

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL COM A  
UTILIZAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL OBTIDO A PARTIR DO  
REUSO DE ÓLEO VEGETAL**

**ADEILTON FERNANDES**

**SANTA BÁRBARA D'OESTE**

**2012**

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL COM A  
UTILIZAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL OBTIDO A PARTIR DO  
REUSO DE ÓLEO VEGETAL**

**ADEILTON FERNANDES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima

**SANTA BÁRBARA D'OESTE**

**2012**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL COM A  
UTILIZAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL OBTIDO A PARTIR DO  
REUSO DE ÓLEO VEGETAL**

**ADEILTON FERNANDES**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 22 de novembro de 2012, pela  
Banca Examinadora constituída pelos Professores:

---

Prof. Dr. Carlos Roberto C. Lima, Presidente - UNIMEP

---

Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho - UNIMEP

---

Prof. Dr. Gilberto Martins – Universidade Federal do ABC

Dedico este trabalho a minha esposa Isabel (*in memoriam*), que apesar de distante, sempre estará presente em minha vida, e também a minha atual família Carol, Rafael e Leticia, que não mediram esforços para que eu conquistasse mais esta vitória.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima, pela atenção e apoio na construção deste trabalho.

A minha mãe, Maria Conceição, que sempre me deu forças através de suas orações para que eu concluísse este trabalho da melhor forma possível.

A minha irmã Lucimara e meu pai José Fernandes.

Aos meus amigos e colegas de trabalho Frederico Demolin e Fernando Raphael, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos de dificuldades e alegrias.

E, especialmente, a minha esposa, Carol, por sempre me incentivar e estar ao meu lado.

FERNANDES, Adeilton. **Análise do Desempenho de Motor Diesel com a Utilização de Biocombustível Obtido a Partir do Reuso de Óleo Vegetal**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a avaliação de desempenho de um motor de combustão de ciclo diesel através da análise da emissão dos gases CO, CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, resultantes do processo de combustão, bem como da análise do desempenho técnico relacionado ao consumo, desenvolvimento de potência e torque, realizados em um laboratório de ensaio dinamométrico. O combustível usado para o estudo foi o biodiesel obtido a partir de óleo vegetal de cozinha já usado. Também, neste trabalho, foi avaliado o método para a produção do biodiesel, em função da análise das características peculiares deste processo, contemplando a avaliação e controle de variáveis físico-ambientais, que levassem a um melhor desempenho do motor em questão, comparando-se o uso do biodiesel puro e com misturas ao diesel comercial de origem fóssil. Os resultados mostraram, pela análise técnica, que o torque e a potência obtidos nos testes utilizando biodiesel em relação ao diesel foram praticamente iguais, com apenas um pequeno acréscimo do consumo de combustível quando utilizado o biodiesel e suas misturas. Maior a porcentagem de biodiesel adicionado ao diesel, maior o consumo, sendo possível igualar o consumo mediante a adição de aditivos reforçadores de octanagem. Quanto à resposta ambiental, os ganhos nas reduções de emissões de gases nocivos são expressivos quando utilizado o biodiesel e suas misturas, principalmente em relação à emissão de gases CO e CO<sub>2</sub>. Quanto à emissão do gás NO<sub>x</sub>, houve um pequeno aumento quando utilizado o biodiesel, progressivo conforme o incremento do biodiesel ao diesel, concluindo-se que evitar o balanço estequiométrico entre a mistura ar/combustível, de forma concomitante com a utilização de antioxidantes no processo de obtenção do biodiesel pode reduzir os níveis de emissões do NO<sub>x</sub>.

**PALAVRAS-CHAVE:** Motor Diesel; Biocombustível; Biodiesel; Óleo Vegetal; Sustentabilidade.

FERNANDES, Adeilton. *Analysis of the Performance of a Diesel Motor with the use of Biofuel Obtained from the Reutilization of Vegetable Oil. 2012. 80 f.* Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

### **ABSTRACT**

The present study aims at evaluating the performance of a combustion engine diesel cycle by analyzing the emission of CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>, resulting from the combustion process, as well as analysis of technical performance related with the consumption, development power and torque, made in a laboratory test rig. The fuel used for the study was the biodiesel derived from vegetable oil cooking already used. Also in this work, was analyzed the method for the production of biodiesel, according to the analysis of peculiar features of this process, including for analysis and control of physical and environmental variables, which would lead to a better performance of the engine in question, through the pure biodiesel and blends with the commercial fossil diesel. The results showed, for the technical analysis, that the torque and potency values in tests using biodiesel compared to diesel were nearly identical, with only a slight increase in fuel consumption when used biodiesel and mixtures thereof. The higher the percentage of biodiesel in the diesel increased, greater consumption, it is possible to equalize the consumption with additives by addition of octane boosters. Regarding the environmental feasibility, the gains in emission reductions of greenhouse gases are significant when used biodiesel and mixtures thereof, especially in relation to greenhouse gas CO and CO<sub>2</sub>. Regarding the emission of NO<sub>x</sub> gas, there was a small increase when using biodiesel, according to the progressive increase of biodiesel percent in diesel; preventing the swing between the stoichiometric air / fuel mixture, concomitantly with the use of antioxidants in the process of obtaining biodiesel can reduce emissions levels of NO<sub>x</sub>.

**KEY-WORDS:** Diesel Engine, Biofuel, Biodiesel, Vegetable Oil, Sustainability.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	2
1.2 MÉTODO DE PESQUISA .....	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	5
2.1.1 Tipos de Motores de Combustão Interna .....	6
2.1.2 Força Trativa de um Motor de Combustão.....	7
2.1.3 Ensaios de Motores de Combustão Interna .....	7
2.1.4 Emissões de Gases pelos Motores de Combustão Interna .....	8
2.2 ÓLEO DIESEL COMBUSTÍVEL .....	9
2.2.1 Produção do Óleo Diesel.....	9
2.2.2 Tipos de Diesel .....	10
2.2.3 Utilização do Óleo Diesel.....	11
2.3 BIODIESEL .....	12
2.3.1 Biodiesel Obtido do Óleo de Fritura .....	18
2.3.2 Reação de transesterificação para obtenção do biodiesel a partir do reuso do óleo vegetal residual de frituras .....	22
2.3.3 Gases de combustão resultantes da utilização do biodiesel em motores de ciclo diesel .....	27
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
3.1 SUPORTE INSTRUMENTAL .....	33
3.2 COLETA SELETIVA DO ÓLEO VEGETAL RESIDUAL DE FRITURA .....	35
3.3 PRODUÇÃO DO BIODIESEL A PARTIR DO REUSO DO ÓLEO VEGETAL.....	36
3.4 PREPARAÇÃO DE MISTURAS DO BIODIESEL COM ÓLEO DIESEL .....	39
3.5 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DINAMOMÉTRICOS NO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE CICLO DIESEL .....	39
3.6 TESTES DE EMISSÃO DE GASES .....	41
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>58</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	58
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>66</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de desenvolvimento do trabalho .....	3
Figura 2. Curvas de torque e potência de um motor movido a diesel .....	6
Figura 3. Enfoque dos principais produtores mundiais de biodiesel .....	14
Figura 4. Porcentagem mínima de mistura de biodiesel no óleo diesel .....	15
Figura 5. Evolução da produção de biodiesel no Brasil .....	16
Figura 6. Transesterificação de triacilgliceróis .....	22
Figura 7. Processo de reação de transesterificação de triacilgliceróis .....	23
Figura 8. Média da emissão de gases utilizando biodiesel .....	29
Figura 9: Porcentagem de redução das emissões de CO .....	30
Figura 10. Painel frontal do VI .....	34
Figura 11. Sistema supervisório de controle e o sistema de controle eletrônico da balança de medição de consumo de combustível .....	35
Figura 12. Detalhe mostrando o motor diesel acoplado ao dinamômetro .....	35
Figura 13. Sistema de coleta de óleo residual de fritura .....	35
Figura 14. Processo de pré-tratamento do óleo residual de fritura .....	35
Figura 15. Filtro-prensa .....	36
Figura 16. Processo de transesterificação .....	37
Figura 17. Processo de transesterificação .....	37
Figura 18. Separador de fases .....	38
Figura 19. Reator da reação de transesterificação .....	38
Figura 20. Destilador para remoção do álcool no biodiesel .....	38
Figura 21. Analisador de emissão automotiva Mod. MEXA-584L .....	41
Figura 22. Sonda para condução dos gases de escapamento .....	42
Figura 23. Curva torque x rotação .....	44
Figura 24. Curva potência x rotação .....	46

Figura 25. Curva consumo x rotação .....	48
Figura 26. Relação de emissões de CO <sub>2</sub> x Potência .....	50
Figura 27. Relação de emissões de CO x Potência .....	51
Figura 28. Relação de emissões de NO <sub>x</sub> x Potência .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição do gás de escapamento de motores Diesel (vários tipos) .....	8
Tabela 2. Subprodutos da combustão incompleta .....	9
Tabela 3. Caracterização do biodiesel utilizado nos testes à temperatura ambiente .....	17
Tabela 4. Padrão de qualidade do óleo de soja virgem e usado .....	20
Tabela 5. Propriedades do diesel em relação ao biodiesel .....	22
Tabela 6: Vantagens e desvantagens da utilização de processos alcalinos metóxidos e etóxidos .....	25
Tabela 7: Vantagens e desvantagens de processos para obtenção do biodiesel via catálise básica e ácida .....	27
Tabela 8. Emissões médias do biodiesel comparado ao diesel .....	28
Tabela 9: Energia média de tipos de biodiesel x diesel .....	29
Tabela 10: Dados dinamométricos obtidos da relação torque x rotação .....	43
Tabela 11: Dados dinamométricos obtidos da relação potência x rotação .....	45
Tabela 12: Dados dinamométricos obtidos da relação consumo x rotação .....	47
Tabela 13: Dados dinamométricos obtidos da relação emissões de CO <sub>2</sub> x potência.....	49
Tabela 14: Dados dinamométricos obtidos da relação emissões de CO x potência.....	52
Tabela 15: Dados dinamométricos obtidos da relação emissões de NO <sub>x</sub> x potência.....	54
Tabela 16: Poder calorífico de misturas de biodiesel .....	55

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Potência desenvolvida .....	40
Equação 2 – Consumo de combustível .....	40
Equação 3 – Consumo específico de combustível .....	41

## GLOSSÁRIO

- **BIOCOMBUSTÍVEL** - Derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.
- **BIODIESEL** - Combustível renovável derivado de óleos vegetais, como girassol, mamona, soja, babaçu e demais oleaginosas, ou de gorduras animais, usado em motores a diesel, em qualquer concentração de mistura com o diesel, produzido através de um processo químico que remove a glicerina do óleo.
- **CICLO DIESEL** - Motor de combustão interna em que a combustão do combustível se faz pelo aumento da temperatura provocado pela compressão de ar.
- **CICLO OTTO** - Motor de combustão interna em que a combustão do combustível se faz pela inflamação provocada pela compressão e centelhamento da vela.
- **CILINDRADA** - Volume do cilindro, igual ao produto da área da cabeça do pistão pelo curso, mais o volume da câmara de combustão, se houver. A soma dos volumes de todos os cilindros é denominada de cilindrada total ou deslocamento.
- **CONAMA** - Conselho Nacional de Meio Ambiente.
- **ESTEQUIOMETRIA** - Balanço de massa de ar x combustível
- **LABVIEW** - (Acrônimo para Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) Linguagem de programação gráfica originária da National Instruments.
- **POTÊNCIA** - Trabalho realizado pelo motor, num intervalo de tempo.
- **SMOKE METER** - Medidor de fumaças quanto ao teor de seus gases.
- **THROTTLE ACTUATOR** - Atuador do acelerador
- **TRANSESTERIFICAÇÃO** - Processo mais utilizado atualmente para a produção de Biodiesel. O processo se inicia juntando o óleo vegetal com um álcool (metanol, etanol, propanol, butanol) e catalisadores (que podem ser ácidos, básicos ou enzimáticos).

## 1 INTRODUÇÃO

Estudos envolvendo a utilização do biodiesel e possíveis misturas com o diesel comercial tiveram sua origem após a revolução industrial, motivados pela grande demanda de combustível e a utilização emergencial ocorrida em função da crise de abastecimento mundial nos períodos das guerras. Atualmente, a necessidade da inserção do biocombustível no mercado se faz necessária não somente para equilibrar a relação oferta/demanda, mas, também, pela viabilidade ambiental quanto à redução da emissão de gases poluentes emitidos pelo modal de transporte rodoviário (BARROS *et al.*, 2008; SHAHID e JAMAL, 2008).

Os biocombustíveis tornaram-se um grande atrativo comercial devido à crescente exigência do cliente final quanto à utilização de combustíveis de fontes renováveis, com menor índice de impactos negativos ambientais (MACHADO, 2003).

A inserção de biocombustíveis no mercado apresenta discussões quanto à viabilidade técnica e econômica, uma vez que a viabilidade ambiental é sua característica principal. Vários países, como Alemanha, Espanha e França, entre outros vêm, nas últimas décadas, disseminando a cultura da utilização de biocombustíveis, de forma concomitante com os outros combustíveis já existentes no mercado, como o diesel e a gasolina. Trabalho recente desenvolvido na Índia aponta para a alta viabilidade do uso de biodiesel de origem vegetal, com características e potencial econômico dependente da planta original (BORUGADDA E GOUD, 2012). O Brasil, por sua vez, também tem apresentado grandes contribuições como a inserção do etanol produzido da cana de açúcar, que, além de propiciar um melhor controle dos preços praticados para o diesel e seus derivados, pode contribuir para suprir possíveis recessos de produtividade do petróleo (MACHADO, 2003).

A utilização do biodiesel de origem vegetal tem se destacado no mercado nacional e internacional, principalmente quando se trata da produção do biodiesel a partir do reuso do óleo vegetal, o qual é normalmente descartado pela sociedade em geral, comprometendo o esgoto doméstico e descartado em grandes volumes pelas indústrias alimentícias, estabelecimentos comerciais que, na maioria das vezes, realiza o descarte sem um correto tratamento, causando danos aos rios e lençóis freáticos (NETO *et al.*, 2000).

Por outro lado, especificamente com relação às questões ambientais, a resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) n. 415, de 24 de setembro de 2009, estabelece novos padrões de emissão para os motores veiculares, nacionais e importados, visando à redução da poluição do ar nos centros urbanos do país e à economia de combustível (CONAMA, 2009). Paralelamente, a Lei 11.097/2005 da ANP (Agência Nacional do

Petróleo) estabelece o incremento do biodiesel ao óleo diesel, discriminando porcentagens/ano, objetivando a redução do enxofre e demais componentes do diesel comercial, visando, também, à inserção do biodiesel 100%, chamado de combustível social, uma vez adquirido de fonte de agricultura familiar ou sob aquisição de fornecedores oriundos da sociedade (ANP, 2005).

O desenvolvimento deste projeto visa a estudar alternativas para a utilização de biocombustíveis e a avaliação dos impactos ambientais em termos de emissões. Também permitirá a avaliação da adequação dos laboratórios estudados quanto ao atendimento à resolução CONAMA n. 415 e à Lei 11.097/2005 da ANP, que estabelece o incremento do biodiesel ao óleo diesel.

## **1.1 OBJETIVOS**

O presente trabalho tem por objetivo geral estudar e avaliar o desempenho de um motor ciclo diesel com o uso de biodiesel, com relação ao desempenho técnico e ambiental.

Como objetivos específicos, podem ser citados:

- Produzir biodiesel de origem vegetal a partir do reuso do óleo vegetal de cozinha usado;
- Analisar, de forma comparativa, o desempenho técnico-ambiental quanto ao uso do biodiesel produzido sem misturas, bem como a avaliação da adição de misturas de biodiesel adicionado ao diesel comercial.

## **1.2 MÉTODO DE PESQUISA**

Para o desenvolvimento do trabalho experimental, foram realizados ensaios no motor de combustão interno de ciclo diesel, de modo a analisar seu desempenho com a substituição do combustível diesel pelo biodiesel e possíveis misturas.

As etapas de realização foram divididas em:

- Desenvolvimento de um programa de coleta seletiva de óleo de cozinha usado;
- Desenvolvimento de um processo para produção de biodiesel a partir do óleo de cozinha usado;

- Caracterização do biodiesel de origem vegetal a partir do reuso do óleo de cozinha e o estudo da viabilidade de sua mistura com o diesel comercial, analisando o torque, potência, consumo e análise dos principais gases emitidos.

A Figura 1 mostra o esquema utilizado para o desenvolvimento do trabalho.

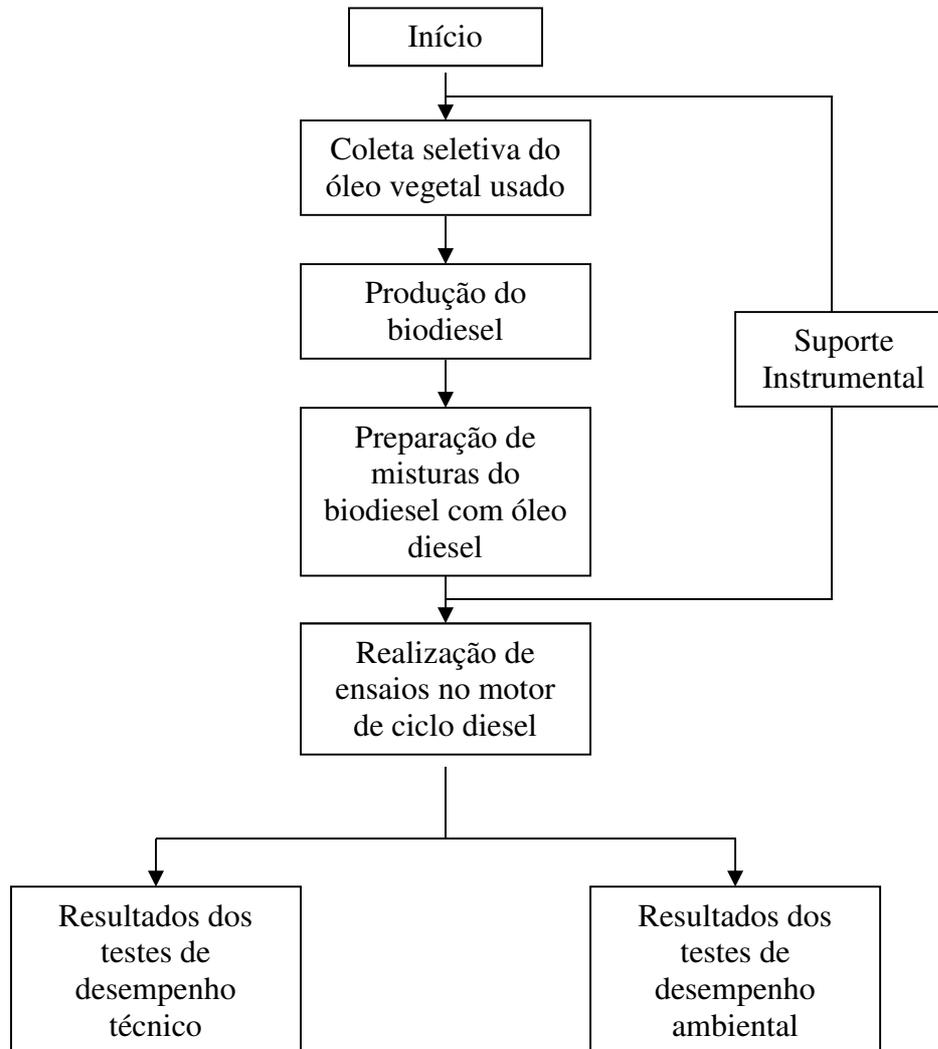


Figura 1: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 7 (sete) capítulos. Além do Capítulo 1 de Introdução, são apresentados os seguintes capítulos:

- Capítulo 2- Revisão Bibliográfica: apresenta conceitos e dados da literatura sobre motores de combustão interna e óleo diesel combustível.

-Capítulo 3- Suporte Instrumental: apresenta um resumo explicativo de todo o material e equipamento instrumental utilizado e aperfeiçoado para a realização dos ensaios e testes dos motores e combustíveis.

-Capítulo 4- Metodologia Experimental: apresenta detalhadamente os testes e ensaios utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

-Capítulo 5- Discussão e Análise dos Resultados: mostra os resultados encontrados e a discussão e análise destes resultados.

-Capítulo 6- Conclusões: traz as principais conclusões encontradas com o desenvolvimento da pesquisa, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

Na sequência, são apresentadas as Referências Bibliográficas usadas no trabalho e os anexos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo discute os temas principais ligados à pesquisa, com base na literatura científica. Os temas abordados são ligados a motores de combustão interna, definições e produção de óleo diesel combustível em suas várias formas.

### 2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores de combustão têm por objetivo transformar energia química e física em energia térmica, que, por sua vez, resulta na transformação em energia mecânica, que proporciona o deslocamento dos veículos através do conjunto de transmissão. Os motores de combustão interna utilizados em veículos automotores podem ser classificados em dois principais grupos: os de ciclo Otto e os de ciclo Diesel. O motor de ciclo Otto, assim nomeado em homenagem a seu inventor, o técnico alemão Nikolaus August Otto, e o motor ciclo Diesel, inventado pelo engenheiro Rudolf Christian Karl Diesel (BOSH, 1993).

