



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**COMPARATIVO ENTRE BODIESEIS PRODUZIDOS A PARTIR DE  
DIFERENTES MATÉRIAS-PRIMAS E ROTAS DE PRODUÇÃO E  
UTILIZADOS EM MOTOR ESTACIONÁRIO**

**JOÃO RICARDO O. LEMPEK**

ENGENHEIRO MECÂNICO

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA  
E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre  
Março, 2016**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**COMPARATIVO ENTRE BODIESEIS PRODUZIDOS A PARTIR DE  
DIFERENTES MATÉRIAS-PRIMAS E ROTAS DE PRODUÇÃO E  
UTILIZADOS EM MOTOR ESTACIONÁRIO**

**JOÃO RICARDO O. LEMPEK**  
ENGENHEIRO MECÂNICO

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre**  
**Março, 2016**

*Sorte não é algo aleatório, casual. É o fruto de um plano mestre, de seguir um roteiro prévio, de estabelecer padrões e parâmetros e segui-los. Sorte é uma construção produto de nossas escolhas. Tais escolhas criam nossa realidade e isto, não é acaso.*

(Adaptado de D. Magalhães por JR)

## **DEDICATÓRIA**

A todos que apoiaram, inclusive os que não acreditavam, como retorno a toda felicidade deste momento, vos asseguro o sentimento inestimável de mais uma meta alcançada.

Sem esquecer que ainda se tem muito a aprender e que o conhecimento é algo “infinito do ponto de vista quantitativo”, porém, preocupando-se sempre com a qualidade do que é absorvido e principalmente “irradiado”.

Dedico aos meus mentores, sejam eles acadêmicos, profissionais ou até amigos que indiretamente fizeram parte deste processo e participaram desta difícil, mas enriquecedora trajetória até aqui, em função de todas dificuldades, mudanças, insatisfações que possam ter ocorrido e com a certeza de que tudo pode ser superado.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos pais, estes que possibilitaram a base necessária para chegar até aqui e, principalmente, à mãe que nunca mediu esforços para incentivar e dar o apoio necessário nos momentos fáceis ou difíceis;

Ao orientador Prof. Carlos Alexandre dos Santos por acreditar e apoiar em todos os momentos, seja academicamente, seja com sua experiência de vida. Um exemplo de profissional pelo conhecimento e domínio e também pela sabedoria nas relações humanas, quesito fundamental na área acadêmica;

Ao Prof. Luiz Antônio Mazzini Fontoura pela atenção e interesse em contribuir, sempre prestativo e amigo, parte fundamental para que este projeto tivesse andamento, além da doação dos biodieseis utilizados nos ensaios;

À PUCRS, FAPERGS, CAPES e CIENTEC pela bolsa de estudos, utilização de instalações e equipamentos para realização dos ensaios e análises físico-químicas realizadas;

À Bianchini S.A. pela doação de parte do biodiesel utilizado nos ensaios;

Aos professores Sérgio Barbosa Rahde, Vicente Mariano Canalli e Marcus Seferin pelos auxílios e prestatividade;

Ao técnico Carlos Alberto Cunha pelos auxílios no dia-dia de laboratório;

Aos alunos Vítor Hugo dos Santos, Rafael Lantmann, Milton de Souza e Anderson de Paulo, pelo auxílio nos ensaios e disponibilidade do seu tempo;

Aos amigos do grupo de estudos e pesquisa “Unidos por Engenharia”: Bruno Farenzena e Felipe Schuch pela união e incentivo mútuo;

A todos os amigos e familiares presentes nesta fase da minha vida, seja diretamente ou não.

Muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>4</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>5</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>14</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. Contextualização.....	15
1.2. Motivação.....	18
1.3. Estrutura do Trabalho.....	19
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1. Objetivo Geral.....	20
2.2. Objetivos Específicos .....	20
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
3.1. Conceitos Básicos .....	21
3.1.1. Ciclo Diesel.....	21
3.1.2. Biodiesel.....	22
3.1.2.1. Matérias-Primas.....	25
3.1.2.2. Rotas de Produção e Propriedades Físico-Químicas .....	28
a) Teor de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio.....	31
b) Massa Específica .....	31
c) Viscosidade Cinemática .....	32
d) Poder Calorífico.....	32
3.1.3. Normas e Leis .....	34
3.2. Consumos Específicos ( $C_e$ ).....	34
3.3. Emissões de Gases .....	36

3.4. Conteúdo Energético .....	38
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
4.1. Aquisição de Biodiesel, Percentual de Pureza e Percentual de Biodiesel nas Misturas .....	41
4.2. Análise Química das Misturas.....	41
4.3. Grupo Motor-Gerador e Medições de Opacidade, Consumo e Emissões ..	43
4.4. Metodologia, Planilhas e Condições de Realização dos Ensaios .....	46
4.4.1. Local de Execução do Ensaio .....	47
4.4.2. Medidas Preliminares .....	47
4.4.3. Medidas Preventivas.....	48
4.5. Consumo Energético .....	48
4.6. Ensaio com Banco de Resistência .....	49
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>50</b>
5.1. Percentual de Pureza e Percentual de Biodiesel nas Misturas.....	50
5.2. Análise Química das Misturas.....	51
5.3. Opacidade, Consumo e Emissões.....	58
5.4. Consumo Energético .....	66
5.5. Comparativo dos Ensaio com Banco de Resistência .....	68
5.6. Considerações Finais .....	72
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>75</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Reservas de energia do Brasil. (Fonte: BNEF, 2013). .....	16
Figura 3.1. Reação de transesterificação (Fonte: MENEGHETTI, 2013).....	23
Figura 3.2. Emissões de CO <sub>2</sub> para biodiesel comparado ao diesel (Fonte: EMBRAPA, 2012).....	25
Figura 3.3. Produção de biodiesel x matérias-primas (Fonte: ANP, 2013). .....	26
Figura 3.4. Consumo específico por misturas BX (Fonte: JULIATO, 2006).....	35
Figura 3.5. Consumo energético por misturas BX para rotações fixas (Fonte: FIORESE, 2011). .....	39
Figura 3.6. Consumo horário médio por mistura BX (Fonte: FIORESE, 2011). .....	39
Figura 3.7. Consumo horário volumétrico por mistura BX (Fonte: SORANSO, 2008).40	
Figura 3.8. Consumo horário volumétrico por mistura BX (Fonte: TABILE, 2008)....	40
Figura 4.1. Misturas separadas para análises químicas. ....	42
Figura 4.2. Grupo motor-gerador (Rugerrini 191 Lombardini Srl).....	43
Figura 4.3. Opacímetro NAPRO - NA-9000 (Fonte: NAPRO). .....	44
Figura 4.4. Analisador de gases Testo XL 350 (Fonte: TESTO).....	45
Figura 4.5. Diagrama esquemático de testes (Fonte: De Paulo, 2016). .....	45
Figura 4.6. Banco de resistências. ....	49
Figura 5.1. Teor de carbono para cada mistura. ....	52
Figura 5.2. Teor de nitrogênio para cada mistura. ....	52
Figura 5.3. Teor de hidrogênio para cada mistura. ....	53
Figura 5.4. Poderes caloríficos superiores (PCS) e inferiores (PCI) para cada mistura. ....	56

Figura 5.5. Massas específicas para cada mistura. ....	57
Figura 5.6. Opacidades médias para cada mistura.....	59
Figura 5.7. Consumos mássico para cada mistura. ....	61
Figura 5.8. Emissões médias para banha de porco por rota etílica. ....	63
Figura 5.9. Emissões médias para soja por rota etílica.....	64
Figura 5.10. Emissões médias para soja por rota metélica.....	65
Figura 5.11. Consumo energético global. ....	67
Figura 5.12. Emissões médias com desvio padrão para banha de porco por rota etílica com banco de resistências. ....	70
Figura 5.13. Emissões médias para banha de porco por rota etílica com e sem banco de resistências.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Óleos vegetais e gorduras animais no Brasil, 2009, em mil toneladas. .	27
Tabela 3.2. Caracterização físico-química do biodiesel. ....	28
Tabela 3.3 – Vantagens do etanol sobre o metanol.....	30
Tabela 3.4. Teor de ésteres graxos no biodiesel (%). ....	30
Tabela 3.5. Ensaio do poder calorífico superior. ....	33
Tabela 3.6. Diferença entre consumo médio de misturas e B2. ....	36
Tabela 4.1. Especificações do InfraSpec™ VFA-IR Spectrometer. ....	42
Tabela 4.2. Especificações do motor Rugerrini 191 Lombardini Srl.....	43
Tabela 4.3. Especificações do analisador NAPRO - NA-9000.....	44
Tabela 4.4. Faixa de medição e resolução do analisador (Testo do Brasil).....	45
Tabela 4.5. Planilha para ensaios sem carga acoplada.....	47
Tabela 5.1. Dados do percentual de biodiesel etílico de banha de porco adicional ao diesel comercial.....	50
Tabela 5.2. Dados do percentual de biodiesel metílico de soja adicional ao diesel comercial.....	51
Tabela 5.3. Dados do percentual de biodiesel etílico de soja adicional ao diesel comercial.....	51
Tabela 5.4. Dados de característica físico-química para cada mistura.....	54
Tabela 5.5. Dados de opacidades para cada mistura.....	58
Tabela 5.6. Dados de massa de combustível consumido para cada mistura. ....	61
Tabela 5.7. Dados de consumo horário volumétrico (Chv) e consumo energético (Cen). ....	67
Tabela 5.8. Opacidades médias percentuais com e sem banco de resistências.....	68

Tabela 5.9. Consumos médios de combustível [kg] com e sem banco de resistências.....	68
--	----

## LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
BE	Biodiesel etílico
BM	Biodiesel metílico
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
BX	Percentual de biodiesel adicionado ao diesel
Ce	Consumo específico [ $\text{kg kWh}^{-1}$ ]
Ch	Consumo horário [ $\text{kg h}^{-1}$ ]
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVs	Compostos orgânicos voláteis
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Agência de Proteção Ambiental Americana
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de efeito estufa
HC	Hidrocarbonetos
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
IEA	Energy Information Administration
ISO	International Organization for Standardization
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
MtCO <sub>2</sub> -eq	Milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente
NBR	Norma Brasileira
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
O <sub>2</sub>	Oxigênio
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
SI	Sistema Internacional
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre

