20Diesel%20S10.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2014.

AYDIN, H.; BAYINDIR, H. Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. **Renewable Energy**, Oxford, v. 35, p. 588-592, 2010.

BARGER, E. L. et al. **Tratores e seus motores**. Tradução de V. L. Schilling. São Paulo: E. Blucher, 1983. Título original: Tractors and Their Power Units.

BHERING, L. **Macaúba**: matéria-prima nativa com potencial para a produção de biodiesel. 2009. Disponível em: <<http://www.bv.fapesp.br/namidia/noticia/33467/macaua-materia-prima-nativa-potencial/>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

BHERING, L. **Macaúba**: matéria-prima nativa com potencial para a produção de biodiesel. 2010. Disponível em: <[www.diadecampo.com.br](http://www.diadecampo.com.br)>. Acesso em: 23 jan. 2014.

BIODIESELBR. **Tudo sobre a mamona**. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/plantas/mamona.htm>>. Acesso em: 5 out. 2013.

BONDAR, G. **Palmeiras do Brasil**. Disponível em: <<http://www.bibvirt.futuro.usp.br/especiais/frutasnobrasil/macauba.html>>. Acesso em: 22 jul. 2005.

BOULANGER, P. **Motores Diesel**. Tradução de Joshuah de Bragança Soares et al. São Paulo: Hemus, 1978. 661 p. Título original: Moteurs Diesel.

BRASIL. Departamento Nacional de Trânsito. **Portaria n. 38, de 01 de abril de 2014**. Divulga os limites de emissões de gases e os procedimentos para a fiscalização de veículos do ciclo diesel e do ciclo Otto, motocicletas e semelhantes do ciclo Otto, conforme a Resolução CONTRAN n. 452, de 26 de setembro de 2013. Brasília, 2014a.15p.

BRASIL. **Lei no 11.097, de 13 de janeiro de 2005**. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002 e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm)>. Acesso em: 22 jun. 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário estatístico de agroenergia 2012**. Brasília, 2013. 284 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **PROCONVE**: programa de controle de poluição do ar por veículos automotores. 2014b. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_arquivos/proconve](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve)>. Acesso em: 5 jan. 2014.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. **Medida Provisória nº 214, de 13 de setembro de 2004**. Brasília, 2004.

BR DISTRIBUIDORA. **Manual técnico diesel S-10**. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect>>. Acesso em: 10 set. 2013.

CLEMENT, C.R.; LERAS PÉREZ, E.; VAN LEEUWEN, J. O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas. **Agrociências**, Montevideu, v. 9,n. 1/2, p. 67-71, 2005.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO.

**Proconve**: continuação. Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/emissoes/proconve2.asp>>. Acesso em: 9 dez. 2010.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA. **Resolução CNPE nº 6, de 16 de setembro de 2009**. Estabelece em cinco por cento, em volume, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, de acordo com o disposto no art. 2º da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Disponível em:

<[http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/folder\\_resolucoes/resolucoes\\_cnpe/2009/rcnpe%206%20-%202009.xml](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/folder_resolucoes/resolucoes_cnpe/2009/rcnpe%206%20-%202009.xml)>. Acesso em: 23 jan. 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 315, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre a nova etapa do Programa de Controle de Emissões Veiculares – PROCONVE. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=337>>. Acesso em: 23 jan. 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 403, de 11 de novembro de 2008**. Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=591>>.

Acesso em: 23 jan. 2014.

COSTA NETO, P.R. Produção de biocombustível alternativo a óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 571-573, 2000.

D'ARCE, M. A. B. R. **Grãos e óleos vegetais**: matérias primas. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br>>. Acesso em: 24 ago. 2005.

DOMKUNDWAR, V.M.A **course in internal combustion engines**.New Delhi: DhanpatRai, 2009.

DUNN, R.O. Cold weather properties and performance of biodiesel. In: KNOTHE, G.; KRAHL, J.; VAN GERPEN, J. (Ed.). **The biodiesel handbook**. Urbana: AOCS, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2012>>. Acesso em: 29 nov. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – ALGODÃO. Disponível em: <[www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)>. Acesso em: 13 jun. 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - SOJA. Disponível em: <[www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)>. Acesso em: 13 jun. 2006.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Disponível em: <[www.faespsenar.com.br](http://www.faespsenar.com.br)>. Acesso em: 20 nov. 2009.