Ambos os motores apresentam características peculiares, como:

- Motor de ciclo Otto: aplicado a veículos leves de passeio, veículos de competição e veículos de médio porte utilizados no transporte de pequenas cargas. Este tipo de motor possibilita o alcance de altas rotações, desenvolvidas pela queima do combustível na câmara de combustão, juntamente com o ar coletado na admissão, através do centelhamento produzido pelas velas de ignição. A nomenclatura característica deste tipo de motor é IC, isto é, Ignição por Centelha (VAN WYLEN e SONNTAG, 1995).

- Motor de ciclo Diesel: aplicado na sua maioria em veículos de grande porte, principalmente os de transporte de cargas pesadas. Também aplicável em alguns veículos de passeio, mas, devido aos altos índices de poluição atmosférica, responsabilidade atribuída ao combustível diesel devido à alta taxa de concentração de enxofre, seu uso tornou-se definido e direcionado para o mercado rodoviário. Este tipo de motor caracteriza-se pela baixa manutenção, se comparado com os motores de ciclo Otto, devido à dispensa de subsistemas eletroeletrônicos para provocar o centelhamento, uma vez que seu funcionamento se baseia na compressão do diesel juntamente com o ar, sendo desnecessária a utilização de velas para provocar a centelha, o que é justificado pela característica físico/química do diesel, que se inflama apenas pela compressão (BOULANGER, 1990).

### 2.1.1 Tipos de Motores de Combustão Interna

A maioria dos veículos terrestres é movida por motores de combustão interna, que podem ser: combustível inflamado por compressão (ciclo Diesel) e combustível inflamado por centelha (ciclo Otto /ciclo Wankel). O primeiro tipo utiliza óleo combustível e o segundo utiliza gasolina, álcool ou gás natural (BOSH, 2005).

Os motores de combustão interna de ciclo Otto possuem algumas características peculiares, devido ao regime de operação inicialmente baixo, com um mínimo de torque disponível. Com o aumento da rotação, o torque aumenta, chegando ao seu máximo valor, que posteriormente vai reduzindo até que a rotação atinja o máximo. A potência, nesta mesma linha de raciocínio, inicia-se em um valor baixo, tendendo a aumentar em função da rotação e depois decresce novamente, quando a rotação de torque máximo é mais baixa que a rotação da potência máxima (BOSH, 1993).

Comportamento oposto aos motores de ciclo Otto é o que ocorre nos motores a diesel: o torque em baixa rotação é alto quando comparado a motor a gasolina e, com o aumento da rotação, as quedas de torque e de potência são insignificantes, com curva de torque linear, mantendo-se mais constante com a variação de rotação (BOSH, 1993).

Os motores a diesel são indicados para trabalhos que exigem maior força (torque) sem necessidade de grandes velocidades. A Figura 2 mostra a curva de torque e potência de um motor diesel.

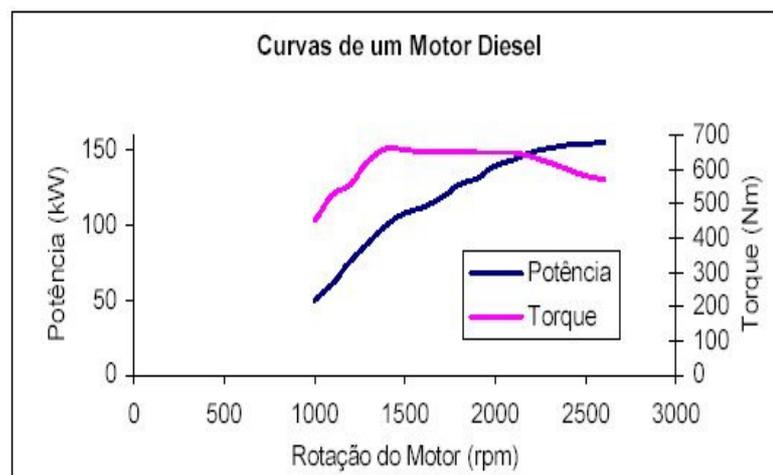


Figura 2: Curvas de torque e potência de um motor movido a diesel. Fonte: Wong (, 2001)

Através da Figura 2 é possível observar que na intersecção entre as linhas de torque e potência é onde se obtém a máxima energia fornecida pelo motor com o menor consumo possível, isto é, maior aproveitamento da conversão de energia térmica em mecânica.

O consumo de um motor em baixas rotações é superior quando comparado ao consumo em rotações intermediárias, pois as velocidades econômicas são correspondentes às rotações que apresentam os menores valores de consumo específico, sendo estas pontuadas na concomitância das curvas de torque e potência (WONG, 2001).

De acordo com as curvas de potência e torque, a elasticidade de um motor é uma característica importante por fornecer potência e torque suficientes em função de um tempo pré-determinado. Assim, pode-se concluir que os motores diesel são principalmente empregados em veículos pesados, geralmente utilizados no transporte de cargas, objetivando rotações baixas e médias, mas com torques e potências elevadas, garantindo a segurança dos mesmos. Já no ciclo Otto, atribui-se uma maior potência por cilindrada, possibilitando o desenvolvimento de velocidades maiores devido ao alcance de altas rotações (WONG, 2001).

### **2.1.2 Força Trativa de um Motor de Combustão**

A potência de um motor veicular procura se estabelecer mesmo quando as rotações se alteram, assim o torque apresenta uma variação inversamente proporcional à rotação, como é o caso de uma situação de aclive, onde o motor apresentará menores rotações, porém com um torque maior para suprir essa exigência. Em rotações mais altas, em que geralmente o veículo está em uma planície ou declive geográfico favorável ao deslocamento, o alto torque cessa (WONG, 2001).

### **2.1.3 Ensaios de Motores de Combustão Interna**

Os motores de combustão interna, antes mesmo de serem destinados a sua finalidade, são submetidos a testes em bancadas de ensaios dinamométricos, objetivando analisar seu ciclo de vida, bem como identificar possíveis falhas. Estes testes também possibilitam a realimentação de dados de forma pró ativa quando do lançamento de novos produtos e/ou a produção de um novo lote de fabricação. Basicamente, estes testes são realizados com o uso de dinamômetros de freios eletromagnéticos.

Segundo Maciel *et al.* (2003), freios eletromagnéticos, freios de Foucault ou freios de correntes parasitas transformam energia do movimento linear ou rotativo em energia térmica, caracterizada pela variação de campo magnético do estator, onde ocorrem induções de correntes nesse meio.

A corrente induzida e o campo magnético gerado nestes tipos de freios geram uma força de repulsão entre o rotor e o estator, que, caso este meio tiver resistividade nula, a força não

decairá com o tempo; mas, quando a resistividade não é nula, o que ocorre, na maioria das vezes, é a dissipação de potência no meio condutor devido às perdas de energia por efeito Joule, possibilitando que esta energia penetre no material, atingindo nova posição de equilíbrio. Para tal, se faz necessário produzir um campo magnético variável, provocado pela indução de corrente elétrica, que atuará no disco e em torno de seu eixo central com certa velocidade, sendo que o disco será freado pela ação destes campos, sem nenhum contato físico desse com outras partes do conjunto. O sistema de frenagem entre o disco e o eixo rotor é realizado pela combinação de campos magnéticos, um da bobina e outro pela corrente parasita, que força o disco a frear. Sendo assim, os freios de correntes parasitas fazem uso do sistema em que o meio condutor se movimenta em relação a um campo magnético externo fixo (DIETRICH, 2000).

#### 2.1.4 Emissões de Gases pelos Motores de Combustão Interna

Segundo o Protocolo de Quioto, os países classificados como desenvolvidos sofrem sanções quanto ao não cumprimento das metas relacionadas à emissão de gases de efeito estufa, independentemente de origem, nestes países 21% dos gases emitidos estão atribuídos ao transporte, isto é, veículos automotores, fazendo-se necessária a implementação de tecnologias e o desenvolvimento de processos e ideias para minimizar estas emissões (CARVALHO, 2007).

Os testes dinamométricos em motores de combustão interna devem ser realizados em laboratórios de ensaios específicos, onde são analisadas medições da composição dos gases de escape. As Tabelas 1 e 2 apresentam alguns parâmetros utilizados para análise.

Tabela 1. Composição do gás de escape de motores Diesel (vários tipos).

<b>Componente do escape</b>	<b>Em marcha lenta</b>	<b>No rendimento máximo</b>
Óxido de nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	50 a 200 ppm	600 a 2500 ppm
Hidrocarbonetos (HC)	50 a 500 ppm	< 50 ppm
Monóxido de carbono (CO)	100 a 450 ppm	350 a 2000 ppm
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Até 3,5 vol.%	12 a 16 vol.%
Vapor de água (H <sub>2</sub> O)	2 a 4 vol.%	Até 11 vol.%
Oxigênio (O)	18 vol.%	2 a 11 vol.%
Nitrogênio (N)	Resto	Resto
Quantidade de fumaça (Carro de passeio)	SN < 0,5	SN: 2 a 3
Temperatura do gás de escape	100 a 200°C	550 a 800°C

Fonte: Bosch (2005)

Tabela 2. Subprodutos da combustão incompleta.

<b>Hidrocarbonetos não queimados</b>	<b>Hidrocarbonetos parcialmente queimados</b>
Parafinas e hidrocarbonetos aromáticos	Aldeídos
-	Cetonas
-	Ácidos carboxílicos
-	Monóxido de carbono

Fonte: Bosch (2005)

## 2.2 ÓLEO DIESEL COMBUSTÍVEL

O óleo diesel é um derivado da destilação do petróleo bruto usado como combustível nos motores diesel. Constituído basicamente por hidrocarbonetos saturados, o óleo diesel é um composto formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio, selecionados de acordo com as características de ignição e de escoamento adequadas ao funcionamento dos motores diesel (ALEME, 2011).

O óleo diesel é obtido do petróleo bruto através de vários processos, dentre eles o craqueamento e a destilação fracionada, apresentando a condição química de  $C_{12}H_{26}$ . Estes tipos de processos são rígidos e limitam a correção da massa específica do óleo diesel como produto final, fator determinante para alterar características como desempenho e emissão de gases de um motor de combustão interna (VALENTE, 2007).

No processo de refinação do óleo bruto, é obtido o gás GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), querosene de aviação, entre outros. O óleo diesel é um produto pouco inflamável, mediamente tóxico, pouco volátil, límpido, com uma característica de odor forte e determinante (ALEME, 2011).

### 2.2.1 Produção do Óleo Diesel

A justificativa dos investimentos no Brasil aplicados na produção do diesel é creditada ao grande volume de transporte de carga realizado por força automotiva de motores diesel, seja por via rodoviária, fluvial ou cabotagem, o que faz com que o óleo diesel seja o derivado propulsor do refino em nosso país, correspondendo a 39% do volume do barril de petróleo (ALLGAYER, 2010).

A empresa Petrobrás - Petróleo Brasileiro S/A, sociedade anônima de capital aberto, cujo acionista majoritário é o Governo do Brasil, mantém suas operações priorizando a

produção do diesel como principal produto, atendendo o suprimento do mercado brasileiro, priorizando os critérios competitivos de custo e qualidade (PETROBRÁS, 2012).

Visando a atender os quesitos de sustentabilidade exigidos pela sociedade e pelas leis vigentes, a Petrobrás tem refinado diferentes tipos de petróleo, reduzindo o seu teor de enxofre, como, por exemplo, o diesel S500, S50 e S10, valores estes referentes ao índice de ppm de enxofre no diesel. No mercado atual, com a inserção dos motores com tecnologia EURO 5, apenas é indicado o uso do óleo diesel S10, ou seja, com conteúdo de enxofre total de, no máximo, 10 mg/kg ou 10 ppm (PETROBRÁS, 2012).

### **2.2.2 Tipos de Diesel**

Segundo a ANP (2012), o óleo diesel pode ser classificado, de acordo com sua aplicação, nos seguintes tipos:

- Tipo "B" (com um teor máximo de 0,35% de enxofre)
- Tipo "D" (com um teor máximo de 0,2% de enxofre)
- Tipo "S500" (com um teor máximo de 0,05% de enxofre)

O óleo diesel Tipo "D" é utilizado nas regiões com as maiores frotas em circulação e condições climáticas adversas à dispersão dos gases resultantes da combustão do óleo diesel, necessitando de maior controle das emissões. Em outras regiões, costuma-se utilizar o óleo diesel Tipo "B", em ascendência para o diesel S500 com no máximo 0,05% de enxofre, que passou a ser comercializado devido as novas normas internacionais de redução da emissão de enxofre na atmosfera.

### **Extra diesel aditivado**

O Extra Diesel Aditivado é um óleo diesel que contém aditivos autolimpantes e anticorrosivos do sistema de alimentação de combustível, reduzindo o desgaste dos bicos injetores, de sedimentos e depósitos, com propriedade de repelência contra possíveis contaminações de água eventualmente presente no diesel. O uso contínuo do Extra Diesel Aditivado gera uma pulverização mais eficaz do combustível na câmara de combustão, proporcionando uma mistura mais homogênea do combustível com o ar, melhorando o rendimento do motor e, por consequência, reduzindo o consumo de diesel e emissões provenientes da combustão, reduzindo a frequência de manutenção dos componentes do sistema de alimentação e prolongando a vida útil do motor (ANP, 2012).

## **De referência**

Este tipo de óleo diesel, também chamado diesel padrão, é utilizado como padrão para a homologação, ensaios de consumo, desempenho e teste de emissão, principalmente em montadoras de veículos com motorização a diesel, dentre outras empresas de inspeção veicular (ANP, 2012).

O óleo diesel marítimo é apresentado e comercializado conforme citado abaixo com características diferentes para atender diversas finalidades do usuário:

### **Marítimo comercial**

Utilizado em motores a diesel que são geralmente utilizados em embarcações, com características peculiares de ponto de fulgor, isto é, o óleo diesel evapora a temperaturas maiores quando comparado aos utilizados nos automóveis, proporcionando maior segurança reduzindo os ricos de chamas ou até mesmo explosões. Para o óleo diesel marítimo, o ponto de fulgor é fixado em um valor mínimo de 60 °C (ANP, 2012).

### **Especial para a marinha / ártico**

Produzido para atender características peculiares de ignição, de volatilidade, de escoamento a baixas temperaturas e de teor de enxofre, objetivando atender as necessidades dos militares, proporcionando rapidez e desempenho mesmo em baixas temperaturas de trabalho, como é o caso do Oceano Ártico. Este tipo de óleo diesel apresenta mesmo ponto de fulgor do óleo diesel marítimo comercial (ANP, 2012).

### **2.2.3 Utilização do Óleo Diesel**

Quando o ar é aspirado na câmara de combustão juntamente com o óleo diesel, ambos são submetidos a uma pressão de compressão, resultando na explosão e expansão dos gases, evidenciando a transformação de energia térmica em mecânica, energia esta utilizada para movimento do veículo (MACHADO, 2003).

Há uma projeção do aumento do consumo de óleo diesel, devido a suas características de durabilidade enquanto estocado, a eficiência do ciclo diesel é em média de 45%, marca suficientemente competitiva em relação aos demais combustíveis utilizados pelo mercado e

características sustentáveis quanto à energia empregada para obtenção do mesmo (MASSAGARDI, 2004; SHER, 1998 *apud* FERREIRA, 2008).

Os motores do ciclo diesel são empregados nas mais diversas aplicações, tais como: automóveis leves, vans, ônibus, caminhões, pequenas embarcações marítimas, máquinas de grande porte, locomotivas, navios, geradores elétricos e estacionários. Objetivando vários tipos de aplicações para o diesel, tem-se procurado manter algumas características relativas ao ponto de fulgor, respeitando os padrões de ignição para motores; porém, há alguns países que realizam a adição de misturas alterando suas principais características (MACHADO, 2003).

### **2.3 BIODIESEL**

Biodiesel é a mistura de oleaginosas ao diesel comercial ou, ainda, pode ser o óleo vegetal no seu estado virgem ou proveniente de óleos vegetais residuais de processos de frituras, óleos de animais etc., podendo ser utilizados como combustíveis alternativos de caráter sustentável, de grande aplicação a motores de combustão interna de ciclo diesel (KNOTHE *et al.*, 1997).

A grande biodiversidade ambiental encontrada no país, quanto ao clima tropical e grande quantidade de terras com planicidade adequada ao cultivo de oleaginosas (mamona, dendê, algodão, soja, etc.), bem como a cultura do plantio aqui empregada, que disponibiliza mão de obra qualitativa e quantitativamente viável, têm alavancado o Brasil de modo competitivo na busca da produção em grande escala do biodiesel. A escolha da oleaginosa a ser utilizada depende muito da cultura local, conhecimentos específicos e disponibilidade de recurso geográfico para o plantio (CASTELLANELLI, 2008).

O biodiesel de origem animal é obtido através do óleo de sebos de bovinos, peixes, couro de suínos etc., estando estas matérias primas disponíveis em locais como matadouros, devido as sobras das vísceras então não reaproveitadas, ou até mesmo da subtração de animais que por algum motivo não passaram no teste de qualidade e não podem ser consumidos (CARVALHO, 2007).

Rudolf Diesel, o inventor do motor de combustão interna de ciclo diesel, 100 anos atrás já propunha o uso do biodiesel a partir de oleaginosas, no caso em específico o uso do óleo de amendoim, projeto que o consagrou e abriu as portas para que se inicializassem pesquisas, realizadas até os dias atuais, quanto ao aproveitamento do potencial destas matérias primas de origem vegetal (MOTHÉ *et al.*, 2005).

O programa de óleos vegetais (OVEG) foi concebido em 1983, contribuindo no desenvolvimento de fontes de combustíveis sustentáveis para a aplicação em veículos automotivos. A primeira pesquisa reportada no Brasil começou em 1970, na Universidade Federal do Ceará, iniciando o programa PRODIESEL, que apresentou problemas em sua implementação devido à queda do valor do petróleo, medida então utilizada pelas indústrias de petróleo visando à concorrência comercial que este tipo de combustível apresentaria. O PRODIESEL retornou em 2002, onde até hoje são estudados os comportamentos técnico e ambiental oferecidos por este biocombustível alternativo (SOCCOL *et al.*, 2005).

Também o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) tem por objetivo reduzir a emissão dos gases pelos motores de combustão interna, reduzir a importação do óleo diesel mineral e gerar emprego e renda no campo no caso do plantio de oleaginosas, ou proporcionar a abertura de cooperativas, no caso do beneficiamento de óleo residual de frituras (NEGRELLO e ZENTI, 2007).

Existe uma viabilidade maior da produção do biodiesel pelas empresas que já atuam no mercado beneficiando o diesel de origem fóssil, pois, além de vender um produto com agregado sustentável, os investimentos para obtenção da matéria prima são bem menores (KETOLA e SALMI, 2010).

Depender de recursos naturais de outro país para garantir a sustentabilidade financeira do país propicia a origem também de outras dependências, como as de ordem política. Na busca pela independência, vários países como os Estados Unidos da América (EUA), têm buscado alternativas sustentáveis como a de produção do biodiesel. Quanto ao enfoque social, o biodiesel produzido a partir de oleaginosas aproxima ainda mais o homem ao campo, favorecendo a disseminação e preservação da cultura local (CAMPOS, 2006).

Na Figura 3, são apresentados os enfoques relacionados à produção mundial do biodiesel, por área geográfica.

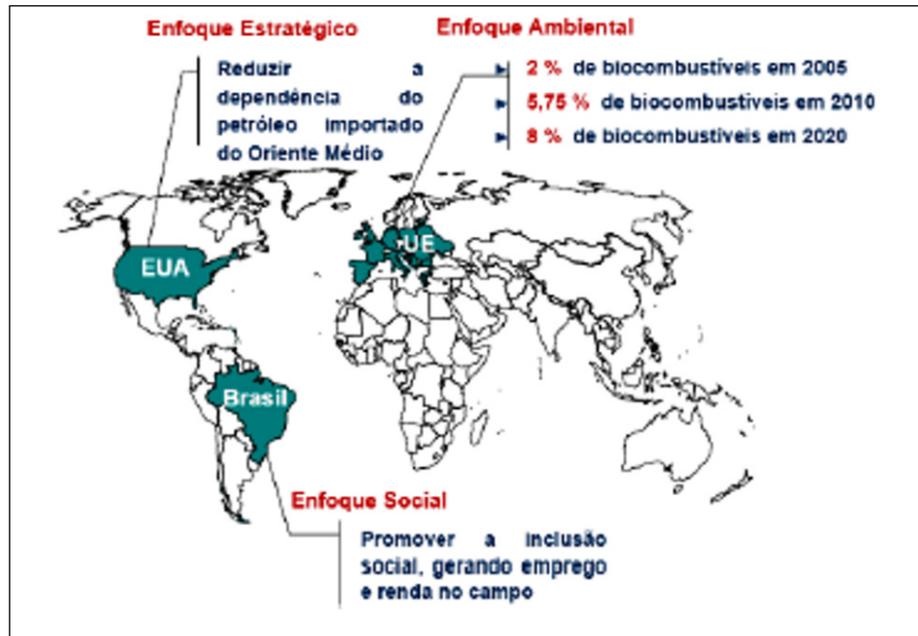


Figura 3: Enfoque dos principais produtores mundiais de biodiesel. Fonte: Adaptado de Campos (2006)

Do ponto de vista estratégico, Pinto *et al.* (2007) discute a viabilidade da produção do biodiesel a partir de oleaginosas pelo fato de que pode haver perda da biodiversidade em função da plantação desordenada na busca de grandes escalas de produção do biodiesel, fato que ocorre de modo semelhante ao se tratar da criação de gado, onde se desmata para criação de grandes campos para pastagem dos animais. Há quem diga também que a contaminação do ar, água e solo tenham tendências de aumento, em função das plantas oleaginosas necessitarem de um grande número de insumos químicos para fertilização e de fungicidas para a proteção contra as pragas, caso que não ocorre na fauna e flora natural.