## RESUMO

LEMPEK, João Ricardo O. **Comparativo entre Biodieseis Produzidos a Partir de Diferentes Matérias-Primas e Rotas de Produção e Utilizados em Motor Estacionário**. Porto Alegre. 2016. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O presente trabalho objetiva comparar a utilização de diferentes biodieseis obtidos a partir de diferentes matérias-primas e rotas de produção em um motor ciclo diesel. Foram realizadas análises abrangendo desde as características físico-químicas dos biodieseis e suas estruturas moleculares até ensaios de opacidade, consumo e emissões de gases em motor estacionário empregado em grupo motor-gerador. Em parceria com a CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul e a empresa Bianchini S.A, foram obtidos os biodieseis produzidos a partir de óleo de soja e banha de porco, com percentual de pureza de acordo com norma da ANP. Além do diesel comum adquirido em postos de combustíveis, constituído de 7% de biodiesel já em sua composição, optou-se pela utilização de misturas com 20%, 25%, 30% e 50% adicionado ao diesel, além do biodiesel puro (100%). Os ensaios foram realizados em um motor ciclo diesel da marca Ruggerini, modelo 191, com potência nominal de 13 kW, instrumentado com equipamento analisador de gases e de opacidade a fim de obter dados de emissões de gases de escapamento. Foram analisados gases como óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) e monóxido de nitrogênio (NO), além de  $\text{O}_2$  (oxigênio) e  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre) e os resultados comparados com referencial teórico publicado anteriormente. Os resultados demonstraram que a mistura mais favorável e que apresentou o melhor comportamento em termos de opacidade foi o B100 de soja metílico; em relação ao consumo, obtendo valores iguais, foram os B20, B25 e B30 de soja etílica e para o comportamento das emissões o que foi mais favorável foi o B25 de soja pela rota metílica, apesar da pouca diferença com as outras misturas estudadas.

Palavras-Chaves: Matéria-Prima, Biodiesel, Conteúdo Energético, Desempenho de Motor, Gases Poluentes.

## ABSTRACT

LEMPEK, João Ricardo O. **Comparison of Biodiesels Produced from Different Raw Materials and Production Routes Used in Stationary Engine.** Porto Alegre. 2016. Dissertation. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

This study aims to compare the use of different biodiesels produced from different raw materials and production routes in a stationary diesel cycle engine. Physical and chemical analyses were performed on biodiesels, their molecular structures were determined, as well as opacity, consumption and emissions in stationary engine used in motor-generator group were analyzed. In cooperation with CIENTEC - Foundation for Science and Technology of Rio Grande do Sul and Bianchini S.A Company, biodiesels were produced from soybean oil and tallow, with purity percentage according to ANP standard. In addition to the commercial diesel purchased at gas stations, consisting of 7% biodiesel already in its composition, it was used blends with 20%, 25%, 30% and 50% diesel-biodiesel, as well as pure biodiesel (100%). Tests were performed on a diesel stationary engine, Ruggerini, 191 model, with nominal power of 13 kW, instrumented with a gas analyzer and an opacimeter on the exhaust system. Gases such as nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ), carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ), carbon monoxide ( $\text{CO}$ ) and nitrogen monoxide ( $\text{NO}$ ), as well as  $\text{O}_2$  (oxygen) and  $\text{SO}_2$  (sulfur dioxide) were analyzed, and the results were compared with theoretical works previously published. The results showed that the most favorable blend and showed a better behavior in terms of opacity was the methyl soybean B100; in relation to consumption, obtaining equal values, were the B20, B25 and B30 ethyl soybean and the behavior of the emissions who was more favorable was the soybean B25 by methyl route despite little difference with the other studied blends.

Key-Words: Raw Material, Biodiesel, Energy Content, Engine Performance, Gas Pollutants.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

Os recursos naturais e as fontes de energia são indispensáveis para o desenvolvimento da sociedade humana como um todo, e principalmente das atividades industriais. A busca por fontes de energia cada vez menos poluidoras provindas de recursos renováveis vem crescendo, e isto possibilita um futuro com a possível substituição do petróleo e do carvão mineral, o que contribui substancialmente para a conservação do meio ambiente considerando as propriedades destes compostos e sua origem não fóssil.

Hoje existe uma linha de pesquisadores engajados com a preocupação ambiental cada vez maior, haja vista as mudanças nas legislações voltadas para a energia, combustíveis e emissões, que estão cada vez mais rígidas e criando limites para conservação dos recursos energéticos.

O Brasil é detentor da maior capacidade de produção de energias alternativas dentre os demais países do mundo, devido principalmente à abundância dos seus recursos naturais e extensão territorial. Porém, o Brasil consegue produzir apenas 90% do total de energia que consome, importando o restante. Segundo dados do Relatório de Síntese do Balanço Energético Nacional de 2012, o total de energia demandada no Brasil teve um crescimento de 4,1%, atingindo 283,6 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) (EPE, 2012), o que demonstra valores expressivos segundo a pesquisa e provoca uma necessidade de maior produção para suprir a demanda do país. No tocante ao potencial energético das reservas brasileiras mostrado em função dos tipos de combustíveis, conforme Figura 1.1, percebe-se o importante espaço que estes têm pela sua crescente produção e o

momento oportuno em que as energias alternativas se encontram atualmente (BNEF, 2013).

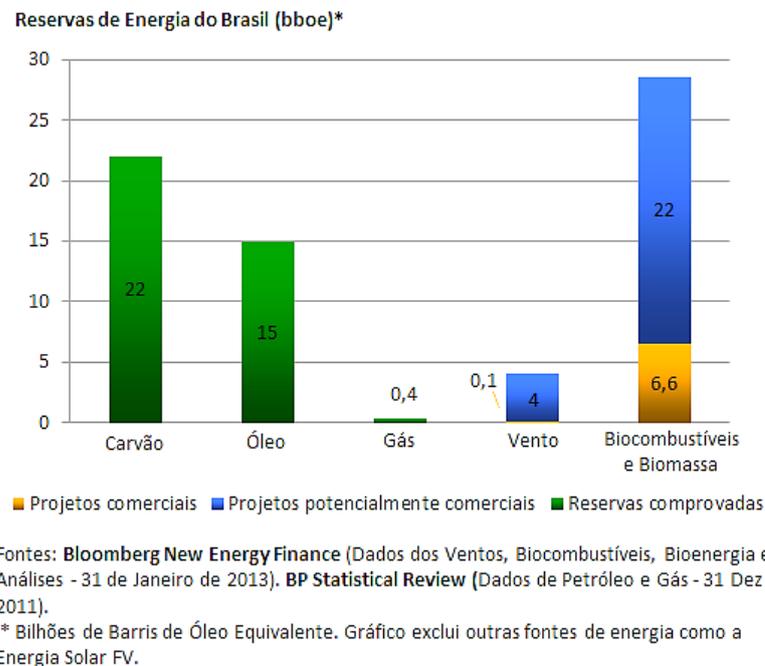


Figura 1.1. Reservas de energia do Brasil. (Fonte: BNEF, 2013).

Atualmente é evidente a preocupação mundial no que diz respeito às fontes de energia de origem fóssil, já que estas se encontram na natureza em quantidades limitadas e se extinguem com a utilização, além de não poderem ser regeneradas em curto prazo de tempo. Outro dado relevante disponibilizado pela *Energy Information Administration* (IEA, 2012) foi o alcance do patamar de 429 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO<sub>2</sub>-eq) emitidos à atmosfera no ano de 2012, e a caracterização do setor dos transportes como principal agente emissor deste. Com estes dados, estudiosos quantificam a capacidade de destruição ao meio ambiente causada pela emissão de gases poluentes, principalmente os causadores do efeito estufa e das chuvas ácidas, além da consequente diminuição da qualidade de vida aos seres vivos que se apresenta crescente.

Desde 1997, o Protocolo de Kyoto determina que os países desenvolvidos assinantes deste reduzam suas emissões de gases de efeito estufa em 5,2 %, em média, relativas ao ano de 1990, no período de 2008 até o ano de 2012. Porém,

segundo dados de 2012 do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP, 2012), os países que mais emitiram dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), em milhões de toneladas, neste ano foram a China (9.208,05 Mt), os EUA (5.786,13 Mt) e em menor quantidade a Índia (1.823,24Mt), o que revela um impasse, já que um país não assinante do protocolo, os EUA, figura como o segundo maior emissor. O Brasil teve uma taxa de emissão por volta de (500,49 Mt) representando a maior emissão das Américas do Sul e Central. Diante deste cenário, a utilização de energias de origem não fóssil cresceu bastante no mundo, e no Brasil, a partir da assinatura da carta de ratificação do protocolo de Kyoto em 23 de julho de 2002, sendo objeto propulsor de pesquisas e, conseqüentemente, do crescimento industrial e tecnológico.

Com a Lei Nº 11.097, de 13/01/2005 (LEI DIRETO, 2015), o Governo Brasileiro implantou a utilização da mistura diesel-biodiesel, introduzindo o biodiesel na matriz energética nacional. Inicialmente com a mistura B2 até o final de 2007, que se tornou obrigatória em 2008 e, entre 2008 e 2013, foi implantada a comercialização de misturas com 5% de biodiesel. Atualmente, desde novembro de 2014, onde houve a última atualização até então, o B7 passou a ser obrigatório.

O biodiesel possui características muito interessantes no que se refere a sua biodegradabilidade, é renovável, faz parte da cadeia do carbono e possui semelhanças com o diesel, o que propicia sua utilização em motores a combustão, sendo assim considerado um combustível “limpo” e de grande potencial. Ele é obtido, dentre outras formas, pelo processo de transesterificação de triglicerídeos junto à álcoois, podendo ser eles etanol ou metanol (BIODIESELBR, 2013).

A utilização de etanol, principalmente no Brasil, pela sua capacidade territorial e característica de solo e clima é bastante propícia principalmente pela utilização da cana de açúcar que auxilia a redução de emissões prejudiciais à camada de ozônio, possui baixa toxicidade, além de poder ser nomeado como realmente renovável.

Já o metanol, mais poluente quando vem da produção e extração do petróleo por ter origem fóssil, é o álcool mais utilizado na produção do biodiesel atualmente.