FOX, R.W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P.J. **Introdução à mecânica dos fluídos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Belo Horizonte, 1983.

FURLAN, J. **Biodiesel porque tem que ser dendê**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 205p.

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

GRAY, M. **Palm and Cycad societies of Australia**. Disponível em: <<http://www.pacsoa.org.au/palms/Acrocomia/aculeata.html>>. Acesso em: 20 set. 2005.

GRUPO VERDE. **Acrocomiaaculeata**. Disponível em: <<http://www.grupoverdepalms.com/index2.html>>. Acesso em: 12 nov. 2005.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. Field guide to the palms of the Americas. New Jersey: Princeton University, 1995. p. 166-167.

HEYWOOD, J.B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988. 930 p.

HIANE, P. A. et al. Bocaiúva, *AcrocomiaAculeata* (Jacq.) Lodd. Pulp and Kernel oils: characteristics and fatty acid composition. **Journal Food Technology**, Oxford, v.8, n.3, p. 256-259, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola 2013**: cereais, leguminosas e oleaginosas. Disponível em: <<http://ibge.gov.br/home/estatística/indicadores>>. Acesso em: 2 out.2013.

INTERNATIONAL CENTER FOR TROPICAL AGRICULTURE. FruitsfromAmerica: anethnobotanicalinventoryAcrocomiaaculeate. Disponível em: <[http://www.ciat.cgiar.org/ipgri/fruits\\_from\\_americas/frutales/Acrocomiaaculeata.htm](http://www.ciat.cgiar.org/ipgri/fruits_from_americas/frutales/Acrocomiaaculeata.htm)>. Acesso em: 24 mar. 2014.

KNOTHE, G. Fuel Properties: cetane numbers: heat of combustion: why vegetable oils and their derivatives are suitable as a diesel fuel. In: KNOTHE, G.; KRAHL, J.; VAN GERPEN, J. (Ed.). **The biodiesel handbook**. Urbana: AOCS, 2005a.

KNOTHE, G. Introduction: what is Biodiesel? In: KNOTHE, G.; KRAHL, J.; VAN GERPEN, J. (Ed.). **The biodiesel handbook**. Urbana: AOCS, 2005b.

KNOTHE, G. The history of vegetable oil-based diesel fuels. In: KNOTHE, G.; KRAHL, J.; VAN GERPEN, J. (Ed.). **The biodiesel handbook**. Urbana: AOCS, 2005c.

LEE, C.S.; PARK, S.W.; KWON, S.I. An experimental study on the atomization and combustion characteristics of biodiesel-blended fuels. **Energy & Fuels**, Washington, v. 19, p. 2201- 2208, 2005.

LIAQUAT, A. M. et al. Engine performance and emissions analysis using “Envo Diesel” and Coconut biodiesel blended fuel as alternative fuels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2., 2011, Singapore. **Anais...** Singapore: Icest, 2011. p.168-172.

LIMA, J.R.; GONÇALVES, L.A.C. **Anais do Simpósio sobre qualidade tecnológica e nutricional de óleos e processos de frituras**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Óleos e Gorduras, 1997. p. 144.  
LIMA, L N. et al. **Produção de biodiesel étlico utilizando óleo de algodão por catálise básica**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

LORENZI, G. M. A. C. **Acrocomiaaculeata (Jacq.) Lodd. ex Mart.** – **Areceaceae**: bases para o extrativismo sustentável. 2006. 156 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MARIANO, R.G.B.; COURIS,.; FREITAS, S.P. The enzymatic technology to improved oil extraction from pequi pulp (CaryocarbrasilienseCamb.). In: SYMPOSIUM ON BIOTECHNOLOGY FOR FUELS AND CHEMICALS,30.,2008, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: Society for Industrial Microbiology, 2008. v. 1, p.69.

MAZIERO, J. V. G. et al. Avaliação de emissões de poluentes de um motor de ignição porcompressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 2., 2006, Varginha. **Anais...** Lavras: UFLA, 2006.1 CD-ROM.

McCORMICK, R. L.; ALLEMAN, T. L. Effect of Biodiesel Fuel on Pollutant Emissions from Diesel Engines. In: KNOTHE, G.; KRAHL, J.; VAN GERPEN, J. (Ed.). **The biodiesel handbook**. Urbana: AOCS, 2005.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1980. 2 v.