Considerando o aspecto técnico, o biodiesel apresenta uma característica de grande relevância quanto ao número de cetanos presentes, bem maior que os encontrados no diesel comercial, obtendo-se um maior ganho energético na combustão do biodiesel, isto é, um menor retardamento da ignição (FERNANDES *et al.*, 2008).

No aspecto ambiental, a aplicação do biodiesel tem apresentado grande relevância, pois é possível proporcionar uma redução de até 90% do SO<sub>2</sub> resultante dos gases de escapamentos automobilísticos, além disso, o biodiesel associado a misturas com diesel exemplificando o B20, apresentou excelentes resultados termodinâmicos (SOCCOL *et al.*, 2005).

O biodiesel apresenta baixa volatilidade, ponto de fulgor de 200°C, baixa inflamabilidade, não é explosivo, tem alta durabilidade quando estocado, é biodegradável, livre de metais pesados e radioatividade (GUERRA *et al.*, 2010). Apesar do grande número de

benefícios a favor do uso do biodiesel, é imprescindível a correção da viscosidade e densidade, de modo a se aproximar o máximo possível destas características como apresentadas pelo diesel (SCHRIMPF, E. *apud* GUERRA *et al.*, 2010).

A ANP (2007) - Agência Nacional do Petróleo, sob a Lei 11.097/05, prescreve a adição percentual do biodiesel ao diesel comercial. A Figura 4 mostra a porcentagem mínima de mistura de biodiesel no óleo diesel prevista.



Figura 4: Porcentagem mínima de mistura de biodiesel no óleo diesel. Fonte: ANP (2007)

A partir de 1º de janeiro de 2010, houve a antecipação quanto ao teor de biodiesel a ser adicionado ao óleo diesel, no valor de 5%, conforme resolução contida no Regulamento Técnica ANP nº 4/2012.

Ainda segundo a ANP, para atender a demanda da produção de biodiesel que ultimamente tem aumentado devido à fomentação dos projetos de sustentabilidade ambiental exigidos pelo governo e pela sociedade como um todo, pequenos e médios produtores enxergam esta necessidade como uma nova oportunidade de ganhos no mercado. A Figura 5 apresenta a evolução da produção de biodiesel no Brasil.

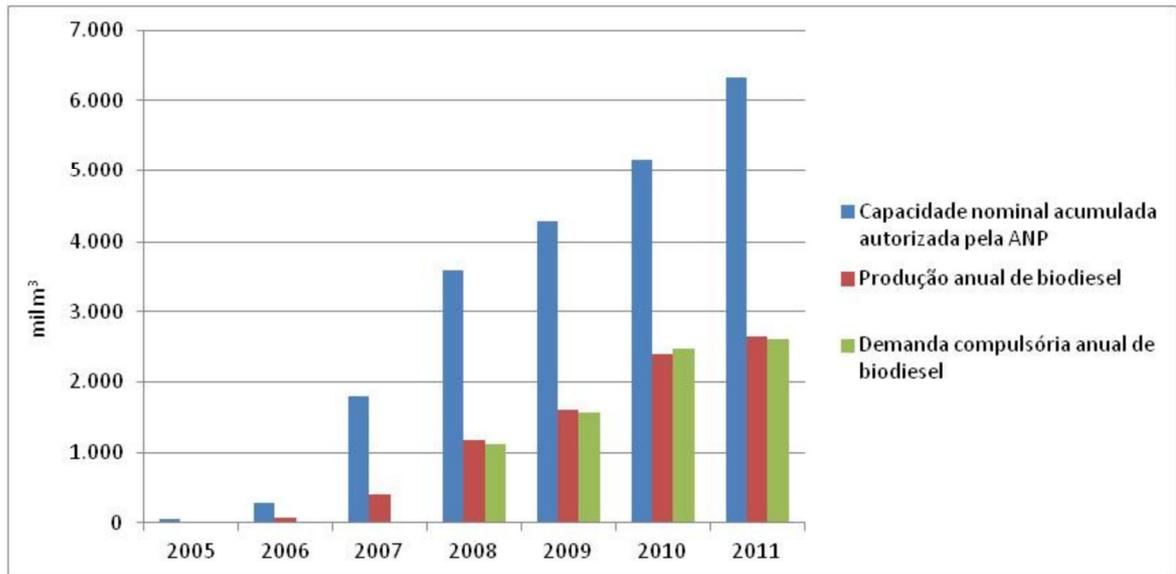


Figura 5. Biodiesel: Evolução Anual da Produção, da Demanda Compulsória e da Capacidade Nominal Autorizada pela ANP. Fonte: ANP (2012)

Na Figura 5, pode-se observar que a produção brasileira de biodiesel cresceu nos últimos cinco anos, e que se consumiu praticamente tudo o que se produziu no país.

O biodiesel não possui vida autônoma, sendo considerado um complemento energético que pode ser adicionado ao diesel, não sendo apresentada uma viabilidade justificável para a substituição do diesel, ainda que parte destas justificativas seja de ordem política. Talvez este pensamento seja peculiar de uma região ou país, mas é certo que países europeus têm assumido não só a mistura do biodiesel ao diesel, como já aplicado em seu mercado automotivo o uso do biodiesel 100%, deixando prevalecer as sustentabilidades então conectadas à aplicação deste tipo de biocombustível (GUERRA *et al.*, 2010).

Em testes realizados com misturas de biodiesel ao diesel comercial, Oliveira e Costa (2002) *apud* Neto e Fraga. (2007) relatam que as misturas de biodiesel ao diesel apresentaram viabilidade técnica, considerando o uso de, no máximo, mistura B20.

Já Silva *et al.* (2005) descrevem que, conforme o aumento da inserção do biodiesel ao diesel comercial é gradativo também o aumento do consumo de combustível, num primeiro momento inviabilizando tecnicamente seu uso, mas, em análise do contexto financeiro, pode-se ainda garantir a viabilidade, sendo esta também sustentada pela viabilidade ambiental.

Na Tabela 3, é apresentado um estudo comparativo entre o biodiesel puro e possíveis misturas com o diesel comercial, sob análise de diferentes matérias primas, considerando as propriedades de densidade, viscosidade e ponto de fulgor, que possibilita, de certa forma, uma análise criteriosa quanto à necessidade da readequação destes parâmetros para o biodiesel, de

forma que este se aproxime ao máximo dos encontrados no diesel, pensando-se na substituição.

Tabela 3. Caracterização do biodiesel utilizado nos testes à temperatura ambiente.

<b>2.4</b> Origem	<b>2.5</b> Composição	<b>2.6</b> Densidade (g/ml)	<b>2.7</b> Viscosidade (c.St)	<b>2.8</b> Ponto de Fulgor
<b>Comercial</b>	B5	0,871	3,9	51
<b>Animal</b>	B100	0,905	5,8	183
	B75	0,891	5,6	98
	B50	0,887	4,7	66
	B25	0,878	4,6	60
<b>Vegetal</b>	B100	0,899	4,8	178
	B75	0,886	4,7	87
	B50	0,883	4,5	61
	B25	0,878	4,0	56
<b>Residual</b>	B100	0,910	6,1	181
	B75	0,894	5,4	110
	B50	0,896	5,3	71
	B25	0,879	4,1	56

Fonte: DIB (2010)

Ainda segundo DIB (2010), existe um aumento de consumo do biodiesel em função do diesel comercial, fato este explicitado por diversos outros autores em suas pesquisas, mas quando comparadas várias misturas de biodiesel de origem diferentes, animal, vegetal e residual, o valor médio das amostras encontradas é bem próximo, havendo apenas pequena diferença. Os dados encontrados são: 1,248 ml/h para o B100 Animal; 1,232 ml/h para o B100 Vegetal; e 1,249 ml/h para o B100 Residual.

Em estudos efetuados por Souza Junior (2009), foram realizadas análises de amostras de biodiesel (B3; B10; B20; B50 e B100) quanto ao consumo encontrado em função do torque para uma determinada rotação, observando-se o aumento do consumo gradativo relacionado ao aumento da inserção do biodiesel ao diesel, mas chamando a atenção quanto à diminuição da variação do consumo entre estes combustíveis analisados quando elevada a rotação de 1500 para 2500 rpm, fator que pode ser justificado devido à faixa de trabalho onde se explora o maior torque do motor, isto é, ponto de intersecção entre consumo e torque.

Em testes realizados com misturas de biodiesel ao diesel comercial, Oliveira e Costa (2002) *apud* Neto e Fraga (2007) relatam que as misturas de biodiesel ao diesel apresentaram viabilidade técnica considerando o uso de, no máximo, a mistura B20.

Em contrapartida, Mothé *et al.* (2005) relatam que, pesquisas desenvolvidas com misturas de biodiesel e diesel, mais especificamente os B5 e B50, não apresentaram qualquer aumento de consumo considerando o uso de catalisadores de biodiesel com álcool etílico.

### **2.3.1 Biodiesel Obtido do Óleo de Fritura**

O processo de fritura tende a se perpetuar ainda por um bom tempo no cotidiano das pessoas em função de não haver um substituto a altura com as características físico-químicas obtidas por este processo, além das características de odor, sabor, cor e textura, que tornam os alimentos mais atraentes para o consumo. O óleo residual de fritura deixaria de ser um vilão pelo menos no que diz respeito à saúde humana caso não necessitasse de altas temperaturas, de 170 °C a 180 °C, para proporcionar a transferência de calor, tornando os alimentos crocantes, processo este que causa a degradação e alterações termoxidativas, que alteram a qualidade do óleo, tornando-o nocivo à saúde e, também, dificultando o reaproveitamento deste resíduo quando submetido a processos de conversão deste em biodiesel (CELLA *et al.*, 2002).

O descarte de óleo residual de fritura pela sociedade, de modo geral, poderia ainda ser maior caso a dispensa do mesmo fosse realizada de forma mais adequada. É fato a utilização do óleo até que o mesmo deixe de exercer sua função, sabendo-se que, bem antes disto, o óleo já se encontra degradado, podendo ser avaliado de modo visual através da medição da frequência com que um determinado volume de óleo foi utilizado, bem como por sua coloração, que deve ser clara. Para que se esteja preparado para esta cultura de mudança, é necessária uma conscientização correta quanto ao descarte do óleo residual, caso contrário haverá uma ameaça ainda mais severa ao meio-ambiente (CELLA *et al.*, 2002).

Problemas como entupimentos de tubulações e de sistemas de esgoto doméstico, necessidade do aumento de insumos químicos nas estações de tratamento das cidades, poluição de rios e lençóis freáticos são algum dos impactos atribuídos ao descarte incorreto do óleo de fritura usado, gerado pelas indústrias e a população, de um modo geral, motivo que despertou os órgãos governamentais a incentivarem pesquisas nesta direção para minimização deste problema. Na busca de soluções, não só foi possível propor uma solução imediata para o problema, mas também obter certa vantagem do mesmo, com o surgimento da possibilidade de produção do biodiesel a partir do óleo de fritura usado (CASTELLANELLI, 2008).

Outros impactos ambientais estão relacionados à diminuição da oxigenação das águas contaminadas pelo descarte incorreto do óleo de cozinha, que, por formarem uma fina camada

superficial, impedem de certa forma a oxigenação, bem como o desenvolvimento de algas marinhas. Entende-se que estes impactos causam deficiências a nível orçamentário das prefeituras para tratamento destas águas (FERNANDES *et al.*, 2008).

Os óleos utilizados na fritura de comestíveis, principalmente em lanchonetes e restaurantes comerciais e industriais, são indispensáveis, devido à possibilidade de alcance de altas temperaturas, em torno de 180 °C a 200 °C, possibilitando o preparo de empanados, salgadinhos e congêneres. A vida útil do óleo tem grande variação devido à aplicação, utilização e armazenamento, sendo estimada, em pesquisa realizada em lanchonetes da cidade de Curitiba, uma produção mensal de 100 toneladas de óleo de fritura sujeito a descarte no sistema de esgoto municipal (NETO *et al.*, 2000).

Existe uma grande disponibilidade de óleo de fritura usado, mas, para um sistema efetivo de coleta, este deve ser associado a um programa de conscientização visando a atingir a população de um modo geral e, também, de modo direto, as empresas. Mas é fato que a oferta desta matéria prima para o biodiesel suprirá apenas uma pequena parte da demanda do país, caracterizando que o biodiesel sob produção a partir desta origem necessitará da concomitância de outros biocombustíveis alternativos (NETO *et al.*, 2000).

Considerando os dias atuais em que a propagação da comida rápida, chamada de *fast food*, tem de certa forma, impactado nosso cotidiano, o consumo de alimentos processados através de frituras tem aumentado consideravelmente e, por consequência, há maior disponibilização de óleos residuais de frituras até então não absorvidos na sua totalidade por programas de reaproveitamento, possibilitando o reuso e descarte apropriado (DOBARGANES *et al. apud* DIB, 2010).

Christoff (2006), em um estudo de caso em uma prefeitura visando à transesterificação etílica do óleo residual de fritura, concluiu que houve um rendimento em massa de 85% da totalidade de óleo biodiesel processado, seguindo as normas ditadas pela Resolução no 255/03 da ANP. Os ganhos financeiros não foram muito audaciosos, mesmo considerando a matéria prima não custosa, mas houve o retorno de capital investido na aquisição dos equipamentos, em médio prazo. Mas os ganhos ambientais não são mensuráveis, uma vez que se evitou o descarte de milhões de litros de óleo de frituras na unidade de tratamento de esgoto da cidade, isto considerando que todos os bairros possuam tratamento de esgoto, o que não ocorre. Neste caso, os danos seriam maiores ainda, pois o custo para tratar uma contaminação de óleo despejado e diluído em um rio aumentaria a dificuldade de tratamento.

Em estudos realizados por Rabelo *et al.* (2002), a produção do biodiesel tendo como matéria prima óleo vegetal de cozinha usado obteve um êxito no rendimento de 98%, com

características peculiares de resultados já apresentados por outros autores, exemplificando uma potência maior obtida no uso do biodiesel B50 em relação ao uso do diesel comercial, ou metropolitano, assim chamado pelo autor, com 7,6% de aumento de potência, considerando a faixa de rotação de 1800 a 2200 rpm. Também é apresentado por este estudo um pequeno aumento no consumo de combustível em função da proporção de biodiesel no diesel em rotações de até 2000 rpm, caso já evidenciado em pesquisas por outros autores. Quanto ao rendimento, é apresentado, na maioria dos casos, um desempenho maior quando utilizado o biodiesel e possíveis misturas em relação ao diesel, salvo raras exceções.

Segundo dados da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP, 2012), cada litro de óleo de cozinha pode contaminar 20 mil litros de água e estima-se que cada família produza mensalmente um litro e meio de óleo de cozinha.

A Tabela 4 apresenta as características físico-químicas que deve apresentar um óleo de soja refinado, segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 1999), em comparação com uma amostragem de um óleo de soja já utilizado em processos de frituras.

Três principais vantagens decorrentes da utilização de óleos residuais de fritura como matéria-prima para produção de biodiesel são (CHRISTOFF, 2006):

- Dispensa do processo de extração do óleo, isto é, menor impacto financeiro, logístico e ecológico se considerada a energia necessária para a realização deste processo.
- Não investimento na aquisição da matéria prima, pois, devido ao processo cooperativo da sociedade na doação do óleo de fritura, nenhum custo deve ser agregado.
- Destinação adequada do óleo usado, que geralmente é descartado inadequadamente, impactando o solo, as águas superficiais como a de rios e o lençol freático.

Tabela 4. Padrão de Qualidade do Óleo de Soja Virgem e Usado.

Parâmetros Físico-Químicos	Resultados	
	Óleo de Fritura Filtrado	Óleo de Soja Refinado
Acidez (%)	2,34	Máx.0,06
Umidade e Voláteis (%)	0,21	Máx.0,06
Densidade a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,9309	0,919 a 0,925
Índice de Refração a 25°C	1,489	1,470 a 1,476
Rancidez	Não Constatado	Ausência
Índice de Saponificação	186,02	189 a 198

Fonte: Moecke *et al.* (2012)

Algumas vantagens complementares deste combustível biodiesel podem ser elencadas (NETO *et al.*, 2000; RAMOS, 1999):

- Vantagem química e mecânica: livre de enxofre e compostos aromáticos, alto nível de cetanos, ponto de combustão apropriado, excelente lubricidade, não tóxico e biodegradável.
- Vantagem Ambiental: nível de toxidade compatível ao sal ordinário, com diluição tão rápida quanto a ocorrida pelo açúcar. Reduz sensivelmente as partículas de carbono, monóxido de carbono, óxidos sulfurosos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. O gás carbônico é absorvido pelas oleaginosas durante o crescimento, o que equilibra o balanço negativo gerado pela emissão na atmosfera.
- Vantagem Econômica: complementa todas as tecnologias do diesel com desempenho similar e sem a exigência da instalação de uma estrutura e política de treinamento. Permite a valorização de subprodutos de atividades agroindustriais, aumentando a arrecadação local de ICMS, aumento da fixação do homem no campo e de investimentos complementares em atividades rurais.
- Vantagem Social: acessível para empresas de pequeno e médio porte, aproveitando a matéria prima disponível do local onde a empresa está implementada.

Como desvantagens da utilização do óleo de fritura como biodiesel, podem-se citar (NETO *et al.*, 2000)

- O óleo de fritura traz consigo muitas impurezas, oriundas do próprio processo de cocção de alimentos.
- Maiores níveis de emissões de gases nitrogenados.
- A emissão de aldeídos pode atingir valores 5 a 10 vezes maiores que os obtidos na combustão do diesel.
- O odor proveniente da queima dos ésteres de óleo vegetal, sensivelmente diferente daquele do óleo diesel, tem sido considerado como aceitável por algumas pessoas e desagradável por outras.

A Tabela 5 apresenta a comparação dos combustíveis, com descrições mais específicas das propriedades do diesel em relação ao biodiesel, baseada na qualidade mínima necessária definida para as mesclas de biodiesel pela Norma ASTM – D-6751.

Tabela 5: Propriedades do diesel em relação ao biodiesel (B100).

Propriedade	Unidade	Diesel (Norma ASTM D975)	Biodiesel (Norma ASTM D6751)
Poder calorífico inferior (PCI)	BTU/gal	~129.050	~118.170
Viscosidade cinemática	mm <sup>2</sup> /s (@40°C)	1,3~4,1	4,0~6,0
Peso específico	kg/L (@60F)	0,85	0,88
Densidade	Lb/gal (@15C)	7,079	7,328
Água e particulados	máxima % em volume	0,05	0,05
Carbono	Wt%	87	77
Hidrogênio	Wt%	13	12
Oxigênio	Wt%	0	11
Enxofre	Máxima Wt%	0,05	0,0 ~ 0,0024
Ponto de ebulição	°C	180 ~ 340	315 ~ 350
Ponto de fulgor	°C	60 ~ 80	100 ~ 170
Ponto de turvamento	°C	-15 ~ 5	-3 ~ 12
Ponto de fluidez	°C	-35 ~ -15	-15 ~ 10
Numero de cetano		40 ~ 55	48~65
Poder lubrificante SLBOCLE	Gramas	2.000-5.000	>7.000
Poder lubrificante HFRR	Microns	300 ~ 600	<300

Fonte: U.S. Department of Energy (2006)

### 2.3.2 Reação de transesterificação para obtenção do biodiesel a partir do reuso do óleo vegetal de frituras

O processo de esterificação do biodiesel é o realizado por meio do álcool para processamentos dos ácidos graxos livres por meio de catalisadores ácidos, como o ácido sulfúrico. Existe pouca aplicabilidade deste método devido ao tempo despendido e o custo envolvido (MOTHÉ *et al.*, 2005).

Segundo Neto *et al.* (2000) e Christoff (2006), o biodiesel é obtido pela reação de transesterificação, que pode ser de natureza ácida, básica ou enzimática, sendo o método mais praticado o de natureza básica. Neste caso, utiliza-se o seguinte procedimento:

- Álcool de 1:6 na presença
- 0,4% de hidróxido de sódio ou de potássio.

O meio básico apresenta melhor rendimento e menor tempo de reação do que o meio ácido. A Figura 6 apresenta a transesterificação de triacilgliceróis, onde R representa a cadeia carbônica dos ácidos graxos e R' a cadeia carbônica do álcool reagente.