Outra vantagem atribuída ao biodiesel é a sua capacidade de mistura em qualquer proporção ao diesel sem perder padrões de qualidade exigidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural, e Biocombustível (ANP), conforme citado na Lei brasileira Nº 11.097, de 13/01/2005 já mencionada anteriormente. Isto atribui ao biodiesel a não necessidade de modificações mecânicas quando da sua utilização em motores de combustão interna pertencentes ao ciclo diesel (BIODIESELBR, 2013).

A queima de combustíveis em motores a combustão interna ocorre gerando calor vindo de reações químicas entre a mistura comburente-combustível. A utilização de biodiesel comparada ao diesel resulta em uma diminuição de fuligem emitida, esperada pela maior presença de átomos de oxigênio na sua composição elementar. Em contrapartida, a presença de hidrocarbonetos de alta massa molar causada pelo aumento da fração orgânica do biodiesel quando não queimado, pode ocasionar depósitos na câmara de combustão. Com isso, coloca-se a viscosidade e o teor de resíduos de carbono como principais agentes neste aumento na formação de depósitos na combustão do biodiesel (NASCIMENTO, 2014).

## **1.2. Motivação**

Baseado nos problemas encontrados hoje no Brasil como, por exemplo, a baixa oferta de energia comparada à demanda e as emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente, vem se tendo um aumento do uso das energias renováveis e com isso tem-se o uso de biodiesel como uma alternativa aos combustíveis para geração de energia. Diante deste panorama, visto que, na produção de biodiesel pode-se mitigar uma série de impactos além de produzir um combustível provindo de fonte renovável, não fóssil, vê-se um interesse em se estudar minuciosamente as diferentes misturas possíveis de diesel- biodiesel a fim de se entender e mapear seu comportamento.

Neste contexto, este trabalho vem motivado a apresentar um estudo mais aprofundado dos combustíveis biodieseis produzidos a partir de óleo de soja e banha de porco abrangendo desde suas diferentes composições químicas até

estudos energéticos relativos a cada um, a fim de se obter características importantes como desempenho, consumo, eficiência, emissões de poluentes e opacidades, auxiliando assim no estudo da mitigação dos impactos ambientais.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

O trabalho está estruturado da seguinte forma. No Capítulo 1 é apresentada uma introdução do assunto, abordando os principais aspectos relacionados aos problemas energéticos e ambientais, bem como as soluções empregadas atualmente e a motivação para o desenvolvimento do presente trabalho. No Capítulo 2 são apresentados os objetivos geral e específico. No Capítulo 3 são discutidas informações relatadas na literatura específica, e no Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos empregados na parte experimental. O Capítulo 5 destina-se a apresentação e discussão dos resultados, finalizando com as conclusões no Capítulo 6, propostas para trabalhos futuros no Capítulo 7 e referências bibliográficas no Capítulo 8.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral consiste na análise comparativa de biodieseis obtidos a partir de diferentes matérias-primas, como óleo de soja e banha de porco, e rotas de produção, como a metílica e a etílica, em motor ciclo diesel, utilizando além do biodiesel puro (100%), misturas com percentuais de 7%, 20%, 25%, 30% e 50% de biodiesel adicionado ao diesel comercial.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos o trabalho apresenta:

- Estudar o comportamento das opacidades, consumos e emissões dos combustíveis analisados em grupo motor-gerador, para as misturas percentuais nas proporções 7%, 20%, 25%, 30% e 50% de diesel- biodiesel, além de 100% de biodiesel;
- Mapear o consumo energético de cada biocombustível afim de melhor compreender as mudanças de comportamentos quando da adição de biodiesel ao diesel;
- Estudar o comportamento do óleo de soja e da banha de porco na produção e uso do biodiesel produzido e a possível influência das rotas etílica e metílica nesta utilização;
- Comparar as condições de ensaios sem banco e com banco de resistências.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica abordando alguns conceitos básicos, as diferentes matérias-primas para produção, as possíveis rotas de produção de biodiesel, análises físico-químicas fundamentais das misturas de biodiesel, as normas e leis envolvidas, um comparativo com balanços de massa e térmicos realizados em outros trabalhos e, por fim, o estado da arte divulgado em periódicos.

#### **3.1. Conceitos Básicos**

Inicialmente, faz-se necessária a definição de alguns conceitos inseridos no contexto, além dos que serão trabalhados ao longo da dissertação, para melhor esclarecimento do tema.

##### **3.1.1. Ciclo Diesel**

Em meados de 1893, em Augsburg-Alemanha, foi criado por Rudolf Diesel o primeiro motor “tipo diesel” movido inicialmente a óleo de amendoim, um biocombustível natural. Desta forma, Rudolf já mostrava a sua intenção de introduzir cada vez mais os óleos vegetais na produção de combustíveis (BIODIESELBR, 2013).

O ciclo Diesel é um processo de combustão interna, aplicado a motores por compressão, de mistura de ar-combustível. O ar é admitido na câmara de combustão, o pistão faz a compressão dessa massa de ar e ao fim da compressão é injetado o combustível, sob pressão, no interior da câmara. Devido à alta temperatura e pressão no interior da câmara, a mistura entra em combustão,

ocorrendo a expansão dos gases que finalmente são liberados pelas válvulas de escape, reiniciando todo processo e fechando o ciclo.

A grande diferença entre os motores de ciclo Diesel e os de ciclo Otto está no que diz respeito a queima, em que no ciclo Otto existe a utilização de velas como queimadores e no ciclo Diesel não existe. Outra principal diferença está no fato de que no ciclo Diesel apenas o ar é comprimido, favorecendo o aumento da taxa de compressão do motor, o que não ocorre no ciclo Otto onde a compressão ocorre à mistura de ar e combustível na câmara de combustão. A utilização de biodiesel em motores segue o ciclo Diesel, portanto, suas características e metodologia de funcionamento.

Os motores tipo diesel estacionários são em termos gerais máquinas térmicas alternativas, de combustão interna, destinadas ao suprimento de energia mecânica ou força motriz de acionamento de máquinas estacionárias, tais como geradores, máquinas de solda, bombas e outras máquinas que operem com rotação constante.

### **3.1.2. Biodiesel**

O Biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, podendo estas, serem oleaginosas como a soja, mamona, girassol, dentre outras ou também a partir de gorduras animais, como por exemplo, o sebo bovino e a banha de porco. A transformação destes óleos e gorduras em biocombustíveis pode ser realizada por diversos processos, como o craqueamento, a esterificação ou principalmente pela transesterificação. Segundo a *National Biodiesel Board* dos Estados Unidos o biodiesel foi definido como: “derivado monoalquil éster de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de fontes renováveis como óleos vegetais ou gordura animal” (IBICT, 2015).

O processo de transesterificação, também conhecida como alcoólise, consiste na reação entre um éster e um álcool, com formação de outro éster e outro álcool conforme ilustra a Figura 3.1.

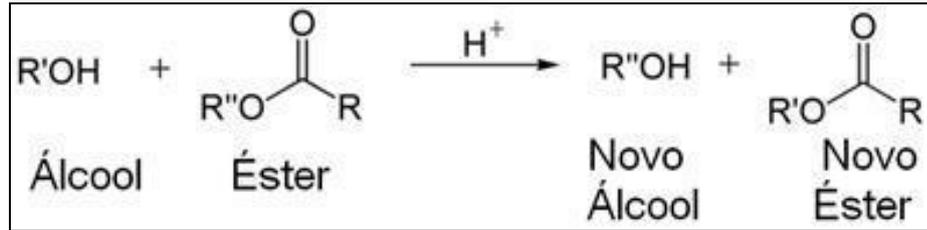


Figura 3.1. Reação de transesterificação (Fonte: MENEGHETTI, 2013).

As misturas de diesel-biodiesel são nomeadas com o prefixo B, seguido do numeral correspondente ao percentual de biodiesel adicionado a mistura (“BX”) ou quando apenas biodiesel está presente (“B100”).

O biodiesel por ser um combustível renovável e de fonte não fóssil é muito interessante, pois reduz bastante a quantidade de emissões prejudiciais de gases como CO e SO<sub>x</sub>, encontrados por exemplo no diesel de origem fóssil, reduzindo assim drasticamente a poluição do ar.

Em sua produção, a pureza do biodiesel depende de fatores como composição e origem da matéria-prima e também das condições do processo de produção como tempo, temperatura, quantidade de água e de ácidos graxos livres, quantidade de álcool presente, etc. Além disso, quanto maior for a presença de mono-, di-, e triglicerídeos, maior será a viscosidade de biodiesel, reduzindo o efeito spray na injeção conseqüentemente, por exemplo (FONTOURA, 2013-a).

Outro dado importante, conforme o Ministério do Meio Ambiente do Brasil (EPE, 2015) é que a substituição do diesel por biodiesel pode proporcionar também uma série de benefícios à saúde, como a melhoria da qualidade do ar das cidades, onde cerca de R\$ 192 milhões anuais seriam economizados (considerando as dez principais cidades brasileiras) e aproximadamente R\$ 873 milhões (considerando todo território brasileiro) no setor de saúde.

O biodiesel também faz parte do ciclo do carbono onde o CO<sub>2</sub> é consumido enquanto há o crescimento da planta e é liberado no momento da utilização do biodiesel na combustão do motor, ao contrário dos combustíveis fósseis que são encontrados em bacias sedimentares e formados pela decomposição de matéria

orgânica. Esse processo leva milhões de anos e uma vez esgotadas essas formações, não haverá tempo suficiente para que elas sejam repostas em escala de vida humana, por isso é possível dizer que a matriz energética atual não é sustentável. Diante disso, um problema figura um dos principais vilões na questão meio ambiente, que é a mudança na forma de pensar e principalmente na utilização das reservas naturais brasileiras. Fato é que os combustíveis fósseis continuarão a representar por volta de 80% do consumo mundial de energia até o ano de 2040. O uso do carvão continuará crescente mais que do petróleo até depois de 2030, principalmente por causa do aumento da demanda causada pela China e dos altos preços do petróleo que provavelmente se manterão (IEA, 2013).