MILAN, I. et al. Performance and emissions of an agricultural diesel engine fuelled with different diesel and methyl ester blends. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 8, n. 2, p. 299-307, 2010.

MIRANDA, I.P. A. et al. **Frutos de palmeiras da Amazônia**. Manaus: MCT/INPA, 2001.

MISSOURI BOTANICAL GARDEN. **Acrocomiaaculeata**. Disponível em: <<http://www.mobot.org/CGI-bin/search>>. Acesso em: 16 out. 2005.

MOHEBBI, A. et al. Use of waste cooking oil biodiesel in a tractor DI diesel engine. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, Berlin, v. 10, n. 2, p. 1290-1297, 2012.

MOREIRA, A. **Combustíveis**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2006. 8 p. (Apostila). Disponível em: <<http://www.netef.eesc.usp.br>>. Acesso em: 1 fev. 2006.

NACHILUK, K.; FREITAS, S. M. de. Evolução da capacidade instalada para produção de biodiesel no Brasil e auto-abastecimento regional. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v.4, n.5, maio 2009. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 11 jan. 2010.

NOVAES, R. J. **Contribuição para o estudo do coco macaúba**. 1952. 86 p. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1952.

OSAKI, M.; BATALHA, M.O. Produção de biodiesel e óleo vegetal no Brasil: realidade e desafio. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: SOBER, 2008. 1 CD-ROM.

PARAIZO, A.; EDGAR JUNIOR; PARAIZO, J. **Produção de biodiesel**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Apostila. Disponível em: <[www.enq.ufsc.br](http://www.enq.ufsc.br)>. Acesso em: 12 jan. 2010.

PARENTE, E. J. de Sá. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. 2003. Disponível em: <[www.biodiesel.gov.br](http://www.biodiesel.gov.br)>. Acesso em: 12 jan. 2010.

PEZZANO, P.; KLEIN, A. **Construcción de los motores térmicos**. Buenos Aires: Libreria El Ateneo, 1964.

PINOTTI, R.N.; AMARAL, J.G.C. Informações econômicas da mamona como biocombustível. **Pesquisa & Tecnologia**, São Benardo do Campo, v. 10, n. 1, p. 1-6, 2013.

PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BIODIESEL. **Selo combustível social e agricultura familiar**. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/selo.htm>>. Acesso em: 5 out. 2005.

PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BIODIESEL. **Testes e ensaios para validação do uso da mistura biodiesel B5 em motores e veículos**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2009.

RODRIGUES, H. S. **Obtenção de ésteres etílicos e metílicos, por reações de transesterificação, a partir do óleo da palmeira Latino Americana macaúba – *Acrocomiaaculeata***. 2007. 236 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2007.

ROSKILLY, A. P. et al. The performance and the gaseous of two small marine craft diesel engines fuelled with biodiesel. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 28, p. 872-880, 2008.

ROYO, J. **Algodão**: algodão contribui para 5% do biodiesel brasileiro. Disponível em: <<http://diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=21674&secao=Pacot>>. Acesso em: 3 nov. 2010.

SANTOS, W. L. P. et al. **Química e sociedade**. São Paulo: Nova Geração, 2005.

SCARIOT, A. Seed dispersal and predation of the palm *Acrocomia aculeata*. **Principes**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 5-8, 1998.

SCHIOZER, D. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

SHARON, H. et al. A test on DI diesel engine fuelled with methyl esters of used palm oil. **Renewable Energy**, Oxford, v. 47, p. 160-166, 2012.

SILVA, J. C. **Macaúba**: fonte de matéria-prima para os setores alimentício, energético e industrial. 1994. 41p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 1994.

SINGH, S. P. **Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel**: a review. 2010. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)>. Acesso em: 30 mar. 2010.

SLUSZZ, T.; MACHADO, J. A. D. Características das potenciais culturas matérias-primas do biodiesel e sua adoção pela agricultura familiar. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 44., 2006, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SOBER, 2006.

SOLOMONS, G.; FRHLE, C. **Química orgânica**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

SOUZA, C. F. T. et al. Caracterização físico-química do óleo da polpa de macaúba obtido de frutos secos a diferentes tempos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 4., e SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE

OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 1., . 2010, João Pessoa. **Anais...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010. p. 1840-1844.

SZPIZ, R.R. et al. **Óleos de macaúba**: uma alternativa para a oleoquímica. Rio de Janeiro: Embrapa CTAA, 1989. v.14, p. 1-10. (Comunicado Técnico).