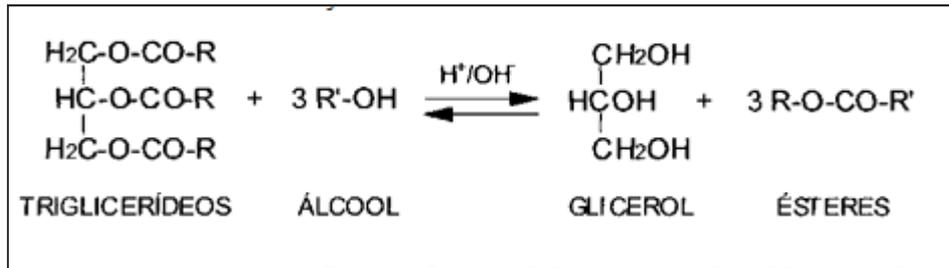


Figura 6: Transesterificação de triacilgliceróis. Fonte: Neto *et al.* (2000)

A reação de transesterificação ocorre em etapas. A Figura 7 exemplifica as etapas para o processo de reação de transesterificação de triacilglicerídeos.

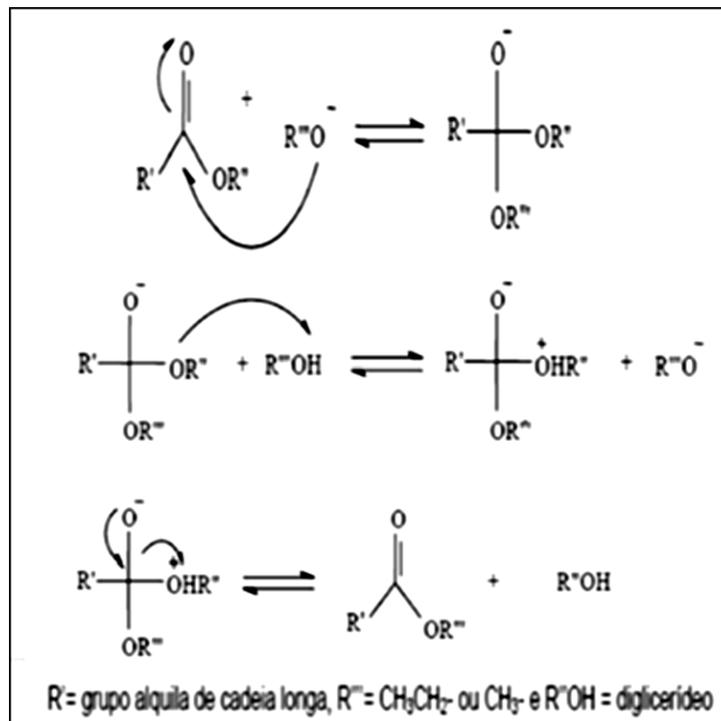


Figura 7: Processo de reação de transesterificação de triacilglicerídeos. Fonte: Solomons (1996)

Em suma, o processo de transesterificação tem por objetivo transformar um éster em outro, como o metanol, etanol, propanol, butanol e álcool milico e de modo concomitante a separação da glicerina (RINALDI *et al.*, 2007; SANTOS *et al.*, 2008 *apud* MOECKE *et al.*, 2012).

No processo de escolha quanto à utilização do processo de esterificação com catálise básica ou ácida, devem ser analisados os casos individualmente, pois há estudos como os de Barros *et al.* (2008) que relatam a viabilidade do uso do processo por catálise ácida, quando da presença de grandes quantidades de ácidos graxos livres encontrados no óleo vegetal, apresentando ótimos resultados ao se tratar da conversão destes graxos em seus ésteres.

A utilização da catálise básica como processo de produção para obtenção de biodiesel torna-se mais rápida do que o processo por catálise ácida, devido aos catalisadores alcalinos serem menos corrosivos que os ácidos (KNOTHE *et al.*, 1997).

Segundo Zhang *et al.* (2003), o processo de catalisação alcalina apresentou resultados mais relevantes do que o processo via catálise ácida, pois o processo foi mais simples devido à minimização do número de equipamentos envolvidos no processo para obtenção do biodiesel, com ênfase ainda que, para o uso do processo via catálise ácida, se fez necessário o uso de equipamentos de aço inoxidável, mais onerosos.

Segundo Enweremadu e Mbarawa (2009), independentemente da utilização dos processos via catálise alcalina ou ácida, ambos apresentam prós e contras, uma vez que, no caso de desfavorecimento, ambos os processos produzem compostos indesejáveis como polímeros, ácidos graxos livres e outros produtos químicos, e que o processo de transesterificação e separação do óleo pode ser acelerado com a utilização da técnica de radiação, isto é, com a utilização de um forno micro-ondas, com resultados melhores nos processos via catálise alcalina.

Os ganhos em se utilizar processos com catálise básica também são citados por Souza (2006), onde o autor deixa claro que este processo proporciona uma média de 4.000 reações a mais que os do processo de catálise ácida, além da fácil aquisição destes produtos no mercado.

Como catalisadores básicos podem ser alcóxidos (metóxido de sódio e etóxido de sódio), sendo mais ativos. Os hidróxidos de metais alcalinos (hidróxido de potássio) também podem ser utilizados (SHEEHAM *et al.*, 1998 *apud* CHRISTOFF, 2006).

A utilização do etanol como catalisador é possível, desde que a concentração não seja inferior a 98%, neste caso levando a uma viabilização maior para a utilização do metanol, ambos catalisadores alcóxidos (FREEDMAN *et al.*, 1986 *apud* SCHUCHARDT *et al.*, 1998).

A Tabela 6 apresenta as vantagens e desvantagens da utilização do metanol e etanol em processos de catalisação alcóxidos.

Segundo os dados da Tabela 6, apesar de sua maior toxicidade, fica clara a vantagem competitiva da utilização do metanol em relação ao etanol, principalmente quanto ao custo, tempo de reação e consumo de vapor, motivo pelo qual foi este fluído o escolhido para a catalisação do biodiesel.

Segundo Christoff (2006), nos catalisadores alcóxidos, o teor de água no álcool e no óleo deve ser controlado, uma vez que a água é um meio desativador dos catalisadores,

favorecendo nesta circunstância o uso de hidróxidos, mesmo considerando um tempo de ativação maior.

Tabela 6: Vantagens e desvantagens da utilização de processos alcalinos metóxidos e etóxidos.

<b>USO DO METANOL</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Consumo de metanol no processo de transesterificação é cerca de 45% menor que o do etanol anidro	Apesar de poder ser produzido a partir da biomassa é tradicionalmente um produto fóssil.
O preço do metanol é quase metade do preço do etanol	É bastante tóxico.
É mais reativo	Maior risco de acidentes (mais volátil).
Para uma mesma taxa de conversão o tempo de reação utilizando o metanol é menos da metade do tempo quando se usa o etanol.	Transporte tem que ser controlado, porque se trata de matéria prima para extração de drogas.
Considerando a mesma produção de biodiesel o consumo de vapor na rota metílica é cerca de 20% do consumo da rota etílica, e o consumo da eletricidade é metade.	-
Os equipamentos de processo da planta com rota metílica é cerca de um quarto do volume dos equipamentos para a rota etílica, para uma mesma produtividade e mesma qualidade.	-
<b>USO DO ETANOL</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Produz biodiesel com um maior índice de cetano e maior lubrificidade, se comparado com o metílico	Os ésteres etílicos possuem maior afinidade a glicerina, dificultando a separação.
Se for feito a partir da biomassa, produz um combustível 100% renovável	Possui azeotropia, quando misturado com água. Com isto, a desidratação requer maiores gastos energéticos e investimentos em equipamentos.
Não é tóxico como o metanol.	Os equipamentos do processo com rota etílica é cerca de quatro vezes o volume dos equipamentos para a rota metílica, para uma mesma produtividade e qualidade.

Fonte: Carvalho (2007).

Outra característica de relevância quanto ao uso do processo de transesterificação básica é o fato de que o óleo usado possui uma acidez bem mais elevada do que o óleo de soja virgem, conforme já mostrado na Tabela 4, necessitando assim da disponibilidade de um tempo maior dedicado a este processo, se comparado com o processo de transesterificação alcalina (DERMIRBAS, 2009 *apud* MOECKE *et al.*, 2012).

Segundo Souza (2006), em todos os experimentos realizados em sua pesquisa é mostrada a viabilização do uso da catálise básica, onde os ganhos são diferenciados em função da quantidade e qualidade dos insumos utilizados para catalisação. Porém, nos estudos realizados por Wust (2004), destaca-se que a utilização via catálise ácida apresentou melhor desempenho em relação a básica, devido à melhor conversão dos ácidos carboxílicos, e que as

desvantagens deste processo puderam ser contornadas, deixando clara a importância em se analisar as condições químicas e físicas do óleo residual de frituras a ser utilizado, sabendo-se que, dependendo do resultado da análise de uma batelada coletada, outro procedimento se faz necessário.

Em estudos realizados por Silva (2008), que realizou análises de amostras de óleos residuais de processos de frituras obtidos de origens diferentes, isto é, óleos residuais foram obtidos de quatro restaurantes diferentes, porém considerando que o óleo coletado era de origem do mesmo ramo de atividade, ainda assim apresentaram diferenças de viscosidade, quantidade de ácidos graxos, massa específica e acidez devido a diferenças nos processos de fritura, como temperatura, vezes em que o óleo residual foi utilizado antes do descarte, tipo de alimentos submetidos ao processo de frituras, deixando clara a necessidade da análise da qualidade do óleo antes de viabilizar a produção do biodiesel. Também esteve sob análise a confirmação da melhor eficiência do processo de catálise via básica.

Na Tabela 7, são apresentadas as vantagens e desvantagens na utilização de processos de obtenção do biodiesel via catálise básica e ácida, segundo Carvalho (2007).

Tabela 7: Vantagens e desvantagens de processos para obtenção do biodiesel via catálise básica e ácida.

Catalisadores Básicos	Catalisadores Ácidos
(+) Mais barato	(-) Mais caro
(-) O preço sofre uma forte variação	(+) Preço estável
(-) Maior custo de purificação	(+) Menor custo de purificação
(+) Mais rápido	(-) Mais lento
(+) Maior rendimento	(-) Menor rendimento
(+) Mais seletivo	(-) Menos seletivo
(+) Menores problemas associados a corrosão	(-) Maiores problemas associados a corrosão
(+) Razão molar de 1:6 de álcool para óleo	(-) Razão molar de 30:1 de álcool para óleo
(+) Menor quantidade de catalisador	(-) Maior quantidade de catalisador
(+) Menor consumo energético	(-) Maior consumo energético
(-) Presença de ácidos graxos dificulta a transesterificação	(+) Presença de ácidos graxos não dificulta a transesterificação
(+) Difícil recuperar, reutilizável sem perder atividade	(+) Reutilizável e produção em meio contínuo
(-) Limitado a óleos de baixa acidez (preços mais elevados)	(+) Possibilidade de utilização de óleos de alta acidez, resíduos ou óleos processados (mais baratos)

Fonte: Adaptado de Carvalho (2007).

Em função dos dados analisados, apresentados resumidamente na Tabela 7, foi realizada a escolha do processo de catalisação via básica para uso neste trabalho, por apresentar pontuação mais positiva quanto à viabilização de seu uso se comparado com o processo de catalisação via ácida.

### 2.3.3 Gases de combustão resultantes da utilização do biodiesel em motores de ciclo diesel

Oliveira (2003) *apud* Christoff (2006) relata que o uso do biodiesel B100 originado pela recuperação do óleo de fritura usado pode reduzir uma média de 78% na emissão dos gases em relação à emissão pelo uso do diesel comercial. Em análise específica do enxofre, pode representar uma redução de 13% e, por outro lado, a emissão do gás NO<sub>x</sub> aumentou com a utilização do biodiesel, podendo este resultado ser melhorado com a utilização de aditivos disponíveis no mercado.

Souza Junior (2009), em seus estudos, constata a redução da emissão de gases de escapamento de motores de combustão interna em função do aumento da inserção do biodiesel ao diesel, sendo os gases analisados (O<sub>2</sub> (-5 a 15%), CO (-67%), CO<sub>2</sub> (-5 a 15%), HC (-47%), destacando-se que, com o aumento da rotação, aumenta-se de forma positiva a diferença da emissão de gases entre o biodiesel e o diesel. A única exceção caracterizada como resultado negativo é atribuída ao gás NO<sub>x</sub> (+65%), em que o biodiesel apresentou maior emissão, neste caso com alterações nas emissões dispersas em função da rotação.

Lee *et al.* (2002) *apud* Barros *et al.* (2008) também citam em estudos realizados a redução da emissão de gases tóxicos quando utilizado o biodiesel nos motores de combustão interna (B20), podendo ser quantificadas as reduções em: particulado (26,8%), monóxido de carbono (72,8%) e hidrocarbonetos (73,2%).

Segundo o Instituto Carbono Brasil (2010), o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América relatou em estudos com o biodiesel B100 que este pode propiciar uma redução de emissões de 20% de enxofre, 9,8% de anidrido carbônico, 14,2% de hidrocarbonetos não queimados, 26,8% de material particulado e 4,6% de óxido de nitrogênio.

É de extrema importância o controle das emissões veiculares, uma vez que a exposição das pessoas a concentrações de gases superiores ao regulamentado pela OMS (Organização Mundial da Saúde), principalmente os emitidos por motores de ciclo diesel, tendem a trazer danos ao sistema imunológico, bem como neurológico, reprodutivo e respiratório (FERREIRA *et al.*, 2008).

Segundo Mittelbach e Tritthart (1988), na emissão de poluentes do biodiesel proveniente do óleo usado em frituras, observou-se que os níveis de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e materiais particulados foram inferiores ao diesel. Também há citações por outros autores, como Ferreira *et al.* (2008) e Chang *et al.* (1996), que constata que as emissões dos

gases como CO, CO<sub>2</sub>, S e materiais particulados resultantes do biodiesel B100 obtiveram quantificados menores, se comparados com o diesel comercial.

O dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) é um gás tóxico e com um odor característico, quando em contato com a pele provoca ressecamento, dermatite, inflamações no sistema respiratório, ardência nos olhos devido aos vapores do combustível e, se ingerido, podendo levar à morte. Quando o NO<sub>2</sub> reage com a água, favorece a formação de ácido nítrico, resultante que pode causar sérios danos à saúde se tiver contato com a pele, olhos, entre outros (SANTOS e MATAI, 2008; KRUPA, 1997).

Os motores de combustão interna, de modo geral, necessitam de frequentes regulagens, que devem ser realizadas em manutenções preventivas dos veículos, mas visando à garantia de uma emissão dentro dos padrões estabelecidos pelos órgãos governamentais, faz-se necessário o uso de catalisadores automotivos, elementos que antecedem o elemento abafador, ambos localizados no sistema de escapamento. Os catalisadores têm por objetivo a redução em média de 90% dos gases emitidos, possuindo como característica construtiva um sistema de três vias, com regimes de trabalho com temperaturas superiores a 350°C (BRAGA, 2007).

Segundo Visser (2001) *apud* Braga (2007), visando à garantia da realização da função principal do catalisador como conversor de gases, este apresenta bom desempenho também quando da oscilação da razão estequiométrica dos motores, devido ao armazenamento de oxigênio que os catalisadores realizam quando expostos a regimes de misturas pobres de combustão, fazendo uso de pulmão armazenado, quando em regimes de misturas ricas de combustão.

A Tabela 8 mostra o resultado do estudo realizado pela (EPA) *Environmental Protection Agency*, evidenciando a redução de gases tóxicos emitidos na atmosfera se comparado à utilização do biodiesel em relação ao diesel.

Tabela 8: Emissões médias do biodiesel B20 e B100 comparados ao diesel.

TIPOS DE EMISSÕES	B100	B20
<b>Regulados</b>		
Hidrocarbonetos Totais	-67%	-20%
Não queimados		
Monóxido de Carbono	-48%	-12%
Material Particulado	-47%	-12%
NO <sub>x</sub>	10%	2%
<b>Não Regulados</b>		
Sulfatos	-100%	-20%
Hidrocarbonetos Policíclicos	-80%	-13%
Aromáticos (HPA)		
HPA Nitratos	-90%	-50%
Potencial de Ozônio do HC	-50%	-10%

Fonte: Ferreira *et al.* (2008).

Na Tabela 8, o ensaio comparativo foi realizado entre o diesel comercial e misturas de biodiesel ao diesel comercial, isto é, biodiesel B100 corresponde a 100% biodiesel e o biodiesel B20 corresponde a 20% do biodiesel adicionado ao diesel comercial.

Na Figura 8, é apresentado um estudo que evidencia a redução da emissão de gases nocivos à saúde em função do aumento da porcentagem do biodiesel inserido no diesel comercial, considerando a utilização do biodiesel B20.

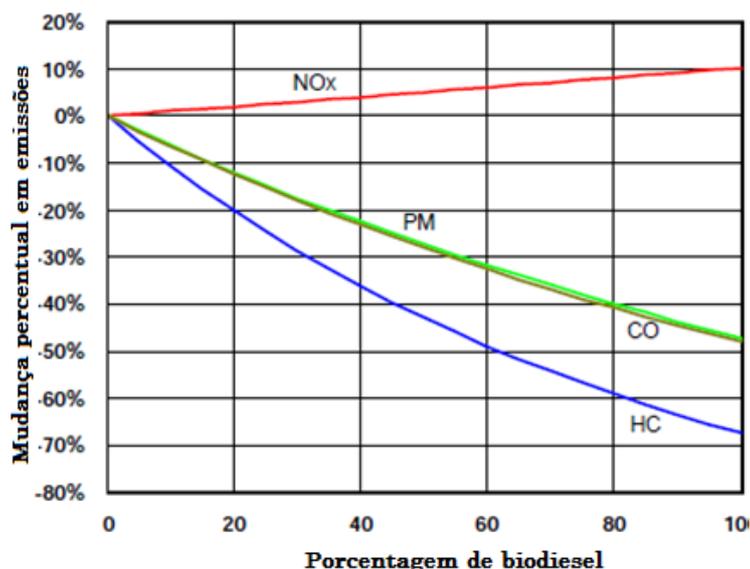


Figura 8: Média da emissão de gases utilizando biodiesel. Fonte: EPA ( 2002)

Ainda segundo o EPA (2002), o fato de se utilizar o óleo de origem animal ou vegetal poderia afetar o nível de emissões dos gases automotivos, exemplificando a alteração de cetanos, mas este é um caso peculiar devido à necessidade de se analisar a fonte de aquisição da matéria prima, o processo utilizado para obtenção do biodiesel, entre outras. Outro fator de relevância apresentado pela EPA é a diferença de energia propiciada pelos combustíveis de origem animal e vegetal, pois é fato a diminuição do poder calorífico entre o biodiesel e o diesel comercial, atribuindo um maior consumo nos motores ciclo diesel utilizando o biodiesel como combustível. Mas, optando pelo uso do biodiesel, estudos mostram a viabilidade de se utilizar o óleo vegetal como matéria prima, como demonstrada na Tabela 9.

Tabela 9. Energia média de tipos de biodiesel x diesel.

COMBUSTÍVEL	MÉDIA (KJ/Kg)
Misturas Biodiesel	124,81
Biodiesel (Animal)	122,09
Biodiesel (Vegetal)	125,78
Diesel Comercial	136,63

Fonte: Adaptado de EPA (2002).

De modo geral, o biodiesel em forma de ésteres a partir de resíduos de óleo de cozinha usado tem apresentado resultados favoráveis no quesito de redução e melhora da qualidade resultante dos processos de combustão de motores automotivos (KARAOSMANOGLU *et al.*, 1992 *apud* KNOTHE *et al.*, 1997).

Considerando o uso do biodiesel em relação ao diesel mais vantajoso, e também caracterizando a matéria prima de origem vegetal como mais positiva em relação às de origem animal, apresenta-se, na Figura 9, um estudo realizado por Rosa *et al.* (2012) quanto à redução de emissões de CO em função do tipo da origem do biodiesel vegetal.

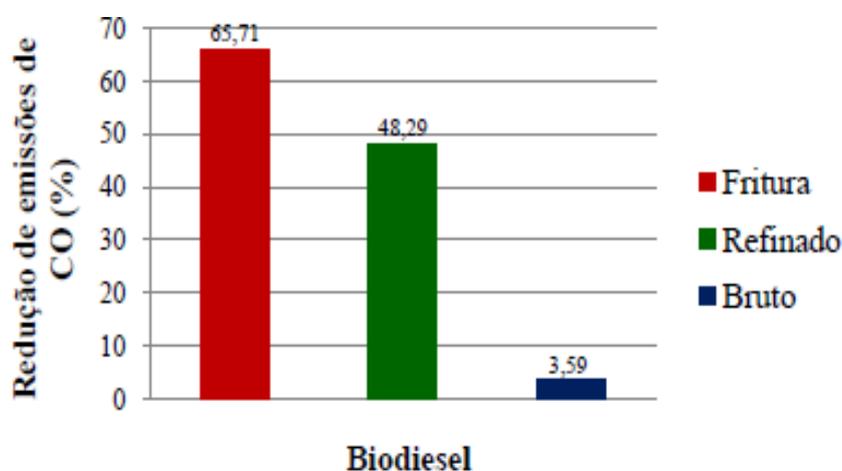


Figura 9: Porcentagem de redução da emissões de CO. Fonte: Rosa *et al.*(2012)

Conforme apresentado na Figura 9, houve percentuais significativos de redução de CO dos três tipos de biodiesel em relação ao diesel comercial, e sob análise dentro da cadeia de matéria prima, ficou claro que o óleo residual de fritura foi o que apresentou menor índice de emissão de CO, isto é, aproximadamente uma redução de 65%; na sequência, apresenta-se o óleo de soja refinado, com 48% aproximado de redução e, finalmente, o óleo de soja bruto, com 4% de redução.