Algumas vantagens do uso de biodiesel é que este possui características muito semelhantes ao combustível diesel e algumas até superiores, o que facilita a sua possível substituição na matriz energética. Possui elevado ponto de fulgor que compete ao biocombustível maior segurança no seu manuseio, transporte e armazenagem; alto poder de lubrificação que promove a formação de uma camada limite ao metal assim protegendo-o contra desgastes, o que não ocorre ao diesel que necessita de alto valor de enxofre na mistura para tal função, contradizendo a legislação atual que limita o percentual de enxofre no combustível; a não necessidade de adaptação do motor para utilização do combustível; o fato de ser biodegradável e então poder ser decomposto pela ação de organismos vivos e pelo meio ambiente; o fato de ser constituído de fonte renovável e de origem não fóssil, assim não modificando o ecossistema ao seu redor nem desbalanceando a quantidade de gases presentes na atmosfera atual (GOES, 2009).

Não o bastante, é importante ressaltar a redução da emissão de gases poluentes, causadores de efeito estufa e de chuvas ácidas, já que estes óleos possuem em sua formação, cadeias lineares e pouco material proteico, proporcionando uma queima mais completa e a diminuição da emissão de CO e óxidos de enxofre, por exemplo (GUARIERO, 2011). Conforme resultados de pesquisa do Balanço de Emissões de CO<sub>2</sub> por Biocombustíveis no Brasil para a EMBRAPA em 2009, fica evidente a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> quando da utilização de biodiesel em lugar ao diesel, conforme Figura 3.2. Segundo pesquisa, entre 2005 e 2011 foram consumidos mais de 8 bilhões de litros de biodiesel

evitando assim a emissão de 16 mega toneladas de CO<sub>2</sub> a atmosfera caso o diesel fosse utilizado (GAZZONI, 2009).

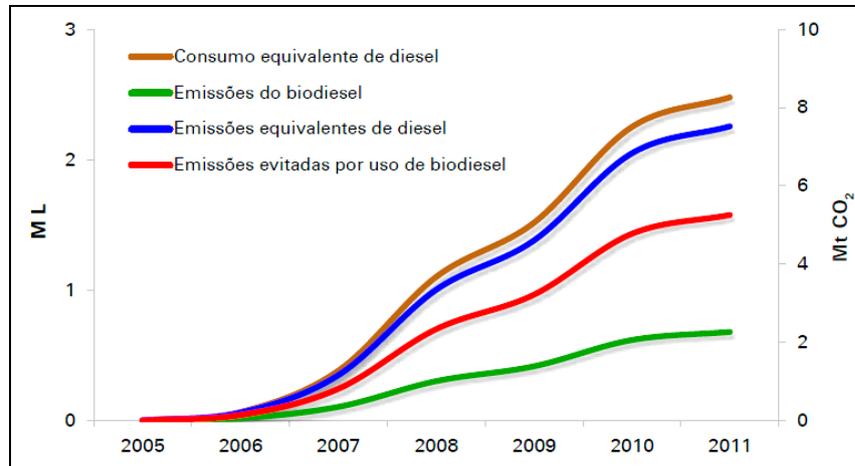


Figura 3.2. Emissões de CO<sub>2</sub> para biodiesel comparado ao diesel (Fonte: EMBRAPA, 2012).

No que diz respeito a pontos negativos do biodiesel relativos às características físico-químicas, tem-se a baixa estabilidade à oxidação; a facilidade de degradação causada pela fácil absorção de água prejudica a durabilidade e a qualidade do biocombustível, e a dificuldade do uso do biodiesel em regiões frias pelo baixo ponto de névoa o que leva a cristalização de parafinas e, portanto entupimento das tubulações e filtros de combustível de um sistema a combustão interna (ALVES, 2010).

No quesito emissões, existem indicações de aumento de gases relacionados aos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), porém há pesquisas já em andamento atuando na criação de catalisadores tecnologicamente modificados para a retenção destes gases, além de modificações nos tempos de ignição dos motores, temperaturas e pressões relativas ao processo, o que influencia diretamente na formação dos NO<sub>x</sub> (BIODIESELBR, 2013).

### 3.1.2.1. Matérias-Primas

O Brasil é um país de dimensões geográficas imensas, de terra fértil e clima propício ao plantio e criação de animais, portanto, figura como grande detentor de uma hegemonia na produção de oleaginosas e biomassa para fins energéticos,

dentre estes, pode-se citar a soja como principal protagonista atualmente, além do dendê, pinhão manso, canola, girassol e outros também de origem animal, como o sebo bovino, a banha de porco e o olho de peixe atuam como figuras na produção de biodieseis atualmente. A produção de biocombustíveis está muito dependente dos aspectos econômicos e locais, como o clima, a demanda e a produtividade. Além disso, está diretamente ligado ao preço das variadas matérias-primas (Figura 3.3), portanto, varia em função da época do ano e local.

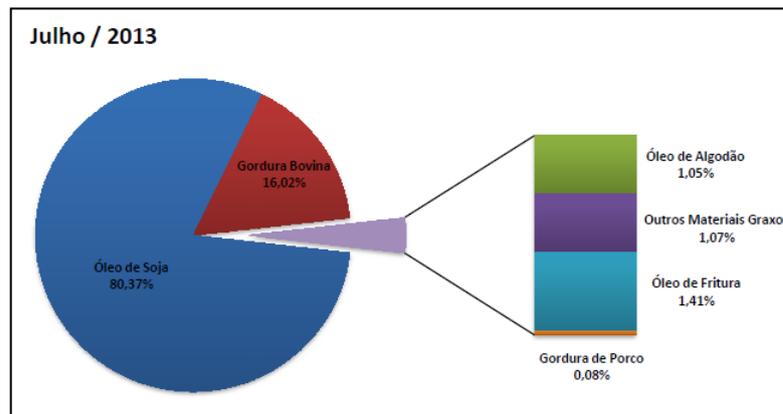


Figura 3.3. Produção de biodiesel x matérias-primas (Fonte: ANP, 2013).

Na produção de biodiesel são encontrados ésteres de ácidos graxos e glicerol (triglicerídeos). Os ácidos graxos podem ser insaturados ou saturados a depender de sua origem, respectivamente, óleos e gorduras vegetais ou gorduras animais (FIORESE, 2011).

Em seu estudo, (DANTAS, 2010), afirma que gorduras animais (sebo bovino, óleo de peixe, óleo de mocotó e a banha de porco) possui estrutura química semelhante à dos óleos vegetais, diferenciando apenas na distribuição e nos tipos dos ácidos graxos confirmando, portanto, a viabilidade da utilização de gordura animal na produção de biodiesel.

Segundo (CEMIG, 2012) a soja configura a principal matéria-prima utilizada na produção de biodiesel no Brasil, tomando cerca de 80% do mercado de óleo produzido e sendo o país com a segunda maior produção dessa oleaginosa. Apesar do papel importante da soja o autor afirma que o óleo é subproduto, pois a chamada

torta proteica serve de alimento para animais e já possui cadeia produtiva organizada e tecnologia bem desenvolvida.

Anteriormente, um estudo realizado por GOES (2010) ressalta alguns óleos e gorduras animais, principalmente, a participação da soja e da banha de porco, na produção de biocombustíveis, com 73% e 4,6% respectivamente, conforme visto em Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Óleos vegetais e gorduras animais no Brasil, 2009, em mil toneladas.

<b>Produto</b>	<b>Produção</b>	<b>Importação</b>	<b>Oferta</b>	<b>Part. %</b>
Óleo de soja	6.258	90	6.348	73,3
Sebo e gordura animal	598	6	604	7,0
Banha de porco	394	-	394	4,6
Óleo de palma	215	143	358	4,1
Óleo de algodão	278	-	278	3,2
Óleo de girassol	50	20	70	0,8
Óleo de colza	59	9	68	0,8
Óleo de mamona	56	8	64	0,7
Outros óleos vegetais	366	106	472	5,5
<b>Total</b>	<b>8.274</b>	<b>382</b>	<b>8.656</b>	<b>100,0</b>

Fonte: (GOES, 2010).

Uma visão mais específica, voltada para estruturas moleculares das cadeias foi estudada por (ALVES, 2010) onde afirma que tanto as insaturações quanto o tamanho da molécula interferem não só na produção do biodiesel como nas propriedades físico-químicas do combustível final. Quanto maior for a cadeia, molécula, melhores as condições da combustão desse combustível e maior a lubrificidade do mesmo. Porém, cadeias grandes demais configuram maior ponto de névoa o que em regiões mais frias ou épocas do ano frias contribui para seu uso ser dificultado por causar entupimentos e formar borras. Já em relação às insaturações o autor afirma que quanto maior a sua quantidade favorece também a maior ponto de nevoa e melhor combustão, porém sem afirmar com precisão, escreve que em quantidades exagerada causa uma instabilidade química ao combustível deixando sensível à oxidação e conseqüentemente comprometendo seu armazenamento e transporte. Por fim o autor conclui que tanto os ésteres provenientes de ácidos graxos saturados (láurico, palmítico) como os poli-insaturados (linolênico, linoléico) apresentam características indesejáveis, então, os combustíveis que possuem

maiores quantidade de ácidos graxos combinados mono-insaturados, como o oléico e ricinoléico são então os mais desejados.

ALVES (2010) também cita algumas características negativas inerentes à produção de biodieseis, como a necessidade de aumento plantações em grandes áreas agrícolas que causa desmatamento indiscriminado de florestas em países que não fiscalizam adequadamente sua flora. Além disso, o aumento dos preços causados pelo uso maior de grãos para a produção do biodiesel assim podendo interferir na cadeia alimentar e no bolso do homem inclusive.

### 3.1.2.2. Rotas de Produção e Propriedades Físico-Químicas

Segundo o trabalho publicado por NASCIMENTO (2014), a Tabela 3.2 apresenta alguns dos resultados encontrados nas análises físico-químicas feitas nos biocombustíveis produzidos por rota metílica (BM) e etílica (BE).

Tabela 3.2. Caracterização físico-química do biodiesel.

<b>Propriedade (Unidade)</b>	<b>BM</b>	<b>BE</b>
Aspecto a 25°C	LII	LII
Índice de Acidez (mg KOH g <sup>-1</sup> )	0,46	0,38
Teor de Éster (%)	99,8	99,1
Viscosidade Cinamática (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	3,8	4,2
Poder Calorífico Superior (MJ kg <sup>-1</sup> )	39,7	39,8
Resíduo de Carbono (%)	0,013	0,029

Fonte: (NASCIMENTO, 2014).