TAPANES, N. C. O. et al. Biodiesel no Brasil: matérias primas e tecnologias de produção. **Acta Scientiae & Technicae**, Volta Redonda, v. 1, n. 1, p. 119-125, fev. 2013.

TAYLOR, C.F. **Análise dos motores de combustão interna**. Tradução de Mauro Ormeu Cardoso Amorelli. São Paulo: E. Blucher, 1971. 517p. Título original: The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice.

TCHE QUÍMICA. **Biodiesel**. 2008. Disponível em: <<http://www.tchequimica.tk>>. Acesso em: 25 jun. 2008.

TECNOMOTOR. **Manual de instruções**: opacímetro TM138. São Carlos, 2013.

TEIXEIRA, C. M.; MORALES, M. E. **Microalgas como matéria-prima para a produção de biodiesel**. Disponível em: <<http://www.dms.ufsc.br/mip5131/arquivos/Biodiseldealgas.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2008.

TEIXEIRA, E. *Acrocomia aculeate* In: TASSARO, H. **Frutas no Brasil**. São Paulo: Empresa das Artes, 1996. p.15.

TOMIC, M.D. et al. Effects of fossil diesel and biodiesel blends on the performances and emissions of agricultural tractor engines. **Thermal Science**, Belgrade, v. 17, n. 1, p. 263-278, 2013.

UTLU, A. 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**, Oxford, v.33, p.1936-1941, 2008.

WILHELM, H. M. et al. Avaliação do desempenho e das emissões de biodiesel e misturas em motor do ciclo diesel para aplicação em geração de energia elétrica. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 3., 2009, Brasília. **Anais...** Brasília: MCT, 2009. p. 973-974.

YAMANE, K.; UETA, A.; SHIMAMOTO, Y. Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuel on injection combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine. **International Journal of Engine Research**, London, v. 2, n. 4, p. 249-261, 2001. Disponível em: <<http://jer.sagepub.com/content/2/4/249.abstract>>. Acesso em: 22 jun. 2014.

ZAGONEL, G.; COSTA NETO, P.R.; RAMOS, L.P. Obtenção de biodiesel a partir da reação de transesterificação de óleo de soja usado em frituras In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 1., 1999, Londrina. **Anais...** Londrina: Centro Nacional de Pesquisa de Soja; Empresa Nacional de Pesquisa Agropecuária, 1999.p.342.

ZHANG, Y.; BOEHMAN, A. L. Impact of biodiesel on NOx emissions in a common rail direct injection diesel engine. **Energy & Fuels**, Washington, v. 21, p. 2003-2012, 2007.

## APÊNDICE

### TEMPERATURA E PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Data: 04/04/2016	Horário	12:00h.	18:00h.	24:00h.	
Temperatura	Bulbo seco (°C)	23,4	30,8	23,0	Máxima: 31,2
	Bulbo úmido(°C)	21,0	21,0	18,4	
Pressão atmosférica	mm Hg	916,8	914,1	915,7	
<hr/>					
Data: 05/04/2016	Horário	12:00h.	18:00h.	24:00h.	
Temperatura	Bulbo seco (°C)	22,0	29,2	23,6	Máxima: 29,6
	Bulbo úmido (°C)	19,0	21,4	19,0	
Pressão atmosférica	mm Hg	917,9	914,5	915,3	
<hr/>					
Data: 06/04/2016	Horário	12:00h.	18:00h.	24:00h.	
Temperatura	Bulbo seco (°C)	22,2	28,4	20,6	Máxima: 29,6
	Bulbo úmido (°C)	19,0	21,0	18,2	
Pressão atmosférica	mm Hg	914,5	912,3	912,9	
<hr/>					
Data: 07/04/2016	Horário	12:00h.	18:00h.	24:00h.	
Temperatura	Bulbo seco (°C)	23,0	29,6	21,6	Máxima: 30,4
	Bulbo úmido (°C)	20,0	21,0	18,2	
Pressão atmosférica	mm Hg	912,9	910,3	911,1	

Data: 11/04/2016	Horário	12:00h.	18:00h.	24:00h.	
Temperatura	Bulbo seco (°C)	23,2	30,6	24,2	Máxima: 31,2
	Bulbo úmido (°C)	20,4	21,6	10,0	
Pressão atmosférica	mm Hg	914,2	912,4	913,1	