A justificativa para a ocorrência de tais reduções de emissões de gases CO nos diversos tipos de biodiesel pode ser encontrada em estudos de Kivevele *et al.* (2011), que relaciona o aumento do oxigênio com esta redução, mas, por outro lado, este mesmo aumento de oxigênio propicia um aumento do gás NO<sub>x</sub>, de forma menos gradativa.

Conforme resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2005), o PROCONVE-6 (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) estipula os limites máximos estabelecidos para os tipos de veículos em circulação, estipulando a data que entram em vigor, conforme apresentado a seguir:

- I - veículos leves do ciclo Diesel: 100% da frota a partir de janeiro de 2013.
- II - veículos leves do ciclo Otto: a partir de 1º de janeiro de 2014 para os novos modelos e a partir de 1º de janeiro de 2015 para os demais.

**a) Veículos automotores leves de passageiros, de uso rodoviário:**

- I - monóxido de carbono (CO): 1,30 g/km;
- II - hidrocarbonetos totais (THC), somente p/ veículos a gás natural: 0,30 g/km;
- III - hidrocarbonetos não metano (NMHC): 0,05 g/km;
- IV - óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>): 0,08 g/km;
- V - aldeídos (CHO) p/ ciclo Otto: 0,02 g/km;
- VI - material particulado (MP) p/ ciclo Diesel: 0,025 g/km; e
- VII - monóxido de carbono em marcha lenta p/ ciclo Otto: 0,2% em volume.

**b) Veículos automotores leves comerciais, de uso rodoviário, com massa do veículo para ensaio menor ou igual a 1.700 (hum mil e setecentos) quilogramas:**

- I - monóxido de carbono (CO): 1,30 g/km;
- II - hidrocarbonetos totais (THC), somente p/ veículos a gás natural: 0,30 g/km;
- III - hidrocarbonetos não metano (NMHC): 0,05 g/km;
- IV - óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>): 0,08 g/km;
- V - aldeídos totais (CHO) p/ ciclo Otto: 0,02 g/km;
- VI - material particulado (MP) p/ ciclo Diesel: 0,030 g/km; e
- VII - monóxido de carbono em marcha lenta p/ ciclo Otto: 0,2% em volume.

**c) Veículos automotores leves comerciais, de uso rodoviário, com massa do veículo para ensaio maior que 1.700 (hum mil e setecentos) quilogramas:**

- I - monóxido de carbono (CO): 2,00 g/km;
- II - hidrocarbonetos totais (THC), somente p/ veículos a gás natural: 0,50 g/km;
- III - hidrocarbonetos não metano (NMHC): 0,06 g/km;
- IV - óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) p/ ciclo Otto: 0,25 g/km;
- V - óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) p/ ciclo Diesel: 0,35 g/km;
- VI - aldeídos totais (CHO) p/ ciclo Otto: 0,03 g/km;
- VII - material particulado (MP) p/ ciclo Diesel: 0,040 g/km; e
- VIII - monóxido de carbono em marcha lenta p/ ciclo Otto: 0,2% em volume.

Fica clara nesta resolução do CONAMA a necessidade da readequação das indústrias automobilísticas quanto a busca de melhorias em seus processos produtivos, quanto ao

aprimoramento das tecnologias existentes, bem como a necessidade de inserção de novas tecnologias, objetivando atender as frequentes exigências e alterações dos padrões de emissões estipulados pelos órgãos governamentais.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos utilizados para a realização da pesquisa, incluindo o método de obtenção de material e preparação do biodiesel, bem como os testes e ensaios realizados e o desenvolvimento de trabalhos de preparação do laboratório para os testes.

#### 3.1 SUPORTE INSTRUMENTAL

Tendo em vista a necessidade de utilização de equipamentos de avaliação de desempenho e emissão de gases pelos combustíveis usados em motores de combustão, na etapa inicial do trabalho, foi necessário avaliar individualmente cada um dos equipamentos existentes nos laboratórios onde seriam executados os trabalhos. Foram realizados testes e ensaios, definindo as modificações necessárias para a viabilização do sistema de teste dinamométrico, podendo assim fornecer medições confiáveis e de precisão quanto ao torque, potência, rotação, consumo, temperaturas e dados relativos à qualidade dos gases resultantes do processo de combustão, bem como também poder quantificar estes gases.

O sistema de medição de combustível necessitou de uma readequação para sua operação (medição e acionamento dos solenoides de controle de entrada de combustível para enchimento do reservatório de medição). Foram inseridos circuitos de interface necessários para interligar o sistema de medição de combustível ao sistema de aquisição de dados no *software LabView*, pois, desta forma, foram centralizados todos os controles de ensaio de motores em apenas um computador.

Foi necessária a construção de um sistema de adequação destes sinais, onde os sinais provenientes da balança de medição de consumo de combustível são convertidos de 12 volts para 5 volts, podendo ser interligados a uma placa de interface com computador. De maneira semelhante, foram construídos outros circuitos de interface, que, acionados por sinais em 5 volts, permitiriam o acionamento em 24 volts dos sistemas da balança. Para estabelecer o interfaceamento entre o *software* e os sistemas de controle com as entradas e saídas estabelecidas, escolheu-se uma placa de aquisição fabricada pela empresa *Measurement Systems*, modelo USB-1208FS, com velocidade de aquisição de 50.000 amostras/segundo, compartilhadas entre todas as entradas e saídas. A placa é conectada via interface USB ao microcomputador e permite controle através de *software LabView*, versões 6.0, 7.0 e 8.0.

Na Figura 10, é apresentado o painel (*Virtual Instrument*) do *LabView*, responsável pela operação do sistema supervisor dinâmométrico de ensaio dos motores.

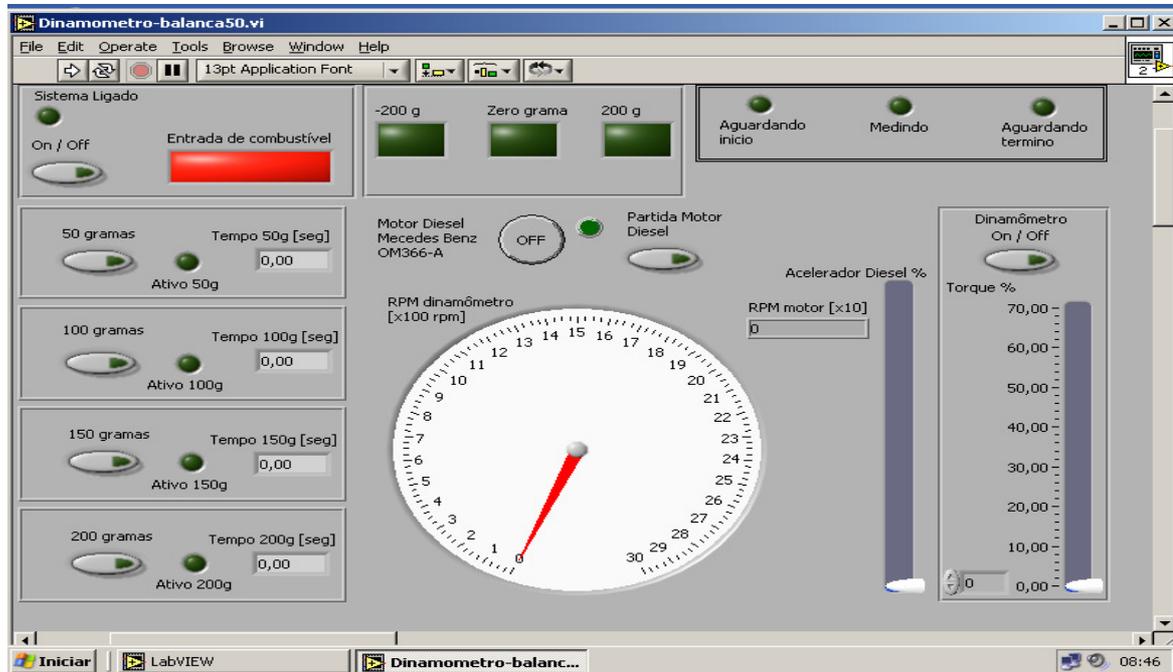


Figura 10: Painel frontal do VI.

Através do painel sob comando do computador, foi possível habilitar a VI do programa *LabView*, funcionar o motor de ciclo diesel, variar a rotação, possibilitando verificá-la de forma analógica e digital, comandar o sistema de freio Foucault com cargas pré-estabelecidas e solicitar a análise do consumo através da medição da vazão mássica do combustível.

Para a realização das leituras das temperaturas do sistema de arrefecimento e do óleo lubrificante do motor, foram instalados termopares interligados à placa de aquisição de dados, bem como também foi instalado um sensor indutivo para a leitura da rotação (RPM) no volante do motor. Para a viabilização do controle incremental de aceleração, foi construído um moto redutor que trabalha de modo concomitante com um potenciômetro.

Nas Figuras 11 e 12, são mostrados o sistema supervisor de controle do *LabView* e a interligação do motor diesel ao dinamômetro.



Figura 11: Sistema supervisorio de controle e sistema de controle eletrônico da balança de medição de consumo de combustível.

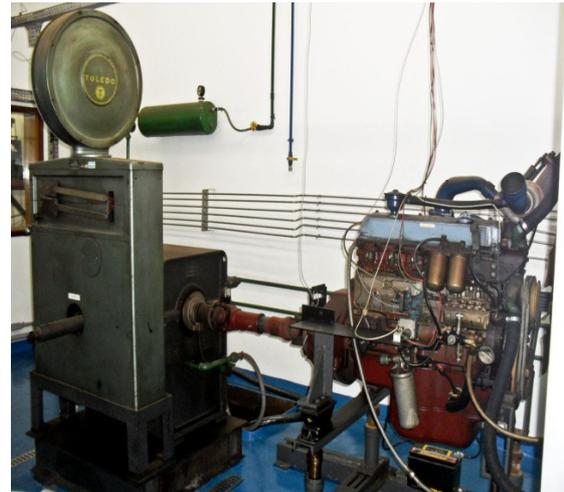


Figura 12: Detalhe mostrando o motor diesel acoplado ao dinamômetro.

### 3.2 COLETA SELETIVA DO ÓLEO VEGETAL RESIDUAL DE FRITURA

A matéria prima para a produção do biodiesel se deu pela coleta seletiva de óleo residual de fritura, isto é, o óleo descartado pela comunidade interna da universidade e também pela comunidade externa. O intuito foi abastecer o motor diesel modelo OM366A, usado nos testes, com este tipo de combustível, de modo a realizar proporções mistas de diesel com biodiesel, objetivando, se possível, utilizar o biodiesel na totalidade de 100%, porém atentando-se à variação dos parâmetros de rotação, torque, potência, consumo, consumo específico, dados que permitem viabilizar as práticas laboratoriais na universidade.

O recolhimento do óleo residual de frituras residencial foi realizado utilizando-se garrafas tipo PET obtidas de uma central de reciclagem. Já para matéria prima de origem comercial, a disponibilização foi de recipientes termoplásticos com volume de 5 litros.

A Figura 13 mostra o sistema de coleta de óleo residual de processos de fritura utilizado.



Figura 13: Sistema de coleta de óleo residual de fritura.

### 3.3 PRODUÇÃO DO BIODIESEL A PARTIR DO REUSO DO ÓLEO VEGETAL

Após a coleta seletiva de 100 litros de óleo vegetal residual de processos de fritura, esta quantidade foi processada em uma única batelada visando à uniformidade dos resultados e não a análise da capacidade de repetitividade do processo, uma vez que, para garantir a repetitividade do processo, seria necessário realizar a análise físico-química de toda e qualquer batelada, de forma que os resultados fossem os mais próximos possíveis.

O processo de pré-tratamento do óleo residual de fritura para a produção de biodiesel utilizado na pesquisa foi adaptado de Christoff (2006), como esquematizado na Figura 14.

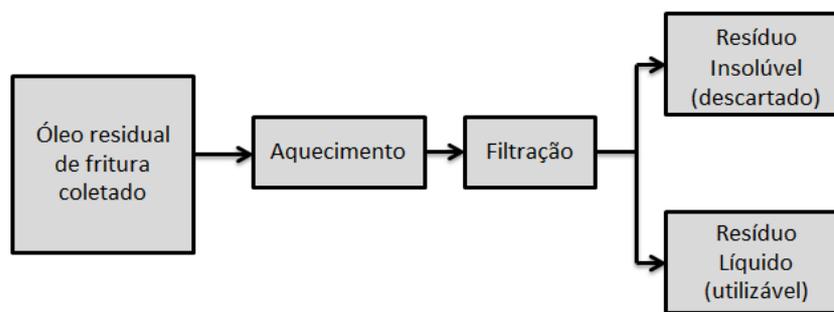


Figura 14: Processo de pré-tratamento do óleo residual de fritura. Fonte: Adaptado de Christoff (2006)

A Figura 15 mostra o equipamento de filtro-prensa utilizado para o pré-tratamento do óleo residual de fritura coletado.



Figura 15: Filtro-Prensa.

Este filtro prensa é constituído por uma bomba centrífuga motorizada, responsável pela sucção e recalque do óleo vegetal, ainda com impurezas, até as placas onde o fluído é filtrado, obtendo-se o óleo vegetal sem impurezas sólidas.

O processo de transesterificação utilizado pode ser visualizado no esquema apresentado na Figura 16.

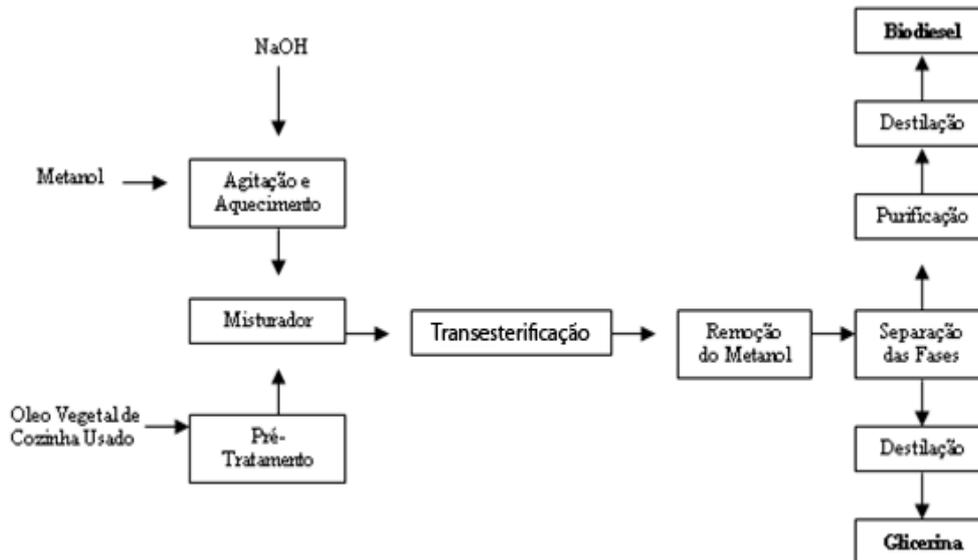


Figura 16: Processo de transesterificação. Fonte: Adaptado de Christoff (2006)

Neste processo, incluiu-se a desidratação e a filtração do óleo residual de fritura, a mistura do metanol com o catalisador hidróxido de sódio, a reação do óleo com a mistura álcool/catalisador (reação de transesterificação), a separação entre a fase rica em ésteres e a fase rica em glicerina, e a lavagem do biodiesel.

O processo de transesterificação também pode ser exemplificado pela sequência mostrada na Figura 17.

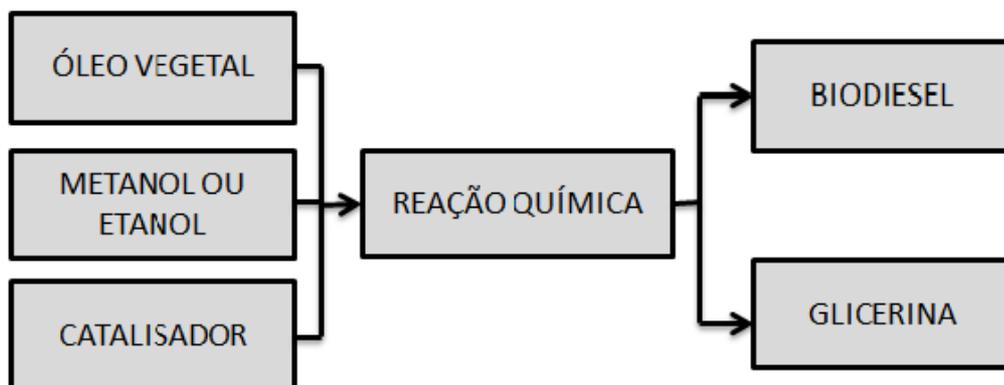


Figura 17: Processo de transesterificação. Fonte: CEPLAC (2012)

As Figuras 18, 19 e 20 mostram os equipamentos utilizados no processo de transesterificação.



Figura 18: Separador de fases.



Figura 19: Reator da reação de transesterificação.

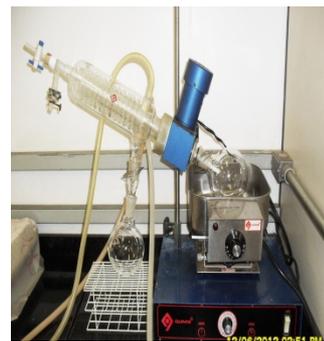


Figura 20: Destilador para remoção do álcool do biodiesel.

O procedimento utilizado para conversão do óleo residual de fritura em biodiesel neste experimento é o explicitado por Geris *et al.* (2007):

- a. Para a produção de metóxido de potássio, dissolveu-se em um becker de 250 ml 1,503 g de hidróxido de potássio (KOH) em 35 ml de metanol com auxílio de agitação e controle de temperatura (45°C) até completa dissolução de KOH. O volume de metanol e a massa de KOH para a reação de transesterificação têm por finalidade alcançar um melhor rendimento da produção do éster.
- b. A reação de transesterificação foi realizada em um aquecedor com agitação mecânica. Em um balão de fundo chato (500 ml), adicionou-se 100 ml de óleo de soja usado em frituras medido em uma proveta. Aqueceu-se em banho-maria, sob agitação, com o auxílio de uma barra magnética, até atingir a temperatura de 45°C. Em seguida, adicionou-se a solução de metóxido de potássio recentemente preparada, mantendo a mistura reacional por 10 min a 45 °C sob agitação. Houve mudança no aspecto da solução que se tornou mais densa e a coloração também sofreu alterações, tornando-se mais clara.
- c. Após a transesterificação, a solução foi transferida para um funil de separação para permitir a decantação e separação das fases: superior contendo biodiesel e inferior composta de glicerol, sabões, excesso de base e álcool (tempo de espera de separação de gases: 15 min.). Recolheu-se a fase inferior em uma proveta de 50 ml e obteve-se 6 ml da solução. O volume de Biodiesel (fase superior) foi de 94 ml. Foram adicionados 50 ml de solução de Cloreto de sódio (NaCl) para a lavagem do biodiesel.
- d. Após o processo, foram obtidos 92 ml de Biodiesel.

Considerando este procedimento citado por Geris *et al.* (2007), foi considerada a necessidade proporcional da aquisição de hidróxido de potássio, metanol e cloreto de sódio para a produção de uma batelada de 100 litros.

### **3.4 PREPARAÇÃO DE MISTURAS DO BIODIESEL COM ÓLEO DIESEL**

O óleo diesel comercial utilizado nos ensaios foi obtido na rede de abastecimento automotiva local, com as seguintes características:

- Poder calorífico: 44.816 KJ/kg
- Massa específica: 857 kg/m<sup>3</sup> a 25C
- Viscosidade cinemática: 3,32 mm<sup>2</sup>/s a 40°C
- Ponto de fulgor: 69°C
- Enxofre: 0,121 % m/m

O biodiesel utilizado é resultante da transesterificação do óleo residual de fritura, com as seguintes características:

- Poder calorífico: 39.628 kJ/kg
- Massa específica: 872 kg/m<sup>3</sup> a 25C
- Viscosidade cinemática: 4,58 mm<sup>2</sup>/s a 40°C
- Ponto de fulgor: 169°C
- Enxofre: 0,03 % m/m

As especificações e características citadas do diesel e o do biodiesel B100 foram obtidas por meio de análise laboratorial realizada em uma empresa credenciada da região de Piracicaba. Foram realizadas misturas com porcentagens diferentes entre o diesel comercial e o biodiesel, colocadas em recipientes tipos PET, devidamente identificadas, classificadas como: Diesel comercial 100%, Biodiesel 100%, Biodiesel B5 (Adição de 5% de biodiesel ao diesel), e assim sucessivamente para as misturas B20, B50.