É possível identificar na Tabela 3.2 um aumento nas propriedades como viscosidade, poder calorífico e resíduo de carbono causado por um aumento da cadeia carbônica, quando do comparativo entre o BM e o BE. O autor escreve que o aumento da cadeia carbônica, quando se compara os ésteres metílicos com os ésteres etílicos, influenciam diversas propriedades, como a viscosidade, o poder calorífico e o resíduo de carbono. LII representa um combustível límpido e isento de impurezas ou materiais em suspensão.

Segundo a pesquisa, o aumento da viscosidade não representa um problema, já que se encontra dentro da tolerância exigida pela ANP, não exigindo modificações

mecânicas nas bombas de injeção. Porém, o estudo revela que cadeias com maiores áreas superficiais permitem maiores interações intermoleculares e cita as forças de Van der Waals, mais intensas, sendo principais protagonistas nas propriedades físico-químicas dos biocombustíveis. Já quanto aos poderes caloríficos, o crescimento é esperado, devido ao fato que no biodiesel possui apenas ésteres, onde há uma maior quantidade de ligações C–O e estes carbonos já estão parcialmente oxidados ao contrário do diesel, além que o etanol possui um carbono a mais em sua cadeia que o metanol passível de oxidação.

Para os resíduos de carbono, o estudo apresenta a justificativa da possibilidade de menor volatilidade e, assim, uma maior dificuldade na formação de voláteis no processo de pirólise. Enquanto alguns estudos justificam o aumento no conteúdo de várias impurezas, como os ácidos graxos livres, mono- di- e triglicérides, juntamente com o resíduo de carbono, outros descrevem que o resíduo de carbono aumenta quando da diminuição da glicerina total presente no combustível (NASCIMENTO, 2014). Anteriormente, em seus estudos, DANTAS (2010), confirma que as alterações na viscosidade e densidade, ocorrem por causa do aumento no número de insaturações e das conformações cis (*Z*) nas cadeias dos ácidos graxos, como o ácido oléico, linoléico e linolênico. Com um foco mais qualitativo, ENCARNAÇÃO (2008), mostra em seus estudos as vantagens do etanol sobre o metanol, como por exemplo, auto-suficiência, baixa toxidez e maior compatibilidade com materiais, Tabela 3.3.

O autor afirma que a melhor combustão dos ésteres etílicos é derivada de possuírem um carbono a mais na molécula e, portanto, maior número de cetano em relação aos ésteres metílicos, no entanto, o metanol é o álcool mais utilizado pelo seu baixo custo e por reagir mais rapidamente no processo de produção do biodiesel ocasionando em economia de energia inclusive.

Segundo NASCIMENTO (2014), o metanol é mundialmente o álcool mais utilizado na produção de biodiesel, mas o fato de este ser obtido de origem fóssil torna a rota de produção com este álcool não sustentável totalmente. O autor cita vantagens para o etanol como a baixa toxicidade junto com a grande disponibilidade

de matéria-prima, além de que o biodiesel quando produzido com etanol provindo de biomassa é dito combustível totalmente renovável.

Tabela 3.3 – Vantagens do etanol sobre o metanol.

<b>Características</b>	<b>Etanol</b>	<b>Metanol</b>
Auto-suficiência	Sim	Não
Dispêndio de divisas com importação	Não	Sim
Geração de empregos no país	Muitos	Poucos
Impacto na cadeia produtiva	Grande	Pequeno
Disponibilidade onde são produzidos	Sim	Limitada
Tecnologia de transesterificação dominada	Sim	Sim
Potencial de exportação da tecnologia	Sim	Não
Toxidez	Moderada	Elevada
Compatibilidade com materiais	Maior	Menor
Impacto em caso de acidentes	Baixo	Alto
Renovável	Sim	Não
Viabilidade econômica comparativa	Equivalente	Equivalente

Fonte: (ENCARNAÇÃO, 2008).

Cada combustível ou mistura tem qualidades e propriedades físico-químicas inerentes à sua composição e aos tipos de hidrocarbonetos que o formam, portanto, possuem diferenças, sendo estas importantes para sua reação de combustão, rendimento, emissões conforme Tabela 3.4, onde x representa a quantidade de carbono na cadeia e y a posição da ligação dupla, conforme equação C<sub>x</sub>:y na primeira linha da tabela.

Tabela 3.4. Teor de ésteres graxos no biodiesel (%).

<b>Biodiesel</b>	<b>C14:0</b>	<b>C16:0</b>	<b>C16:1</b>	<b>C17:0</b>	<b>C18:0</b>	<b>C18:1</b>	<b>C18:2</b>	<b>C18:3</b>	<b>Outros</b>
Uva	0,0	7,1	0,1	0,0	3,4	20,9	66,0	0,6	2,0
Soja	0,1	10,5	0,1	0,0	2,0	24,9	53,4	4,6	4,6
Arroz	0,2	21,3	0,1	0,0	1,2	36,7	37,2	1,2	2,1
Canola	0,1	4,8	0,2	0,0	1,3	64,5	20,9	5,2	3,0
Milho	0,0	11,9	0,1	0,0	1,2	35,9	49,3	0,0	1,6
Palma	0,9	41,6	0,1	0,1	3,2	41,5	12,0	0,2	0,5
Girassol	0,1	6,6	0,1	0,0	2,9	33,8	55,0	0,2	1,4
Amendoim	0,1	8,3	0,0	0,0	0,5	62,4	21,9	0,7	6,1
Oliva	0,4	18,4	4,8	0,0	4,8	34,4	31,7	3,8	1,8
Pequi	0,1	37,1	1,4	0,0	0,7	57,8	1,7	0,2	1,0
Banha	1,3	22,6	3,5	0,5	9,2	41,8	17,4	0,5	3,2
Sebo	3,2	25,2	3,6	1,2	15,7	42,0	0,8	0,6	7,6

Fonte: (OLIVEIRA, 2013).

Algumas composições elementares e propriedades principais serão descritas e explanadas melhor a seguir.

#### a) Teor de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio

Em geral, os combustíveis líquidos são compostos de hidrogênio, carbono e nitrogênio, independentemente de sua origem fóssil ou não. O percentual destes elementos é de fundamental importância para a quantificação do poder calorífico do combustível. O percentual de carbono é da ordem de 80 a 85% e o poder calorífico é de da grandeza de  $8140 \text{ kcal kg}^{-1}$ . O hidrogênio tem em média um poder calorífico de  $28700 \text{ kcal kg}^{-1}$ , com um percentual da ordem de 10 a 15% dos combustíveis. Já o nitrogênio está presente em percentual quase que irrelevante entre 0 e 0,06% (TEXEIRA, 2010).

#### b) Massa Específica

Em motores pertencentes ao ciclo diesel esta propriedade é fundamental já que o sistema de injeção trabalha com medidas volumétricas e representa a massa de determinado combustível por unidade de volume a uma determinada temperatura e pressão específica. A massa específica de um combustível influencia no aumento de potência e também na sua opacidade e está ligada à sua estrutura molecular sendo maior quanto maior for a quantidade de ésteres graxos e menor quanto menor for a contaminação por álcool ou impurezas (FONTOURA, 2013-b).

Quanto maior o comprimento da cadeia carbônica maior será a densidade e conseqüentemente sua massa específica, já com relação ao número de insaturações o comportamento inverso é observado. Segundo a norma brasileira da ABNT NBR 7148:14 (NBR, 2014), o biodiesel deve ter massa específica entre 850 e  $900 \text{ kg m}^{-3}$ . Esta relação entre o desempenho ao qual o combustível pode fornecer ao motor e a densidade deste combustível é dada de forma diretamente proporcional, assim, quanto maior o poder calorífico, mais alta é a densidade e conseqüentemente maior o aparecimento de material particulado, já o contrário causa perda de desempenho do motor.

Em seus resultados, NASCIMENTO (2014), encontrou que a massa específica do diesel apresentou um valor igual a  $834,8 \text{ kg m}^{-3}$ , estando dentro da norma e mostra que, em um motor, a massa de combustível injetada será portanto a mais próxima da ideal possível, o que ajudaria na mitigação de poluentes, e cita os hidrocarbonetos, monóxido de carbono e material particulado com principais.

#### c) Viscosidade Cinemática

A viscosidade cinemática descreve a resistência de um fluido ao escoamento e tem como unidade o centiStoke (cSt) dada a sua magnitude, mas também é utilizada no SI (Sistema Internacional) em  $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Pode ser representada também pela viscosidade dinâmica dividida pela massa específica do fluido (KENKEL, 2003).

Uma alta viscosidade afeta a atomização do combustível quando da sua injeção na câmara de combustão, o que contribui para uma combustão incompleta e a consequente formação de depósitos no motor, além de perda de potência e aumento de consumo de combustível. Já a baixa viscosidade tende a dificultar a penetração do combustível na câmara de combustão, reduzindo a potência e rendimento, além do baixo poder de lubrificação causar desgastes aos componentes do sistema de combustível (KNOTHE, 2006).

#### d) Poder Calorífico

É representado pela quantidade de calor liberado na combustão de uma unidade de volume ou massa e tem como unidade no SI o  $\text{J kg}^{-1}$ . Pode ser representado pelo PCS (poder calorífico superior) que é dado pela energia liberada na forma de calor mais a energia gasta na vaporização da água na oxidação do combustível, ou também pelo PCI (poder calorífico inferior) que leva em consideração apenas a energia liberada na forma de calor.

Segundo JULIATO (2006), existe uma correlação direta entre poder calorífico e massa específica dos combustíveis. Em motores tipo diesel, com volume constante da bomba de combustível, e considerando volumes constantes de injeção, quanto maior a densidade do combustível, maior será seu poder calorífico,

portanto, maior será a presença de materiais particulados, enquanto menores densidades ocasionariam em perdas de desempenho do motor.

Para análise de eficiência em motores, sem o auxílio de turbo compressor, usa-se como base o poder calorífico inferior, uma vez que normalmente a água sai como vapor nos gases de exaustão.

O hidrogênio presente no combustível forma água quando queimado, já que a maioria dos combustíveis são misturas de hidrocarbonetos. O poder calorífico irá ser diferente caso a água presente na queima esteja no estado líquido ou no estado de vapor.

Uma forma mais prática e que obtém informações mais realistas do poder calorífico do combustível é através de ensaios dos combustíveis em calorímetros. Em ensaio do poder calorífico de realizado por SOTO (2006), foram encontrados valores de PCS de algumas amostras de combustíveis conforme Tabela 3.5, onde é possível verificar uma diminuição do poder calorífico quando do aumento do percentual de biodiesel adicionado à mistura.

Tabela 3.5. Ensaio do poder calorífico superior.

Combustíveis	PCS (MJ kg <sup>-1</sup> )			
	1	2	3	Média
Etanol 92,6 GL	27,44	26,33	27,27	27,01
Gasolina sem Etanol	42,43	43,64	43,77	43,28
Gasolina + 24% Etanol Anidro	39,54	35,12	38,09	37,58
<i>Diesel</i>	45,03	45,05	44,91	44,99
<i>Biodiesel (Soja)</i>	39,49	39,29	39,64	39,47
<i>Diesel 90% + Biodiesel 10%</i>	44,15	44,32	44,18	44,22
D-Limoneno	44,58	44,48	44,83	44,63
Etanol 85% + D-Limon 15%	28,59	29,28	28,33	28,90

Fonte: (SOTO, 2006).

Segundo *Bosch Automotive Handbook* (Bosch, 2006), as misturas B20 podem apresentar até 1,73% de queda em relação ao diesel comum quando se compara os poderes caloríficos, enquanto que no biodiesel puro (B100) este valor pode decair em até 8,65% (NBB, 2006).

### 3.1.3. Normas e Leis

O uso do biodiesel no Brasil foi legalmente respaldado pela Lei nº 11.097/2005. Complementarmente, a Lei nº 9.478/1997 cita em seu Capítulo I os princípios e objetivos relativos à política energética nacional, dentre eles:

“(…)

IV – proteger o meio ambiente e promover a conservação de energia;

(…)

XVIII - mitigar as emissões de gases causadores de efeito estufa e de poluentes nos setores de energia e de transportes, inclusive com o uso de biocombustíveis”.  
(RELATÓRIO DE BENEFÍCIOS DO BIODIESEL, 2013).

A Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) é um dos órgãos mundiais responsáveis pelo estudo e estabelecimento de normas para proteção do meio ambiente. Ela define os critérios de poluentes do ar como: o ozônio, material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre e chumbo.

No Brasil, existe o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que é o órgão que estabelece, entre outros itens, os limites legais de emissões veiculares. A primeira resolução do programa que entrou em vigor no Brasil para estabelecer os limites de emissões no país foi a resolução CONAMA nº18, de 6 de maio de 1986.

### 3.2. Consumos Específicos ( $C_e$ )

O conhecimento do consumo específico do motor é de fundamental importância para que se conheça a capacidade de transformação da energia química do combustível em trabalho útil. Se faz necessário o conhecimento então do consumo horário, para determinação, sob carga constante, do consumo específico.

O consumo horário ( $C_h$ ) é dado por:

$$C_h = \text{massa} / \text{tempo} \quad [\text{kg h}^{-1}] \quad (1)$$

A massa é dada pelo produto do volume pela sua densidade:

$$m = \text{volume} \times \text{densidade} \quad [\text{kg}] \quad (2)$$

Então, diante do consumo horário, massa e potência do motor pode-se calcular o consumo específico, que é dado por:

$$C_e = \text{massa} / (\text{potência} \times \text{tempo}) \quad [\text{kg kWh}^{-1}] \quad (3)$$

JULIATO (2006) analisou o consumo específico de diferentes misturas de biodiesel adicionado ao diesel e verificou o aumento deste consumo proporcionalmente à adição de biodiesel na mistura, além de comparar em tabela o percentual de variação do consumo obtido em seus ensaios, conforme Figura 3.4 e Tabela 3.6.

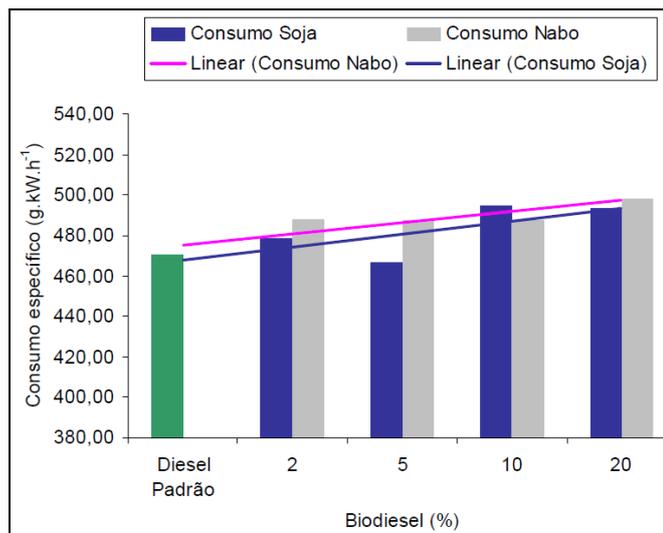


Figura 3.4. Consumo específico por misturas BX (Fonte: JULIATO, 2006)

Tabela 3.6. Diferença entre consumo médio de misturas e B2.

DIFERENÇAS (%)							
SOJA				NABO			
B2	B5	B10	B20	B2	B5	B10	B20
1,75	-0,88	5,19	4,98	3,80	3,62	3,68	5,92

Fonte: (JULIATO, 2006).

KALAM (2002) em seu trabalho conclui que em relação ao consumo específico dos combustíveis, é maior se o motor for abastecido com a mistura biodiesel comparando ao diesel puro. Isto ocorre porque o consumo específico de combustível está diretamente relacionado ao poder calorífico do combustível, e o poder calorífico do biodiesel é menor que o do óleo diesel puro, portanto, necessitando de maior quantidade de massa de combustível do que o óleo diesel comercial.

### 3.3. Emissões de Gases

O limite de emissões vem diminuindo cada vez mais e os órgãos responsáveis ficando mais rigorosos. Com isso, os fabricantes de veículos, de combustíveis e fornecedores de componentes tem se unido, juntamente com a comunidade acadêmica e científica, na busca de soluções mais eficientes para o cumprimento das legislações.

Outro fator importante sobre as emissões é seu efeito sobre a saúde das pessoas, pois essas partículas soltas no ar podem penetrar nos pulmões e na corrente sanguínea, causando doenças cardíacas, câncer de pulmão, asma e outras infecções respiratórias.

Em uma reação de combustão completa, os compostos resultantes da combustão são o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (normalmente em vapor) e o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), sendo o gás carbônico o agente preocupante do ponto de vista ambiental, já que causa impactos relativos ao efeito estufa e aquecimento global. Todavia, outros gases também são formados na combustão como o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ), além de compostos orgânicos voláteis (COVs) e hidrocarbonetos (HC),

JOVÍLSON et al. (2007) realizaram testes com um motor diesel estacionário Agrale-M85 para análise de emissões de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>, este abastecido com quatro misturas de combustíveis diferentes (diesel comum, B2, B5 e B10) com biodiesel produzido a partir de palma. Observou-se que os níveis de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e CO aumentaram em função do aumento da carga do gerador acoplado ao motor. Já em relação aos NO<sub>x</sub> e aos consumos específicos, acontece exatamente o contrário. A partir de 50% de plena carga a emissão NO<sub>x</sub> e o consumo específico diminuem à medida que a carga aumenta.

Em seu estudo, SALDIVA (2012) defende que as emissões de materiais particulados são os principais responsáveis pelas mortes de pessoas por problemas respiratórios. Conforme o autor, internações em hospitais, consultas médicas, perda de dias de trabalho, sintomas respiratórios diversos, necessidade de uso constante de medicamentos e outros problemas também devem ser contabilizados quando se discute sobre emissões.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente do Brasil, a substituição do diesel por biodiesel pode proporcionar também uma série de benefícios à saúde, como a melhoria da qualidade do ar das cidades, onde cerca de R\$ 192 milhões anuais seriam economizados (considerando as dez principais cidades brasileiras) e aproximadamente R\$ 873 milhões (considerando todo território brasileiro) no setor de saúde. Outra estimativa comenta que uma redução de 10% na poluição atmosférica da cidade de São Paulo entre 2000 e 2020, por exemplo, causaria 114 mil mortes a menos, seriam 250 mil visitas médicas evitadas e milhões de disfunções respiratórias mitigadas. Com base nesses valores, apura-se que seriam economizados, ainda, cerca de US\$ 10 bilhões de dólares.

Em 2006, RAKOPOULOS et al. (2006) realizaram estudos com misturas B10 e B20 de biodiesel de algodão, soja, girassol, palma além de óleos vegetais in natura de milho e semente de azeitonas em motor diesel monocilíndrico comparadas ao diesel comum. Resultados evidenciaram emissões de CO e NO<sub>x</sub> com pequena redução utilizando misturas B10 e B20 de óleo vegetal e misturas B10 e B20 de biodiesel, se comparadas as emissões com utilização de diesel convencional. Já as emissões de CO utilizando misturas com óleos de origem

vegetal mostraram comportamento inverso. Com relação ao consumo específico, os testes apontam um leve aumento tanto quando da utilização de óleos de origem vegetal quanto de biodiesel.

Em sua maioria, estudos de emissões do  $\text{NO}_x$  mostram aumento quando se utiliza combustível de origem vegetal (LAPUERTA, 2008). Porém estudos com biodiesel de palma evidenciaram uma diminuição nas emissões de  $\text{NO}_x$  conforme KALAM (2002). Esta diferença pode ser explicada segundo autor pela diferença de temperatura no interior do cilindro no momento da combustão, onde a temperatura dos gases de escapamento proveniente do biodiesel foi menor do que a temperatura dos gases de escapamento provenientes do diesel comercial.

### **3.4. Conteúdo Energético**

A quantidade de energia consumida por um motor através do que foi gerado de energia pelo combustível multiplicado pelo tempo de utilização deste representa o consumo energético do motor, geralmente apresentado em unidade de energia dividido por unidade de tempo ( $\text{MJ h}^{-1}$ ). Esta análise não leva em consideração as perdas nem a potência efetiva do sistema e representa, em termos gerais, a eficiência térmica do motor.