### **3.5 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DINAMOMÉTRICOS NO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE CICLO DIESEL**

Foi realizada uma avaliação de desempenho de um motor de ciclo diesel, alimentado 100% com diesel comercial e com misturas B5, B20, B50 e B100, isto é, 5%, 20%, 50% e

100% de biodiesel adicional ao diesel, obtendo-se os dados resultantes de potência equivalente, o torque equivalente, o consumo energético, eficiência térmica do motor e gases emitidos.

O motor utilizado foi um modelo OM366A, com os seguintes dados específicos, conforme NBR 1585:

- Potência Max. Líquida: 155 KW (211 CV) a 2600 rpm
- Momento Max. de Força : 660 Nm (67 mkgf) a 1400 rpm
- Consumo Específico Mínimo: 197g/KWh (145g/CVh) a 1950 rpm
- Taxa de Compressão: 18:1

Os ensaios dinamométricos foram realizados na bancada de teste, considerando que foi utilizado uma batelada única para todos os testes (torque, potência e consumo), sob análise de oito pontos para cada mistura de combustível utilizado, visando a padronização das amostras e possibilidade de comparação dos resultados.

Na análise do torque x rotação , onde a rotação foi fixada e o torque incrementado, a aquisição do torque ocorreu através de uma célula de carga alojada no dinamômetro, sendo possível o envio destes dados ao computador, podendo assim visualizar as leituras através do *software LabView*. O mesmo ocorreu com as medidas de RPM, onde um sensor capacitivo, alojado nas proximidades do eixo árvore de transmissão do motor, forneceu sinais analógicos que puderam ser interpretados pelo *software*.

Para a análise da potência x rotação foram utilizados as medidas de torque nos oito pontos específicos encontrados no teste anterior, sendo calculado sobre estes a potência desenvolvida em KW, determinada pela Equação 1:

$$[ Potência = Torque \times \frac{Rotação}{60} \times 2\pi ] \text{ KW} \quad (1)$$

Em análise do consumo x rotação, o *software LabView* utilizado permite a análise do consumo mássico e volumétrico, com massa fixas e variáveis, sendo assim mediante aos oito pontos de potência encontrados no teste anterior pode-se medir seus respectivos consumos determinados pelas Equações 2 e 3.

$$Consumo = \frac{g}{l} \times 3.6 \quad \text{kg/h} \quad (2)$$

$$Consumo(Específico) = \frac{Consumo \times 10^3}{Potência} \quad \text{g/kW-h} \quad (3)$$

Para análise dos gases ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{NO}_x$ ), foram utilizados 12 pontos no software LabView, sendo estes pontos com variação entre 20 a 240 Kw, com intervalos de 20 Kw, para cada ponto estabelecido a sonda MEXA-584L utilizada para aquisição de amostras de gases forneceu um valor de medição, permitindo assim a comparação de modo quantitativo a relação da emissão dos gases x potência desenvolvida. A batelada do biodiesel utilizado para análise do desempenho ambiental do motor ciclo diesel foi a mesma utilizada para os testes de desempenho técnico.

### 3.6 TESTES DE EMISSÃO DE GASES

A análise dos gases emitidos pela reação de combustão do diesel comercial correlacionado ao biodiesel a partir do reuso do óleo residual de frituras e suas misturas com o diesel comercial foi realizada da seguinte forma:

- O aparelho utilizado para análise (Figura 21) é da marca *Horiba Automotive Emission Analyzer*, Mod. MEXA-584L.



Figura 21: Analisador de emissão automotiva Mod. MEXA-584L.

- Este aparelho possibilitou realizar medições por amostragens coletadas diretamente no coletor de escapamento do motor dos seguintes gases:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{NO}_x$ .

A Figura 22 mostra a sonda utilizada para aquisição de amostras de gases que foram posteriormente interpretadas pelo equipamento MEXA-584L.



Figura 22: Sonda para condução dos gases de escapamento.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 10 apresenta os dados obtidos no ensaio dinamométrico sob análise do torque x rotação, onde o torque foi obtido através de uma célula de carga alojada no dinamômetro, sendo possível o envio destes dados ao computador, podendo assim visualizar as leituras através do *software LabView*. O mesmo ocorreu com as medidas de RPM, onde um sensor capacitivo, alojado nas proximidades do eixo árvore de transmissão do motor, forneceu sinais analógicos que puderam ser interpretados pelo *software*. A Figura 23 mostra, graficamente, o desempenho do motor para os dados da Tabela 10.

Tabela 10: Dados dinamométricos obtidos da relação entre o torque x rotação.

Diesel		Biodiesel (B5)		Biodiesel (B20)		Biodiesel (B50)		Biodiesel (B100)	
Nm	RPM	Nm	RPM	Nm	RPM	Nm	RPM	Nm	RPM
560	1200	557	1200	555	1200	549	1200	543	1200
585	1400	582	1400	580	1400	576	1400	568	1400
592	1600	589	1600	587	1600	580	1600	575	1600
563	1800	560	1800	558	1800	551	1800	547	1800
550	2000	548	2000	545	2000	540	2000	534	2000
538	2200	535	2200	532	2200	526	2200	521	2200
523	2400	520	2400	518	2400	513	2400	508	2400
490	2600	488	2600	485	2600	480	2600	475	2600

A utilização de misturas de biodiesel ou no estado puro (B100) ocasionou pequenas quedas de torque em função da rotação, comparado à utilização do diesel comercial, sendo que a maior queda ocorreu entre o biodiesel (B100) e o diesel comercial, uma perda por média aritmética de 3%, considerando os dados obtidos de torque citados na Tabela 10. Também é possível observar que as misturas B5 e B20 foram as que apresentaram maior linearidade das curvas em relação à curva apresentada pelo diesel.

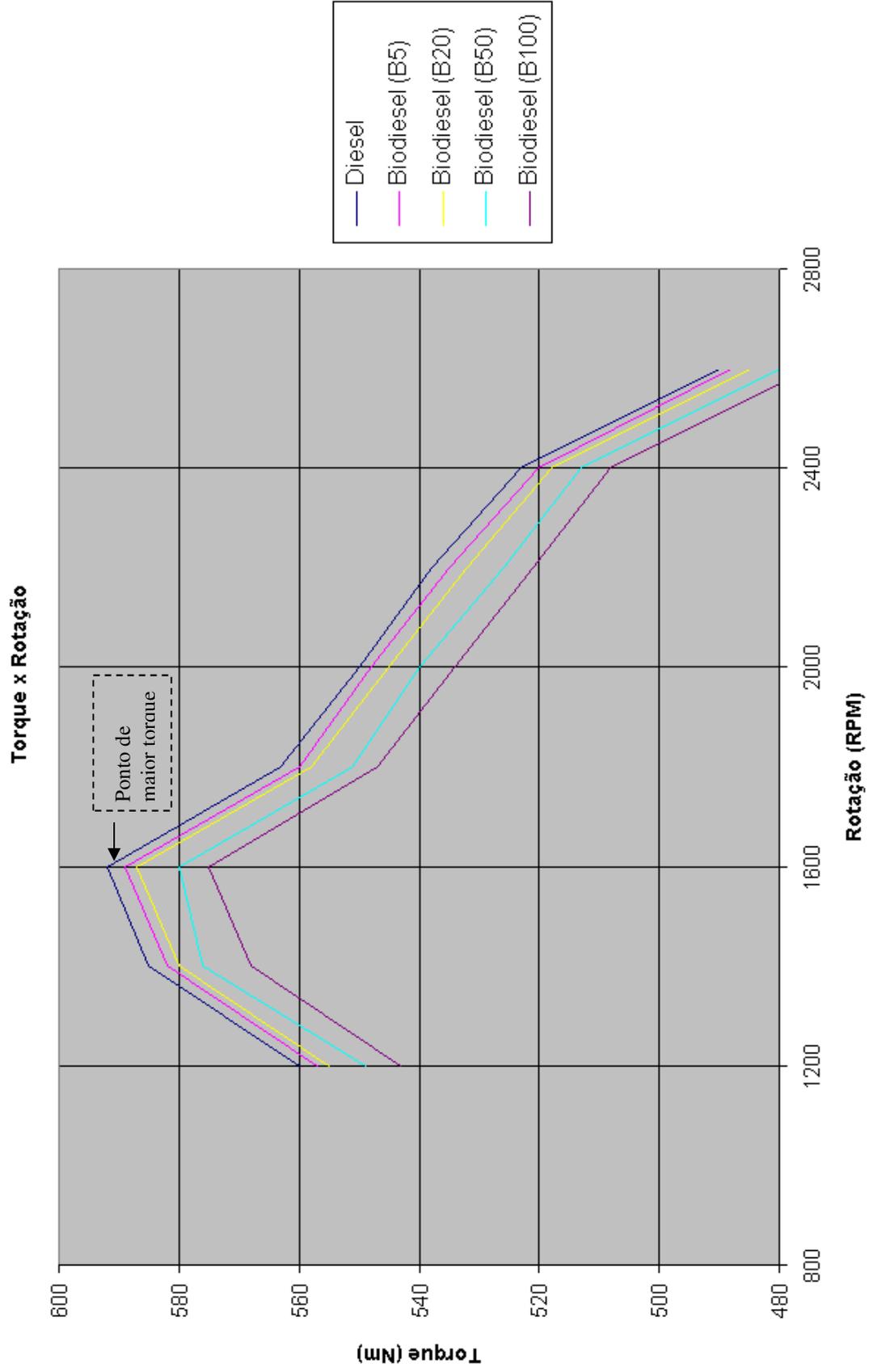


Figura 23: Curva Torque x Rotação.

A Tabela 11 apresenta os dados obtidos no ensaio dinamométrico sob análise da potência x rotação

A Figura 24 mostra graficamente o desempenho do motor para os dados da Tabela 11.

Tabela 11: Dados dinamométricos obtidos da relação entre a potência x rotação.

<b>Diesel</b>		<b>Biodiesel (B5)</b>		<b>Biodiesel (B20)</b>		<b>Biodiesel (B50)</b>		<b>Biodiesel (B100)</b>	
KW	RPM	KW	RPM	KW	RPM	KW	RPM	KW	RPM
70	1200	70	1200	70	1200	69	1200	68	1200
86	1400	85	1400	85	1400	84	1400	83	1400
99	1600	99	1600	98	1600	97	1600	96	1600
106	1800	106	1800	105	1800	104	1800	103	1800
115	2000	115	2000	114	2000	113	2000	112	2000
124	2200	123	2200	123	2200	121	2200	120	2200
131	2400	131	2400	130	2400	129	2400	128	2400
133	2600	133	2600	132	2600	131	2600	129	2600

Pode-se visualizar, na Figura 24, um decréscimo de aproximadamente 3% da potência em função da rotação do biodiesel B100 quando comparado ao diesel comercial. Ao contrário do ocorrido na Figura 23, em que o gráfico de torque x rotação apresenta um pico de torque e sucessivamente um decréscimo do mesmo, a Figura 24, em todas as misturas entre o diesel e o biodiesel, apresenta uma tendência de aumento de potência em função da rotação.

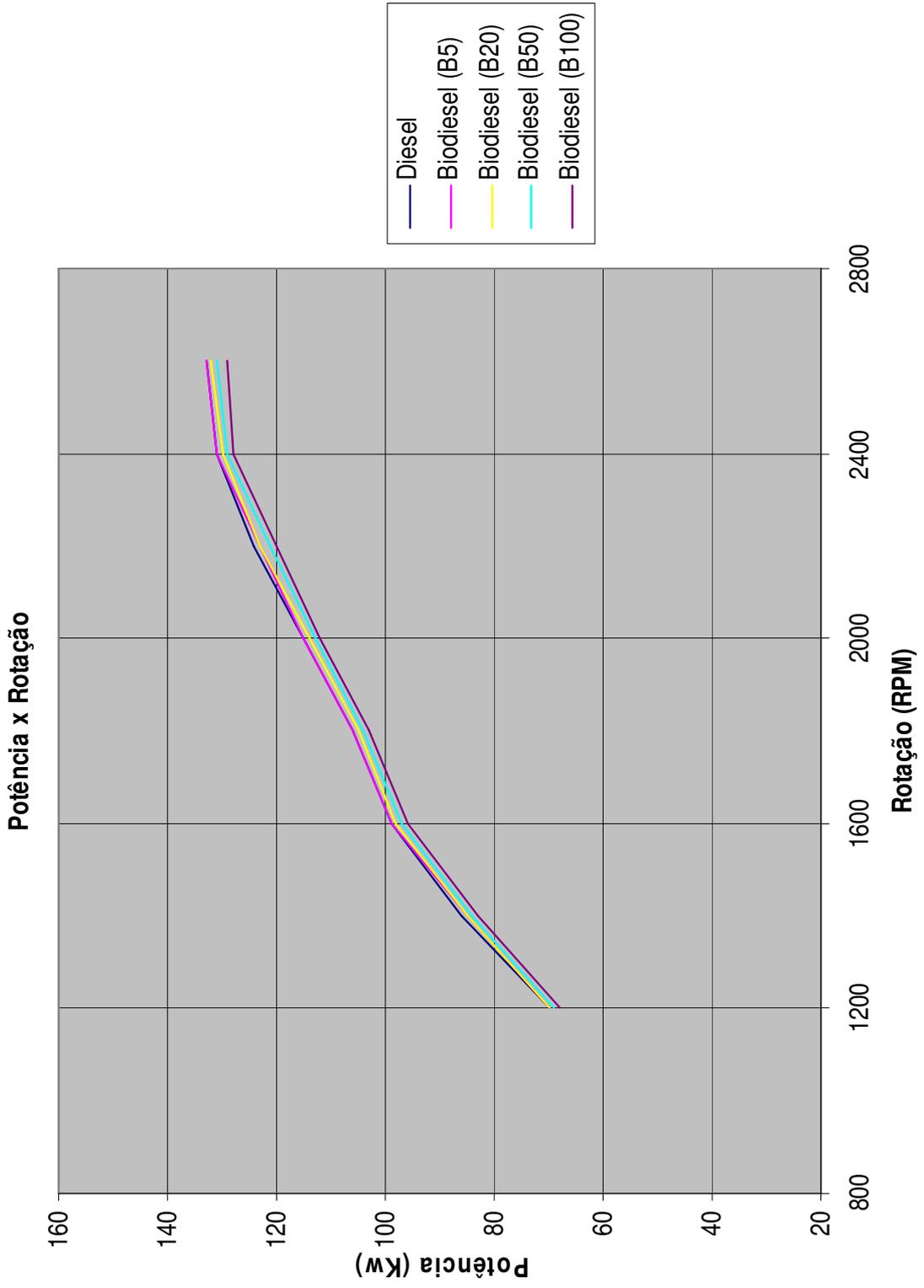


Figura 24: Curva Potência x Rotação.

A Tabela 12 apresenta os dados obtidos no ensaio dinamométrico sob análise do consumo x rotação. A Figura 25 apresenta o desempenho do motor sob os dados obtidos apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Dados dinamométricos obtidos da relação entre ao consumo x rotação.

Diesel		Biodiesel (B5)		Biodiesel (B20)		Biodiesel (B50)		Biodiesel (B100)	
g/KWh	RPM	g/KWh	RPM	g/KWh	RPM	g/KWh	RPM	g/KWh	RPM
220	1200	221	1200	225	1200	230	1200	241	1200
210	1400	211	1400	215	1400	221	1400	230	1400
208	1600	209	1600	212	1600	215	1600	225	1600
207	1800	208	1800	212	1800	216	1800	227	1800
208	2000	209	2000	213	2000	220	2000	228	2000
212	2200	213	2200	217	2200	225	2200	232	2200
220	2400	220	2400	224	2400	233	2400	240	2400
226	2600	226	2600	230	2600	239	2600	246	2600

Na Figura 25, é observado que o biodiesel (B100) apresentou oscilações de 6 a 14% de acréscimo do consumo em função da rotação em relação ao diesel comercial, e ocorreram de modo proporcional nas misturas realizadas entre o diesel comercial e o biodiesel, sendo justificado pela oscilação do poder calorífico dos combustíveis. Também é observada a ocorrência da diminuição do consumo, independentemente do tipo de combustível utilizado, na região em que ocorre o momento de máximo torque. Neste caso o biodiesel no motor diesel não apresenta maior rendimento, devido ao poder calorífico do biodiesel também ser menor que o diesel segundo amostras analisadas e utilizadas (Diesel: 44.816 KJ/kg) e (Biodiesel B100: 39.628 kJ/kg).

O procedimento para aquisição de dados do consumo ocorreu pela verificação da variação do consumo volumétrico de um determinado volume de combustível em um *becker* graduado de precisão em função do tempo, considerando as mesmas condições de rotações, torque e potência citadas nas tabelas anteriores.

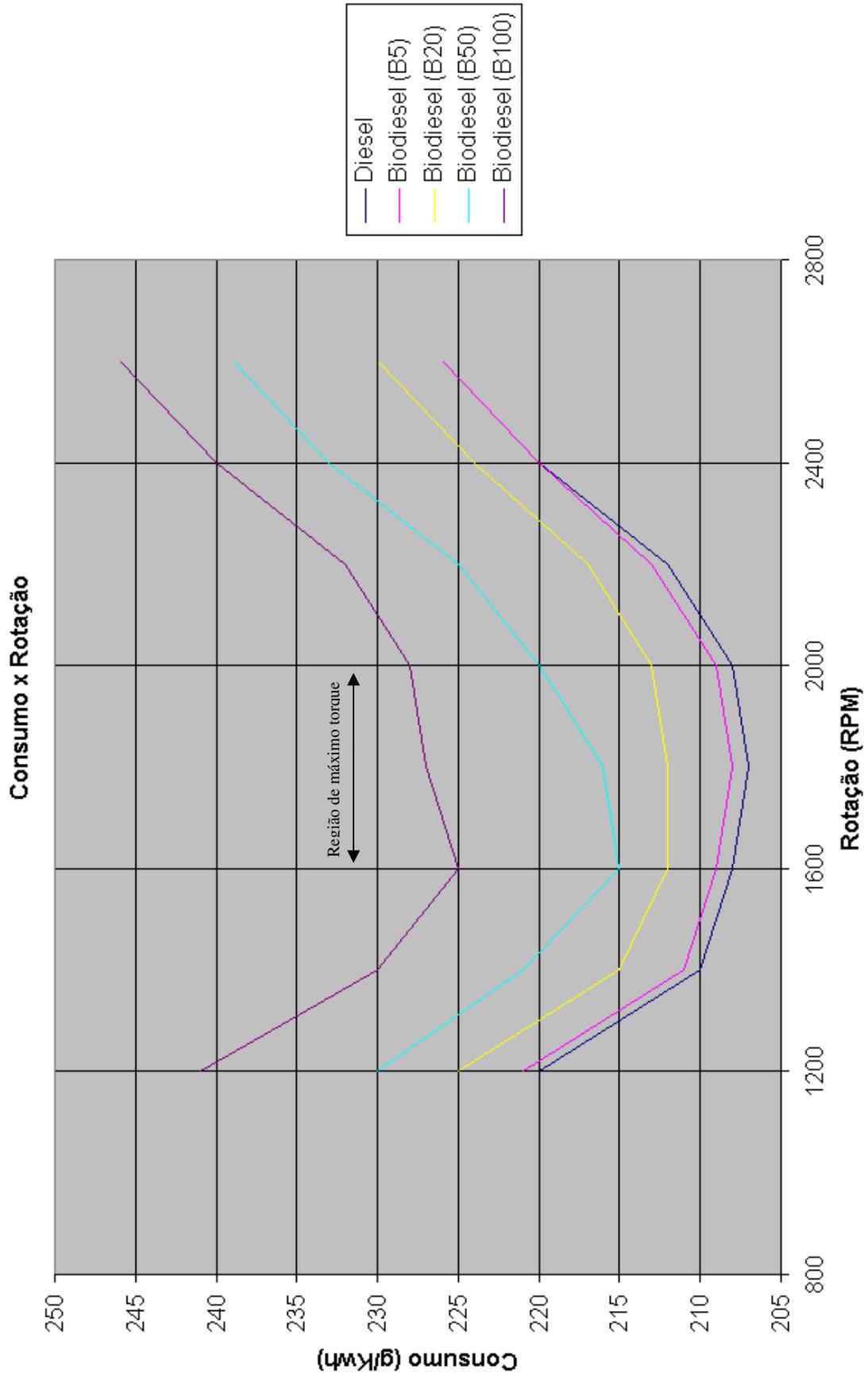


Figura 25: Curva Consumo x Rotação.

A seguir, são apresentados os resultados, para fins comparativos, relacionando os níveis qualitativos e quantitativos dos gases de escapamento emitidos pelo motor Mod. OM366A, segundo o uso das seguintes combinações de combustíveis: Diesel, Biodiesel B5, Biodiesel B20, Biodiesel B50 e Biodiesel B100.