Em seus resultados, FIORESE (2011) concluiu que o aumento da proporção de biodiesel ao diesel foi favorável ao aumento do rendimento térmico do motor, tendo o B100 como o combustível de maior eficiência, já que teve menor quantidade de energia e, portanto, menor consumo energético. A Figura 3.5 mostra a redução deste consumo com o aumento da mistura biodiesel para rotações de testes de 1900 rpm e 2000 rpm.

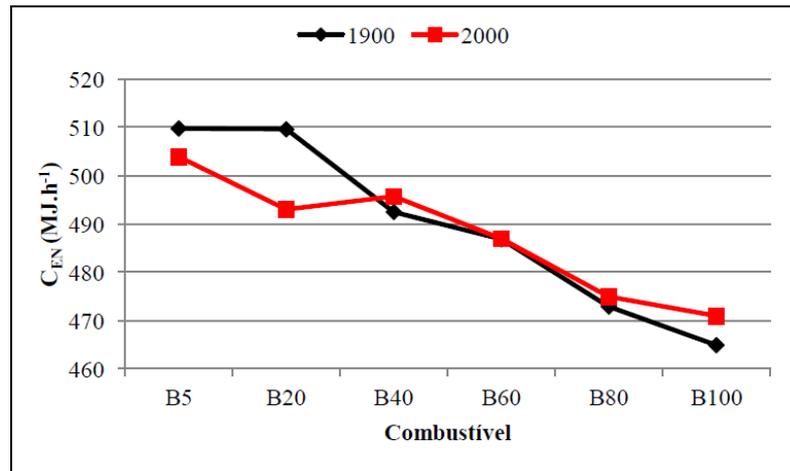


Figura 3.5. Consumo energético por misturas BX para rotações fixas (Fonte: FIORESE, 2011).

Outro fator importante no cálculo do consumo energético, além das características do combustível como poder calorífico inferior e massa específica (densidade) é o consumo horário volumétrico. Em seu trabalho, FIORESE (2011), mostra o aumento do consumo horário volumétrico com o aumento da mistura biodiesel para as misturas ensaiadas, conforme Figura 3.6.

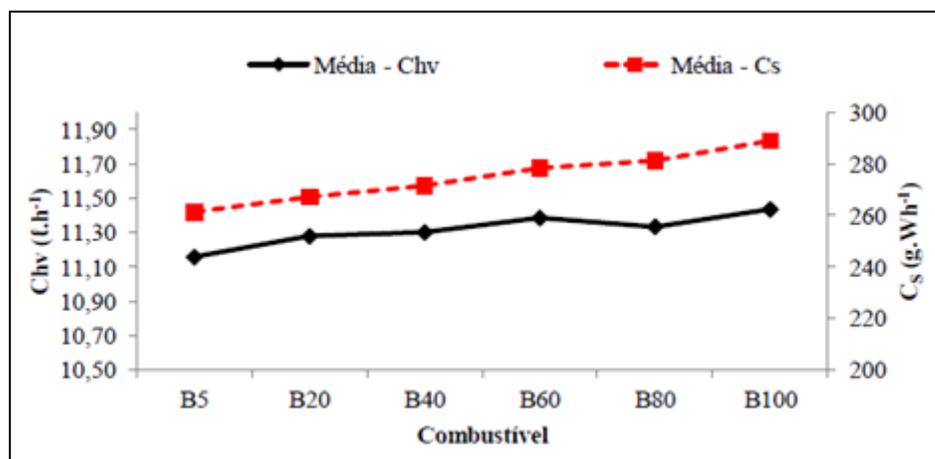


Figura 3.6. Consumo horário médio por mistura BX (Fonte: FIORESE, 2011).

Segundo testes realizados por SORANSO (2008), o consumo horário volumétrico aumentou 15,5%, conforme Figura 3.7, onde pode-se observar aumento crescente do consumo horário volumétrico com o acréscimo da porcentagem de biodiesel no diesel.

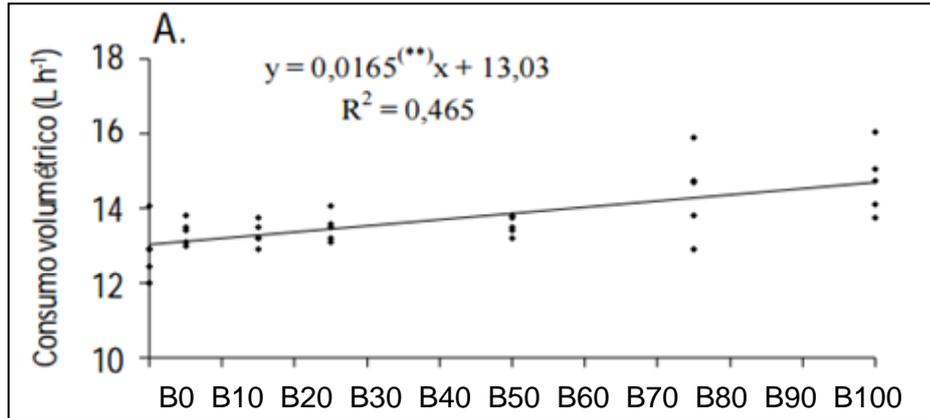


Figura 3.7. Consumo horário volumétrico por mistura BX (Fonte: SORANSO, 2008).

Para resultados de TABILE (2008), o diesel puro apresentou menor consumo e observou-se que, no aumento da proporção de biodiesel, não houve diferença significativa até B25, e acima disso houve considerável aumento de consumo, chegando a 14,6% a diferença global entre B0 e B100, conforme Figura 3.8.

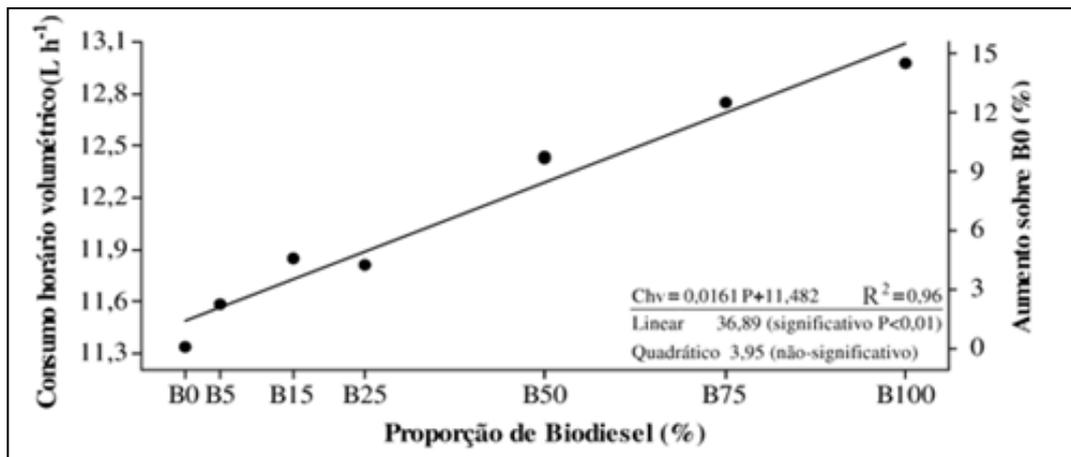


Figura 3.8. Consumo horário volumétrico por mistura BX (Fonte: TABILE, 2008).

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia aplicada neste trabalho está subdividida em etapas, detalhadas ao decorrer deste tópico.

### **4.1. Aquisição de Biodiesel, Percentual de Pureza e Percentual de Biodiesel nas Misturas**

Inicialmente foram adquiridos os biodieseis B7 (S10 - diesel comercial de posto de combustível Shell); B100 – SOJA (Metílico e Etílico) e B100 – BANHA DE PORCO (Etílico). A produção dos biodieseis por rota etílica foi realizada em parceria com a CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul. Já o biodiesel de soja por rota metílica foi doado pela empresa Bianchini S.A, produtora de biodiesel no Rio Grande do Sul.

Toda produção foi realizada seguindo normas ANP, onde se exige um percentual mínimo de pureza dos biocombustíveis de 96,5% de pureza, conforme norma europeia EN14103-2003 e Resolução nº7 de 2008 publicada pela ANP. As análises de pureza consistiram no percentual de ésteres convertido na produção do biodiesel e foi realizada pela CIENTEC.

### **4.2. Análise Química das Misturas**

Além do diesel comum adquirido em postos de combustíveis, constituído de 7 % de biodiesel já em sua composição, optou-se pela utilização de misturas com 20%, 25%, 30% e 50%, além de 100% de biodiesel, para todos os combustíveis utilizados no teste (soja etílico, soja metílico e banha de porco etílico). Foram então preparadas amostras (Figura 4.1) para serem analisadas quimicamente, em parceria

com a CIENTEC em seu Departamento de Química – Laboratório de Ensaio em Combustíveis, quanto à composição química elementar (CHN Total) seguindo metodologia conforme Norma ASTM D5291-2010: Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio (combustão da amostra com detecção por infravermelho e condutividade térmica), utilizando instrumental da marca LECO Corporation, modelo TruSpecCHN. As massas específicas (densidades) foram determinadas de acordo com as normas ASTM1298-12b, ABNT NBR 7148:14, ASTM D4052-11 e ABNT NBR 14065:2013. Os poderes caloríficos inferior e superior dos biocombustíveis foram normalizados por ASTM D5865-13: por bomba calorimétrica isoperibol.

O Laboratório de Química Industrial da PUCRS auxiliou na confirmação do percentual de biodiesel presente no diesel (BX). As análises de percentual das misturas foram realizadas em um espectrômetro de infravermelho da marca InfraSpec™ VFA-IR Spectrometer, Modelo EB, da Wilks Enterprise Inc. O equipamento opera na faixa de infravermelho médio, e consiste em uma fonte modulada eletronicamente juntamente com um filtro de variável linear (LVF- *Linear Variable Filter*) e conjunto detector de pixel, sendo o equipamento brevemente detalhado na Tabela 4.1.



Figura 4.1. Misturas separadas para análises químicas.

Tabela 4.1. Especificações do InfraSpec™ VFA-IR Spectrometer.