O procedimento para aquisição dos dados foi estabelecido mediante a obtenção de pontos representados pelas potências calculadas que, por sua vez, foram alimentados pelas informações de RPM e torque simulados no ensaio dinamométrico, sendo assim analisada a emissão de gás em cada ponto encontrado.

A Tabela 13 apresenta os dados obtidos no ensaio dinamométrico para obtenção do teor de CO<sub>2</sub> em relação à potência desenvolvida.

Tabela 13: Dados dinamométricos obtidos da relação entre as emissões de CO<sub>2</sub> x Potência.

Diesel		B5		B20		B50		B100	
Potência KW	CO <sub>2</sub> %								
20	1,8	20	1,7	20	1,6	20	1,5	20	1,1
40	2,2	40	2,1	40	1,9	40	1,8	40	1,3
60	3,1	60	2,9	60	2,7	60	2,5	60	1,9
80	3,4	80	3,1	80	3	80	2,8	80	2
100	3,9	100	3,6	100	3,4	100	3	100	2,4
120	4,2	120	4	120	3,7	120	3,3	120	2,5
140	4,4	140	4,2	140	3,8	140	3,5	140	2,6
160	4,8	160	4,7	160	4,2	160	3,9	160	2,9
180	5,4	180	5,2	180	4,7	180	3,8	180	2,2
200	6,4	200	6,2	200	5,5	200	4,8	200	3,8
220	6,4	220	6,3	220	5,5	220	4,9	220	4
240	6,5	240	6,4	240	5,5	240	5	240	4,1

Na Figura 26, é apresentado, graficamente, o resultado apresentado na Tabela 13. Pode-se observar uma redução média de 41% na emissão de CO<sub>2</sub> quando da utilização do biodiesel (B100), se comparado ao diesel comercial. A redução é proporcional à porcentagem de misturas entre o biodiesel e o diesel comercial, com uma redução da emissão de CO<sub>2</sub> na faixa de oscilação de potência entre 155 a 200 KW, coincidentemente a mesma faixa de potência máxima efetiva que pode ser subtraída do motor conforme descrição do fabricante do motor diesel.

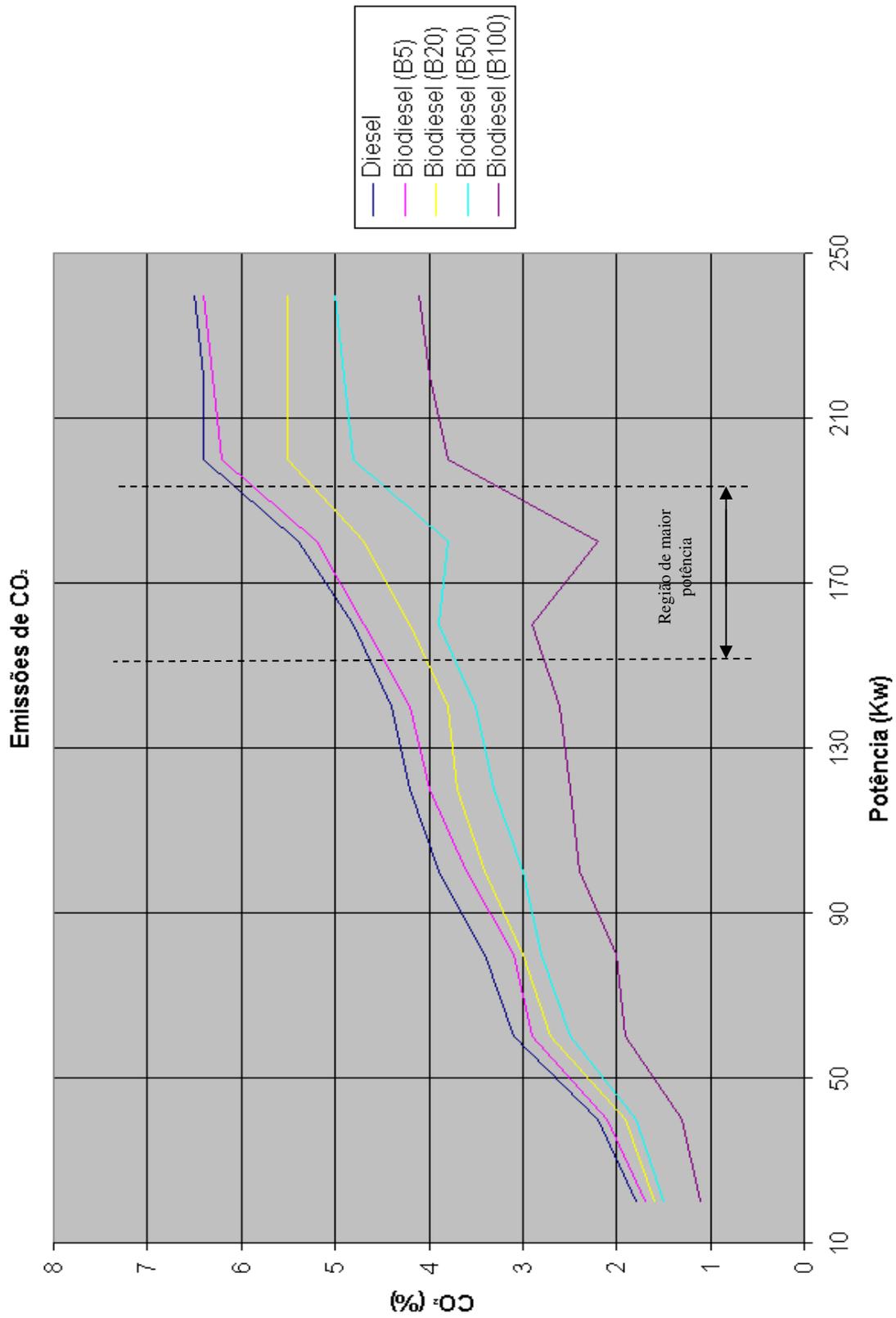


Figura 26: Relação de emissões de CO<sub>2</sub> x Potência.

Na Figura 27, é apresentado, quantitativamente, o teor de CO em relação à potência desenvolvida. Os dados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 14.

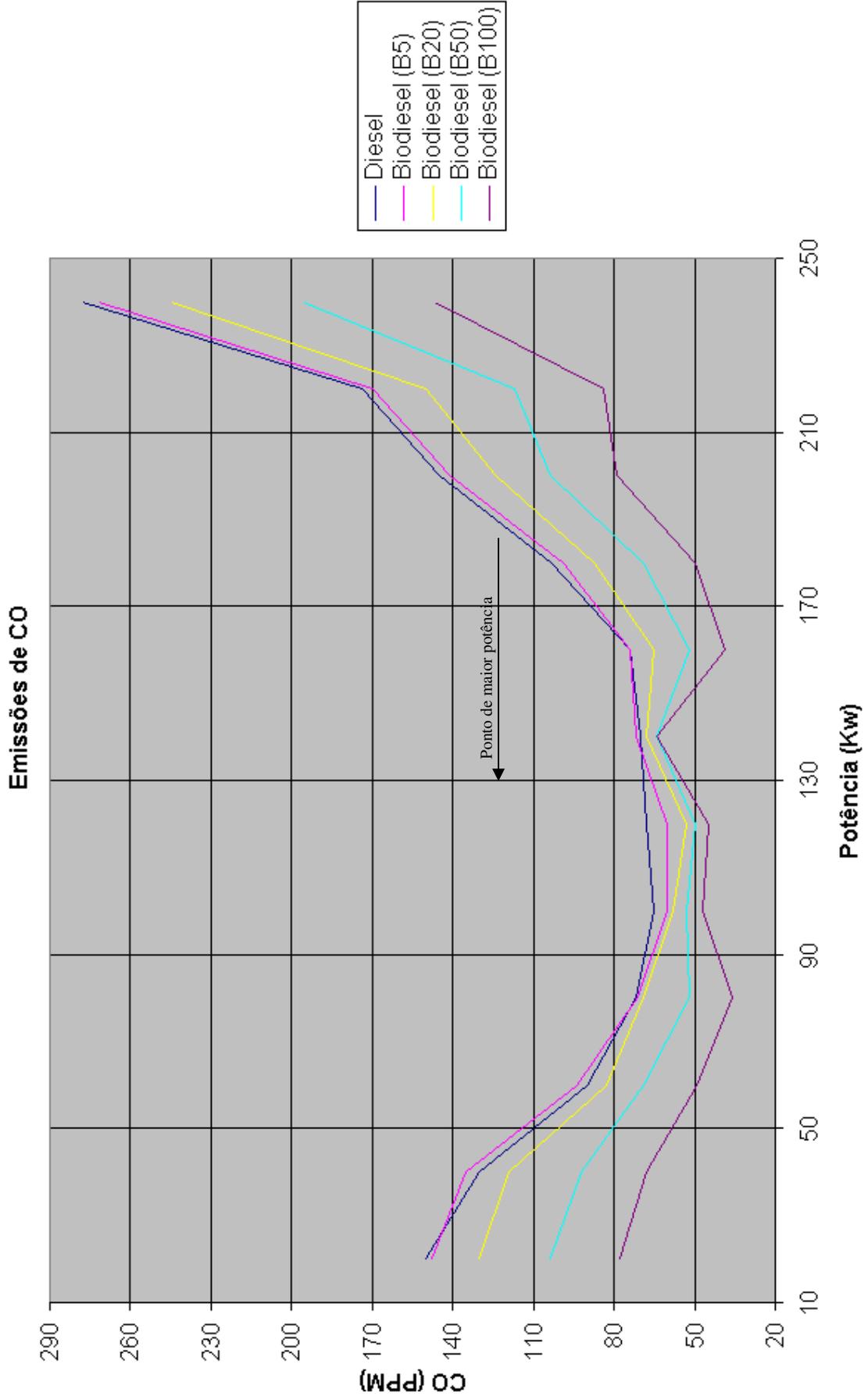


Figura 27: Relação de emissões de CO x Potência.

Tabela 14: Dados dinamométricos obtidos da relação entre as emissões de CO x Potência.

Diesel		B5		B20		B50		B100	
Potência KW	CO PPM								
20	150	20	148	20	130	20	104	20	78
40	130	40	135	40	119	40	92	40	68
60	90	60	94	60	83	60	69	60	49
80	72	80	71	80	69	80	52	80	36
100	65	100	60	100	58	100	53	100	47
120	68	120	60	120	53	120	50	120	45
140	70	140	72	140	68	140	64	140	64
160	74	160	74	160	65	160	52	160	39
180	103	180	99	180	87	180	69	180	50
200	145	200	141	200	124	200	104	200	79
220	174	220	170	220	150	220	117	220	84
240	278	240	272	240	245	240	196	240	147

Na Figura 27, é observada uma redução média de 44% na emissão de CO quando da utilização do biodiesel (B100), se comparado ao diesel comercial. Também houve uma redução média de 5% para o biodiesel B5, de 11% para o biodiesel B20 e 26% para o biodiesel B50. Observa-se que a uma redução de emissão nas proximidades em que ocorre o momento máximo de potência.

A instabilidade da linearização das linhas em função do aumento da porcentagem do incremento do biodiesel ao diesel ocorreu em função da variação da viscosidade do biodiesel, a qual foi controlada mediante o pré-aquecimento da tubulação de combustível envolvente no escapamento do motor, que ocorre por processos de convecção e condução térmica, não tão precisos como no aquecimento e controle por um sistema eletrônico tipo PID (*Proportional Integrator-Differentiator*).

Na Figura 28, é apresentado, quantitativamente, o teor de NO<sub>x</sub> em relação à potência desenvolvida. Os dados obtidos nos ensaios dinamométricos estão apresentados na Tabela 15.

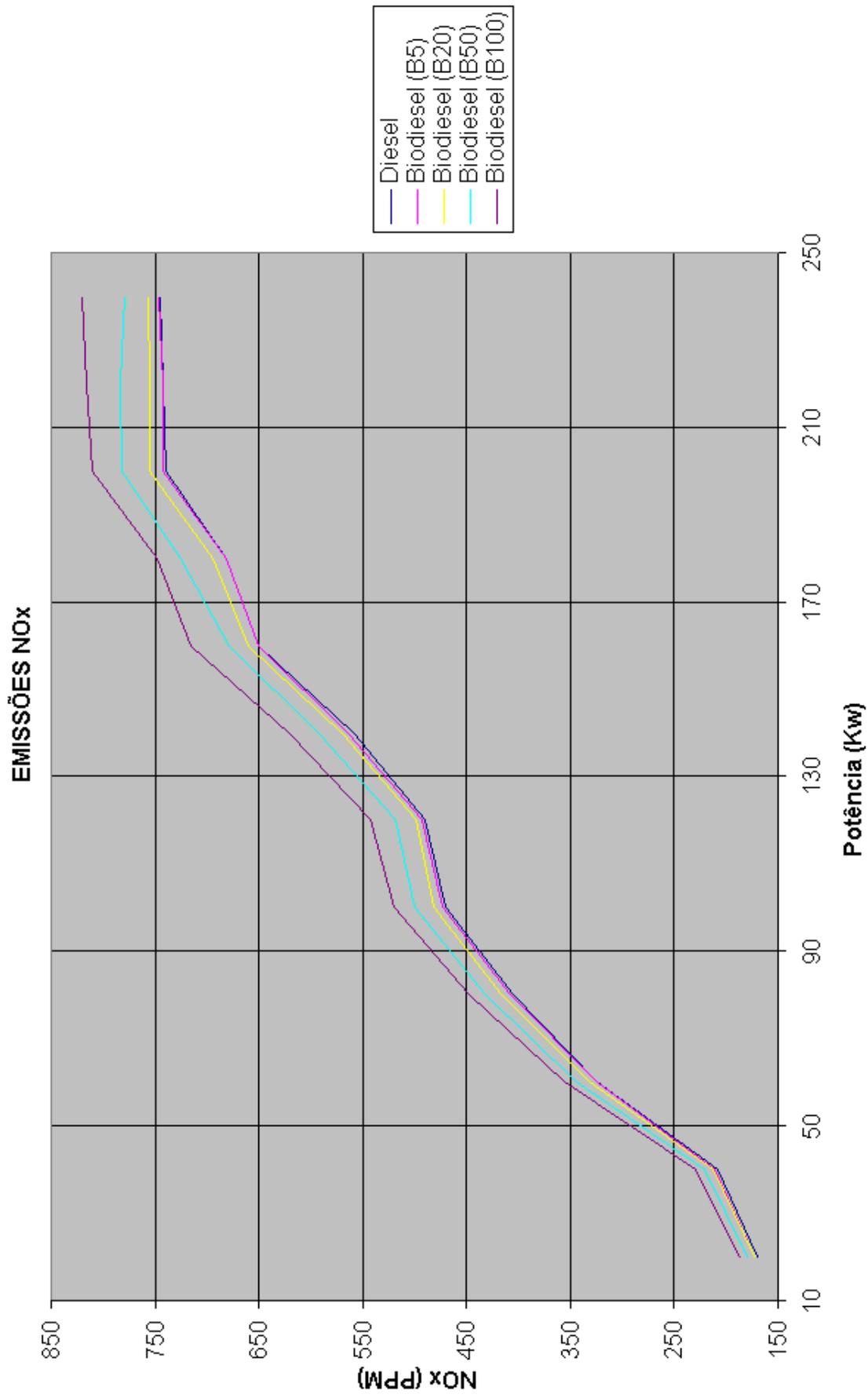


Figura 28: Relação de emissões de (NO<sub>x</sub>) x (Potência).

Tabela 15: Dados dinamométricos obtidos da relação entre as emissões de NO<sub>x</sub> x Potência.

Diesel		B5		B20		B50		B100	
Potência KW	NO <sub>x</sub> PPM								
20	170	20	172	20	173	20	180	20	187
40	208	40	211	40	212	40	221	40	229
60	324	60	325	60	331	60	344	60	356
80	405	80	408	80	416	80	432	80	447
100	470	100	473	100	482	100	500	100	520
120	490	120	493	120	499	120	519	120	542
140	558	140	564	140	569	140	592	140	620
160	650	160	650	160	660	160	679	160	715
180	681	180	681	180	694	180	725	180	748
200	740	200	742	200	755	200	782	200	810
220	742	220	743	220	755	220	783	220	816
240	745	240	747	240	756	240	779	240	820

Analisando o gráfico da Figura 28, pode-se observar um aumento médio 9,2 % na emissão de NO<sub>x</sub> na utilização do biodiesel (B100), se comparado ao diesel comercial, calculado por média aritmética dos dados de potência adquiridos da Tabela 15 do diesel e biodiesel. As linhas também indicam que as emissões do diesel e o biodiesel tendem a aumentar de forma progressiva em função da potência desenvolvida. Para as demais misturas, B5 e B20, não se observam diferenças significativas, isto é, as linhas se apresentam quase sobrepostas.

Nas condições de testes realizados, é necessário destacar que o motor de ciclo diesel estava balanceado estequiometricamente, isto é, a relação de mistura ar/combustível estava equilibrada. Existem testes em que pesquisadores evitaram o balanço estequiométrico para que houvesse um melhor resultado quanto à diminuição da emissão do gás NO<sub>x</sub>, principalmente quando é aumentada a porcentagem de biodiesel inserido no diesel. Este fato será discutido mais adiante.

A partir dos resultados obtidos nos testes dinamométricos realizados em laboratório, como apresentado na Figura 23, conclui-se que a utilização do biodiesel a partir do óleo vegetal de cozinha usado B100, isto é, 100% biodiesel, como proposta de utilização no motor de ciclo diesel Mod. OM366A apresentou, aproximadamente, uma média de 3% de queda de torque x rotação em relação à utilização do diesel comercial sem misturas, uma perda pouco significativa considerando a possibilidade de melhorias no processo, principalmente os relacionados ao controle da densidade do biodiesel.

A análise da Figura 24 mostra que houve um decréscimo de uma média de 3% da potência x rotação com o uso do biodiesel B100 em relação ao diesel comercial, permitindo supor que melhorias na catalisação e aditivação do biodiesel B100 possam melhorar os resultados apresentados.

Na análise da Figura 25, percebe-se que o biodiesel B100 apresentou oscilações de 6 a 14% de acréscimo do consumo x rotação em relação ao diesel comercial, justificado pela diferença entre o poder calorífico dos combustíveis.

As perdas em algumas situações apresentadas nas Figuras 23, 24 e 25 não foram significativas, analisando os ganhos e perdas no conceito global, isto é, os ganhos ambientais e sociais envolvidos. Em citações como as de Ferrari *et al.* (2005) e Santos e Matai (2008), em testes com motores de ciclo diesel com o uso do biodiesel B5, também se constatou um aumento de 7,9% do consumo em relação ao uso somente de diesel comercial, mas ainda caracterizando um custo/benefício totalmente viável.

Silva *et al.* (2012), em testes de misturas de biodiesel com diesel em um motor gerador, relatam que existe um aumento gradativo do consumo de combustível em relação ao aumento do biodiesel incorporado no diesel, consideradas ainda assim pequenas e com variações conforme a origem da matéria prima utilizada para a produção do biodiesel em questão, justificando, como motivo principal das variações do consumo, o poder calorífico dos combustíveis.

Na Tabela 16, é demonstrada a flutuação do poder calorífico de biocombustíveis de origem animal com suas respectivas misturas com óleo diesel comercial.

Tabela 16: Poder calorífico de misturas de biodiesel de origem animal

DIESEL/BIODIESEL	AMOSTRAS (KJ/Kg)			
	1	2	3	Média
B0	43.834	43.496	45.273	44.351
B20	44.166	43.637	43.195	43.666
B40	42.704	41.975	42.,63	42.347
B60	40.188	41.759	41.414	41.12
B100	38.134	39.718	37.468	38.44

Fonte: Silva *et al.* (2012).

Pela análise da Figura 26, pode-se concluir que a utilização do biodiesel B100 apresentou maior relevância na diminuição da emissão do gás CO<sub>2</sub>. Em média, esta redução foi de 41%, se comparada ao diesel comercial, valor este bem próximo ao valor de 42,7 %

encontrado e citado por Santos e Matai (2008) e Morris *et al.* (2003). Porém, existem estudos que comprovam que houve uma redução de CO<sub>2</sub> apenas em baixas rotações (TORRES *et al.*, 2006). Em médias e altas rotações, o biodiesel B100 superou as emissões do diesel comercial, porém considerando o motor com cargas muito baixas, diferentemente dos testes aqui realizados com cargas elevadas.

Pela análise da Figura 27, observou-se uma linearidade na redução de CO nos combustíveis B5 e B20, respectivamente uma redução média de 5% para B5, de 11% para o B20 e de 26% para o B50 em relação ao diesel comercial. Mas a redução de grande relevância foi a do biodiesel B100, que obteve uma média de 44% de redução, se comparado com o diesel comercial. Em condições de médias cargas, observou-se uma redução menor na emissão do gás CO, podendo ser justificada pela oscilação comportamental do motor em algum momento, assim como possíveis oscilações no sistema de abastecimento de combustível (balança). Em estudos citados por Santos e Matai (2008) e Morris *et al.*, (2003), apresenta-se um percentual de redução de CO de 13,1% para o B20 e de 42,7% para o B100, seguindo as mesmas comparações citadas neste parágrafo. Ferreira *et al.* (2008) também explicita em sua pesquisas uma redução de 12% para o B20 e de 48% para o B100.

Kivevele *et al.* (2011), em testes realizados com amostras do biodiesel B20 e B100, mostram que também foi obtido êxito na redução da emissão do gás CO, considerando que é fato que o combustível seja queimado por completo na câmara de combustão e que, para isso, o biodiesel deve ser atomizado de forma satisfatória, neste caso ficando clara a necessidade do controle da volatilidade, densidade e fluidez do biodiesel, e que a utilização de antioxidantes sob esta análise específica não apresentou resultados diferenciados.

Na análise da Figura 28, constatou-se o já evidenciado por Ferreira *et al.* (2008), Santos e Matai (2008), Morris *et al.* (2003) e também o exposto por Gonçalves (2008), em que todas as análises mostraram que a emissão do gás NO<sub>x</sub>, resultante dos combustíveis B5, B20 e B100, superou o emitido pelo combustível diesel. Segundo os artigos consultados, o aumento de NO<sub>x</sub> foi, em média, de 2,1% para o B20 e de 11,6% para o B100. Nos testes apresentados neste trabalho, o aumento das emissões de NO<sub>x</sub> dos combustíveis B5 e B20, em relação ao diesel, não foi representativo e nem relevante; mas, na análise do combustível B100, o aumento foi de, aproximadamente, 9,2%.

As emissões do NO<sub>x</sub> resultantes dos testes realizados com o biodiesel B100 podem ser minimizadas buscando tornar a mistura ar/combustível mais rica ou mais pobre, evitando o equilíbrio da mistura estequiométrica, onde a temperatura é alta e a concentração de oxigênio é intermediária. Para misturas ricas, a concentração de oxigênio na mistura diminui,

diminuindo a formação de  $\text{NO}_x$ . Já para misturas pobres, ocorre uma queda na temperatura no cilindro, o que diminui a produção de  $\text{NO}_x$  (BRAGA, 2007).

Também foram apresentadas soluções para minimização da emissão deste gás  $\text{NO}_x$  se utilizados antioxidantes do tipo terc-butil-hidroquinona, onde testes realizados com o biodiesel B100 não apresentaram alterações na emissão dos hidrocarbonetos e óxido nitroso, pois este tipo de antioxidante tem por objetivo a estabilização do biodiesel por mais tempo. Também foi observado que o aumento da temperatura da combustão por razões estequiométricas do ar/combustível tem contribuído para a formação do  $\text{NO}_x$ , bem como aumento da pressão interna da câmara de combustão (RYU, 2009 *apud* KIVEVELE *et al.*, 2011).

## 5 CONCLUSÕES

O uso do óleo residual de fritura como matéria-prima para a produção de biodiesel mostrou ser de grande valia, se comparado com demais opções de matéria prima de origens diversas, como as do plantio de oleaginosas e óleos de origem animais, uma vez que o óleo residual de fritura está disponível em grandes quantidades pela comunidade doméstica e empresarial, sendo normalmente despejado na natureza.

O óleo residual de fritura usado como matéria prima para obtenção de biodiesel apresentou características de grande relevância, como alto ponto de fulgor, que viabilizaram a sua estocagem e manuseio.

Os ganhos relacionados à redução de emissões de gases tóxicos resultantes de processos de combustão foram relevantes, considerando a grande redução de emissões de CO, CO<sub>2</sub> e, de certa forma, os estudos apontam para uma possibilidade de redução também do gás NO<sub>x</sub>, desde que seja melhorada a densidade, aditivação e balanço estequiométrico do biodiesel.

A grande viabilidade técnica do uso do biodiesel, considerando os aspectos físico-químicos, foi apresentada de forma positiva, interpretada mediante testes de torque e potência realizados, com pouca variabilidade em função do aumento do incremento do biodiesel ao diesel. O consumo específico do biodiesel em relação ao diesel apresentou um aumento relativamente baixo, mas com possibilidades de melhora através da aditivação, melhor controle da densidade e estabilidade do processo de transesterificação.

O uso do óleo residual de fritura como base para a produção do biodiesel, além de ter provada sua viabilidade técnica, apresenta-se também, como uma solução alternativa para o problema de destinação incorreta do óleo usado que, descartado incorretamente, tem um alto poder de contaminação do solo e da água.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos, pode-se destacar:

- Realizar testes no motor de ciclo diesel com alternativa de uso de aditivos comerciais no biodiesel viabilizando a redução do NO<sub>x</sub> resultantes da combustão

-Utilizar outros métodos de catalisação com adição de antioxidantes, com o objetivo de reduzir o consumo do combustível.

- Utilizar o biogás como meio alternativo de propulsão no motor de combustão interna de ciclo diesel.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. Disponível em <http://www.anp.gov.br/?id=592>, Acesso em 23 abril 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. **Síntese dos preços praticados**. Disponível em: [http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo\\_Por\\_Estado\\_Municipio.asp](http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp). Acesso em: 13 jun. de 2012.

ALEME, H. G. **Determinação de parâmetros físico-químicos do óleo diesel a partir das curvas de destilação utilizando técnicas quimiométricas**. Tese de Doutorado. Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011, 149 p.

ALLGAYER, M. L. **Determinação do fator de saturação e recuperação de vapores nas operações de carregamento de derivados de petróleo**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. 64 p.

ANVISA. Agência de Vigilância Sanitária. Resolução ANVISA nº 482 de 23 de setembro de 1999. **Regulamento técnico para fixação de identidade e qualidade de óleos e gorduras vegetais**. Disponível em: < [http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/482\\_99.htm#](http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/482_99.htm#) > Acesso em: 27 ago. 2012.

BARBOSA, G. N.; PASQUALETTO, A. **Aproveitamento do óleo residual de fritura na produção de biodiesel**. Universidade Católica de Goiás, GO, 2007, 18p. Disponível em: <http://www.pucgoias.edu.br/ucg/prope/cpgss/ArquivosUpload/36/file.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2012.

BARROS, A. A. C.; WUST, E.; MEIER, H. F. Estudo da viabilidade técnico-científica da produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos. *Eng. Sanit. Ambiental*, v.13, n.3, p.255-262, 2008.

BORUGADDA, V. B.; GOUD, V. **Biodiesel production from renewable feedstocks: Status and opportunities**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.16, p. 4763-4784, 2012.

BOSH, Robert. *Automotive Handbook*. Verlag, Germany, 1993, 852p.

BOSH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. 25ª edição. Ed. Edgard. Blucher, 2005.

BOULANGER, P.; ADAM, B. *Moteurs Diesel*. 4ª edição. Paris: Ed. Hemus, 1990, 660p.

BRAGA, G.T. **Uma contribuição ao controle de motores de combustão interna de ignição por centelha na condição de marcha lenta**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2007.

CARVALHO, S. A. E. S. **Equilíbrio líquido na produção do biodiesel**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade de Aveiro, 2007, 121 p.

CASTELLANELLI, C. A. **Estudo da viabilidade de produção do biodiesel, obtido através do óleo de fritura usado, na cidade de Santa Maria - RS**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.

CAMPOS, M. De olho no biodiesel. *Revista Combustíveis*, v.41, p.40-43, ago. 2006.

CELLA, R.C.F.; D'ARCE, M.A.B.R.; SPOTO, M.H.F. Comportamento do óleo de soja refinado utilizado em fritura por imersão com alimentos de origem vegetal. *Ciência Tecnologia de Alimentos*, v.22, n.2, p.111-116, maio/ago 2002.

CEPLAC – Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira. Disponível em: <http://www.ceplac.gov.com.br>. Acesso em: 30 ago. 2012.

CHANG, Y. Z. D.; GERPEN, V. H. J.; LEE, I.; JOHNSON, A. L.; HAMMOND, G. E.; MARLEY, J. S.; *J. Am. Oil Chem. Soc.*, v.73, p.1549, 1996.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Ministério do Meio Ambiente, DOU nº 053, de 18/03/2005, p.58-63.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 415, de 24 de setembro de 2009**. Ministério do Meio Ambiente, DOU nº 184, de 25/09/2009, p.53-54.

CHRISTOFF, P. **Produção de biodiesel a partir do óleo residual de fritura comercial**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba-PR, 2006, 83p.

DIB, F.H. **Produção de biodiesel a partir de óleo residual reciclado e realização de testes comparativos com outros tipos de biodiesel e proporções de mistura em um motor-gador**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, SP, 2010.

DIETRICH, A. B. **Um estudo de correntes induzidas em meios maciços ferromagnéticos - Aplicação no projeto de freios de correntes parasitas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

ENWEREMADU, C. C.; MBARAWA, M. M. Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n.9, p.2205–2224, 2009.

EPA – Environmental Protection Agency. *A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions*. Disponível em:

<http://www.epa.gov/oms/models/analysis/biodsl/p02001.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2012.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA ENSAIO DE MOTORES DE COMBUSTÃO EM DINAMÔMETROS. CONAMA, Maio 2007.

FERNANDES, R. K. M.; PINTO, J. M. B; MEDEIROS, O. M.; PEREIRA, C. A. **Biodiesel a partir de óleo residual de fritura: alternativa energética e desenvolvimento sócio-ambiental**. XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-RJ, 2008.

FERRARI, A. R; OLIVEIRA, V. S.; SEABIO, A. Biodiesel de soja: taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. *Química Nova*, v.28, n.1, p.19-23, 2005.

FERREIRA, S. L.; SANTOS, A. M., SOUZA, G. R., POLITO, W. L., MÓDOLO, D. L. Análise por cromatografia gasosa de BTEX nas emissões de motor de combustão interna alimentado com diesel e mistura diesel-biodiesel (B10). *Química Nova*, v.31, n.3, p.539-545, 2008.

GERIS, R.; SANTOS, N.A.C.; AMARAL, B.A.; MAIA, I.S.; CASTRO, V.D.; CARVALHO, J.R.M. Biodiesel de soja: reação de transesterificação para aulas práticas de química orgânica. *Química Nova*, v.30, n.5, p.1369-1373, 2007.

GONÇALVES, J.A. **Análise de emissões de gases de combustão em motor do ciclo diesel utilizando óleo diesel e óleos vegetais puros.** Monografia Engenharia Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008, 68p.

GUERRA, E.P.; FUCHS, W. Biocombustível renovável: uso de óleo vegetal em motores. *Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais*, v.8, n.1, p. 103-112, jan./mar. 2010.

INSTITUTO CARBONO BRASIL. **Mudanças climáticas.** Disponível em: <http://www.institutocarbonobrasil.org.br/noticias2/noticia=728869>. Acesso em: 18 jun. de 2012.

KETOLA, T.; SALMI, T. Sustainability life cycle comparison of biofuels: sewage the saviour? *Management of Environmental Quality: An International Journal*, v. 21, n.6, p.796 – 811, 2010.

KIVEVELE, T.; KRISFOF, L.; BERECZKY, A.; MBARAWA, M.M. Engine performance, exhaust emissions and combustion characteristics of a CI engine fuelled with croton megalocarpus methyl ester with antioxidant. *Fuel*, v.90, n.8, p. 2782-2789, Aug. 2011.

KNOTHE, G.; DUNN, R. O.; BAGBY, M. O. Biodiesel: the use of vegetable oils and their derivatives as alternative diesel fuels. *ACS Symp Ser*, v.666, p.172-208, 1997.

KRUPA, S. V. *Air pollution, people, and plants: an introduction.* St. Paul (MN): The American Phytopathological Society, 1997, 207p.

MACHADO, P. R. M. **Avaliação de Desempenho do Óleo de Soja como Combustível para Motores Diesel.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2003.

MACIEL, D. M. A.; MARTINI, M. M. J.; VENTURA, P. C. S. **Protótipo para estudo de correntes parasitas em meios maciços.** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG. Laboratório Aberto de Ciência Tecnologia Educação e Arte – LACTEA, 2003. Disponível em: [http://www.cienciamao.usp.br/tudo/exibir.php?midia=snef&cod=\\_prototipoparaestudodecor](http://www.cienciamao.usp.br/tudo/exibir.php?midia=snef&cod=_prototipoparaestudodecor) Acesso em: 30 mar. de 2012.

MITTELBAACH, M.; TRITTHART, P. Diesel fuel derived from vegetable oils. II. Emission tests using methyl esters of use frying oil; *J. Am. Oil Chem. Soc.*, v.65, p.1185-1187, 1988.

MOECKE, E.H.S., WERNER, S.M., GELSLEICHTER, Y.A., ÁVILA, A.F.A., SILVEIRA, T.C. Produção de biodiesel a partir do óleo de fritura usado e o empoderamento da

comunidade. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v.1, n.1, p. 33-40, abr./set. 2012.

MORRIS, R.E.; POLLACK, A.K.; JIA, Y. *Impact of biodiesel fuels on air quality and human health summary report*. Environ International Corporation Novato, Califórnia, 2003. 53p.

MOTHÉ, C. G.; CORREIA, D. Z.; CASTRO, B. C. S. de; CAITANO, M. Otimização da produção de biodiesel a partir de óleo de mamona. *Revista Analítica*, v.1, n.19, p.40-43, 2005.

NEGRELLO, L.; ZENTI, L. **Revolução Verde**. In: Revista Biodiesel, n 1, Curitiba-PR, ano 1, 2007, p. 12.

NETO, P. C.; FRAGA, A. C. **Biodiesel: combustível ecológico**. 4º Congresso brasileiro de plantas oleaginosas, óleos, gorduras e biodiesel. MG-Brasil, 2007. Disponível em: [http://oleo.ufla.br/anais\\_04/artigos/anais\\_completos.pdf](http://oleo.ufla.br/anais_04/artigos/anais_completos.pdf). Acesso em: 28 ago. de 2012.

NETO, P. R. C.; ROSSI, L. F. S.; ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. *Química Nova*, v.23, n.4, p. 531-537, 2000.

PETROBRÁS – Petróleo Brasileiro S/A. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br>. Acesso em: 18 jun. de 2012.

PINTO, E.; MELO, M.; MENDONÇA, M.L. **O mito dos biocombustíveis**. Revista Eletrônica Brasil de Fato, fev. 2007. Disponível em: <http://www.brasildefato.com.br/node/4025>. Acesso em: 28 ago. de 2012.

RABELO, I.D.; HATAKEYAMA, K.; CRUZ, C. M. G. S. **Estudo de desempenho de combustíveis convencionais associados a biodiesel obtido pela transesterificação de óleo usado em fritura**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2002. Disponível em: <http://revistas.utfpr.edu.br/pb/index.php/revedutec-ct/article/viewFile/1132/729>. Acesso em: 03 set.2012.

RAMOS, L. P.; In: **Anais do Congresso Brasileiro de Soja**. Centro Nacional de Pesquisa de Soja; Empresa Nacional de Pesquisa Agropecuária; Londrina, PR, 17 a 20 de maio, 1999; p. 233.

ROSA, H.A.; CHAVES, L.I.; SECCO, D.; REOLON, C.B.; WAZILEWSKI, W.T.; VELOSO, G. **Avaliação das emissões de Monóxido de carbono (CO) em um motor-gerador ciclo diesel utilizando diesel e biodiesel**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PN, v.1, n.1, p. 8-14, 2012.

SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=82>. Acesso em: 05 jun. de 2012.

SANTOS, M.A.; MATAI, P.H.L. Aspectos técnicos e ambientais relativos ao uso de biodiesel em motores de combustão. *Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente* - v.3, n.1, p.1-18, jan./abril. 2008.

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS, R. M. Transesterification of vegetable oils: a review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v.9, n.3, p.199-210, 1998.

SHAHID E. M., JAMAL Y. A review of biodiesel as vehicular fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.12, p.2484–2494, 2008.

SILVA, F.M. da; LOPES, A.; CASTRO NETO, P.; DABDOUB, M. J.; SALVADOR, N.; SILVA, R. P. da. **Desempenho do motor de combustão alimentado com diesel, B50 e B100.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 1, 2005. Varginha, MG. Anais.

SILVA, L. L. **Estudo de óleos residuais oriundos de processo de fritura e qualificação e qualificação desses para obtenção de monoésteres (Biodiesel).** Dissertação de mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas – UFAL, 2008, 65 p.

SILVA, M. J.; SOUZA, S.N.M.de; SOUZA, A.A.; MARTINS, G.I.; SECCO, D. Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.3, p.320–326, 2012.

SOCOL, C. R.; VANDENBERGHE, L.P.S.; COSTA, B.; WOICIECCHOWSKI, A.L.; CARVALHO, J. C. de; MEDEIROS, A.B.P.; FRANCISCO, A.M.; BONOMI, L.J. Brazilian biofuel program: an overview. *Journal of Scientific and Industrial Research*, v. 64, p. 897-904, 2005.

SOLOMONS, T. W. G. **Química orgânica 1.** LTC Livros Técnicos e Científicos S.A., 6ª ed, 1996.

SOUZA, C. A. de. **Sistemas catalíticos na produção de biodiesel por meio de óleo residual.** In An. 6. Enc. Energ. Meio Rural 2006. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000200040&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000200040&script=sci_arttext&tlng=pt). Acesso em: 08 out. 2012.

SOUZA JUNIOR, G.C. **Simulação termodinâmica de motores diesel utilizando óleo diesel e biodiesel para verificação dos parâmetros de desempenho e emissões.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2009, 139p.

TORRES, E. A.; SANTOS, D. C.; SOUZA, D. V. D.; PEIXOTO, L. B.; FRANÇA, T. **Ensaio de motores estacionários do ciclo diesel utilizando óleo diesel e biodiesel (B100).** In Anais do 6º. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006, Campinas (SP).

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *International energy outlook.* Washington, DC, USA, 2006.

VALENTE, O.S. **Desempenho e emissões de um motor-gerador de energia elétrica operando com biodiesel.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Católica de Minas Gerais, 2007, 161p.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica.** 4ª Edição. São Paulo: Ed. Campus, 1995.

WONG, J. Y. *Theory of ground vehicles*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001. 330p.

WUST, E. **Estudo da viabilidade técnico-científica da produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos**. Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau – FURB, 2004, 113 p.

ZHANG, Y.; DUBÉ, M. A.; MCLEAN, D. D.; KATES, M. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*, v.89, n.1, p.1–16, 2003.

## ANEXO A

### ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA SISTEMAS DE ENSAIO DE MOTORES

Segundo CONAMA (2005), o sistema para ensaio de motores deverá compreender:

- Conjunto de dinamômetro de bancada com freio elétrico e demais acessórios necessários ao seu perfeito funcionamento;
- Sistema de automação e de monitoramento, controle e simulações;
- Atuador do acelerador (*throttle actuator*);
- Acoplamento com capacidade adequada à potência dos motores a serem ensaiados;
- Sistema de condicionamento de temperatura de água e de óleo;
- Conjunto completo para medida e registro do sinal de sensores: temperaturas, pressões, condições atmosféricas;
- Interfaces analógicas e digitais de entrada e saída de dados/sinais;
- Interface para conexão com sistema de análise de emissões;
- Medidor de vazão;
- Medidor dinâmico de combustível (gasolina, álcool e diesel);
- Medidor de fumaça (*smoke meter*);
- Opacímetro;
- Console de operação e controle;
- Dinamômetro de Bancada – 350/380 kW;
- Potência máxima contínua: (aprox.) 365 kW;
- Torque máximo contínuo: (aprox.) 2200 Nm;
- Máxima rotação: (aprox.) 3500 rpm;
- Estrutura metálica para instalação do conjunto do dinamômetro-motor sobre piso plano e acabado;
- Coberturas sobre as partes móveis;
- Eixo cardam para acoplamento entre volante do motor e o freio elétrico;
- Trocadores de calor para condicionamento da temperatura da água de resfriamento e óleo lubrificante;
- Lança portas-cabo para interligação entre o equipamento, seus acessórios, instrumentação e console de comando;
- Gabinete de força classe IP23;

- Deverá ser fornecido com todos os acessórios e dispositivos de segurança necessários para a execução e a monitoração de testes;
- Conexões e engates do tipo “rápido” para interligação com as utilidades (água, ar comprimido, eletricidade, etc.);
- Mangueira flexível para condução dos gases de exaustão para o exterior da sala do dinamômetro;
- Kit para calibração do dinamômetro;
- Sistema de intertravamento para parada de emergência em caso de problemas de segurança;
- Deverá ser possível a criação e o armazenamento de testes pelos usuários;
- Geração de relatórios (data, hora, ciclo, ocorrências, etc).

O dinamômetro de bancada para ensaio de motores deverá, além de permitir o teste de motores do ciclo Otto, também permitir a realização dos ciclos de testes previstos para motores do ciclo Diesel pelos PROCONVE P-5 e P-6 (Programa do Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores 2006-2009). Entre estes estão o ESC (*European Stationary Cycle*) e o ETC (*European Transient Cycle*), que tem por objetivos:

1-Reduzir os níveis de emissões de poluentes pelo escapamento e por evaporação, procurando atender aos padrões nacionais de qualidade;

2-Promover o desenvolvimento tecnológico nacional, na engenharia do projeto, de fabricação e em métodos e equipamentos para controle de emissão de poluentes;

3-Adequação dos combustíveis automotivos comercializados, minimizando a agressividade ao meio ambiente e a saúde pública.