Parâmetros	Especificação
Alimentação	9V DC, 2,0 amps
Temperatura de Operação (°C)	15 – 60
Range do Detector	128 pixels linear
Range do Espectro (µm)	5,5 - 11
Resolução Nominal (cm <sup>-1</sup> )	14
Cristal ATR	ZnSe

Fonte: (<http://www.spectrosci.com>)

### 4.3. Grupo Motor-Gerador e Medições de Opacidade, Consumo e Emissões

Para os testes foi utilizado um grupo motor-gerador da marca Ruggerini, modelo Lombardini Srl 191, 2 cilindros, taxa de compressão 19:1, com potência máxima nominal de 13 kW a 3600 rpm, de acordo com informações do fabricante (Figura 4.2). Dados de torque máximo nominal não foram fornecidos no manual técnico do motor. Sua configuração é mostrada na Tabela 4.2.



Figura 4.2. Grupo motor-gerador (Ruggerini 191 Lombardini Srl).

Tabela 4.2. Especificações do motor Ruggerini 191 Lombardini Srl.

<b>Informações Técnicas</b>	
Modelo do Motor	191 estacionário diesel 4 tempos
Cilindros	2 refrigerados a ar
Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	851
Diâmetro cilindro X Curso pistão (mm)	85 X 75
Sistema de Combustão	Injeção direta
Potência Máxima	13 kW (50cv) @ 3600 rpm
Torque Máximo	-

Fonte: (Manual do motor).

Acoplado às tubulações de escapamento de gases, foi utilizado um analisador de opacidade de fluxo parcial controlado por microprocessador e de diagnóstico automático, da marca NAPRO, modelo NA-9000, com medições segundo norma NBR 13037 / 12897 e CONAMA 418, com especificações conforme Tabela 4.3 e Figura 4.3.

Tabela 4.3. Especificações do analisador NAPRO - NA-9000.

<b>Informações Técnicas</b>	
Opacidade	0 - 99,9%
Coefficiente de Absorção de luz K	0 - 9,99 m-1
Precisão	+/- 2 %
Resolução	0,1 %
Fluxo	Parcial
Temperatura da câmara	75 °C nominal
Comprimento do feixe	430 mm (eq.)
Tempo de resposta	0,9 - 1,1s
Tensão de alimentação	12 VDC / 110 VAC
Temperatura ambiente de funcionamento	5 – 400 °C
Umidade ambiente de funcionamento	0 - 95%
Frequência	50 / 60 Hz
Potência	400W

Fonte: (Manual de instruções NAPRO).



Figura 4.3. Opacímetro NAPRO - NA-9000 (Fonte: NAPRO).

O consumo de combustível foi determinado em função da sua massa antes e depois dos testes, com auxílio de balança de pesagem, sendo determinado em massa por tempo. Foi utilizado um tanque de combustível de 5 L, localizado sobre a balança, com precisão de 0,001 kg.

A jusante do processo, as emissões foram processadas por aparelho analisador de gases da marca Testo, modelo XL 350 (Figura 4.4) com aquisição de dados por computador via porta USB. O analisador de gases possui capacidade para análise de sete tipos de gases por vez e foram utilizadas células para análise dos gases oxigênio (O<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio total (NO<sub>x</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e monóxido de nitrogênio (NO) por reação eletroquímica. Já o método de não-difração foi utilizado para a célula de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Toda aquisição dos gases foi através de sonda instalada na tubulação de escapamento. O aparelho também fornece

informações de temperaturas de saída dos gases de escapamento para cada mistura. As faixas de medição e resolução do analisador são mostradas na Tabela 4.4.



Figura 4.4. Analisador de gases Testo XL 350 (Fonte: TESTO).

Tabela 4.4. Faixa de medição e resolução do analisador (Testo do Brasil).

Parâmetro de medição	Faixa de Medição	Resolução
O <sub>2</sub>	0...25vol.%	0,01vol.%
CO	0...10000ppm	1ppm
NO	0...4000ppm	1ppm
NO <sub>2</sub>	0...500ppm	0,1ppm
SO <sub>2</sub>	0...5000ppm	1ppm
CO <sub>2</sub>	0...50vol.%	0,01Vol.% (0...25Vol.%) 0,1Vol.% (> 25Vol.%)
NO <sub>x</sub>	0...3000ppm	2ppm (0...39,9ppm) 5 ppm (40...1999,9ppm) 10 ppm (2000...3000ppm)

Fonte: (Manual de Instruções Testo XL 350).

A visão global dos ensaios pode ser visualizada na Figura 4.5, onde é possível observar todos os equipamentos, formando o sistema de ensaios.

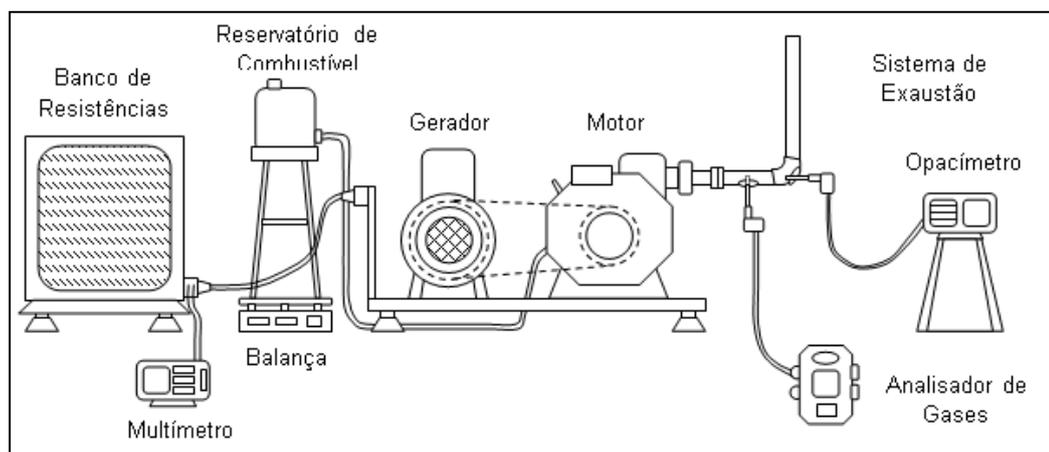


Figura 4.5. Diagrama esquemático de testes (Fonte: De Paulo, 2016).

#### 4.4. Metodologia, Planilhas e Condições de Realização dos Ensaios

Foram elaboradas planilhas de testes (Tabela 4.5) baseada em metodologia própria, pois não existe metodologia normalizada para tais tipos de testes em grupo motor-gerador. Os testes seguiram o seguinte passo-a-passo para todas as misturas B7, B20, B25, B30, B50 e B100 de todos os combustíveis produzidos de soja metílico, soja etílico e banha de porco etílico:

1. Preparar misturas combustíveis (5 litros cada);
2. Verificar (óleo / cabos / bateria) do motor;
3. Ligar (motor / computador / analisador de gases / opacímetro);
4. Aquecer motor em baixa rotação por 300 segundos (até 80 °C);
5. Estabilizar em rotação máxima por 300 segundos (3600 rpm);
6. Zerar balança;
7. Ensaio de 600 segundos:
  - 7.1. Acionar analisador / opacímetro;
  - 7.2. Anotar medidas iniciais conforme Tabela 4.5;
  - 7.3. Anotar medidas finais;
  - 7.4. Baixar rotação e desligar motor;
  - 7.5. Limpar sistema com B7 (funcionar 60 segundos);
  - 7.6. Realizar limpeza do opacímetro e analisador de gases;
  - 7.7. Trocar misturas combustíveis (abastecer reservatório);
  - 7.8. Repetir a partir do passo 4.

Tabela 4.5. Planilha para ensaios sem carga acoplada.

DADOS RELATIVOS À -> MISTURAS - CONSUMO - OPACIDADE - POTÊNCIA										Nº	
Gerador -> <b>XXX</b>					Data - / /		<b>METODOLOGIA ADAPTADA</b> <b>NORMA XXX</b> <b># S/ BANCO DE RESISTÊNCIAS #</b> <b>(SEM CARGA)</b>				
PARÂMETROS					Início	Fim					
Pressão Barométrica (mmHg)											
Umidade Relativa do Ar (%)											
Temperatura Ar Ambiente (°C)											
Misturas	RPM		Consumo		Opacidade		Horários Teste		Tensão	Corrente	Potência
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim			
B7 Ref.									-	-	-
<b>BANHA DE PORCO ETÍLICO</b>											
B20									-	-	-
B25									-	-	-
B30									-	-	-
B50									-	-	-
B100									-	-	-
<b>SOJA ETÍLICO</b>											
B20									-	-	-
B25									-	-	-
B30									-	-	-
B50									-	-	-
B100									-	-	-
<b>SOJA METÍLICO</b>											
B20									-	-	-
B25									-	-	-
B30									-	-	-
B50									-	-	-
B100									-	-	-

#### 4.4.1. Local de Execução do Ensaio

Todos os ensaios práticos foram realizados no Laboratório de Motores e Combustíveis Alternativos – LMCA da PUCRS em sala dinamométrica, onde foi possível adaptar todos os equipamentos de aquisição de dados, além do motor e a tubulação de escapamento de gases do motor. Neste ambiente foi possível monitorar parâmetros como a pressão barométrica atmosférica, umidade relativa do ar, temperatura do ar, temperatura do cabeçote do motor, além de dados quantitativos relativos aos gases de escapamento para cada mistura utilizada. Já os ensaios químicos foram realizados junto ao Laboratório de Química da PUCRS.

#### 4.4.2. Medidas Preliminares

Inicialmente foram observados a potencialidade e estado do grupo motor-gerador utilizado nos testes, verificado a possibilidade de realização dos testes em local próprio, preparada todas as misturas percentuais para cada biocombustível e

feita adaptação do motor em sala de ensaio. Em testes, a aquisição de dados apenas era realizada na temperatura e rotação ideal do motor e anotados todos parâmetros das condições ambiente.

#### 4.4.3. Medidas Preventivas

Alguns procedimentos foram adotados para minimizar desvios nos resultados, dentro da possibilidade instrumental e logística encontrada e quantidade de combustíveis disponível. O ensaio era repetido e resultados descartados em caso de alguma avaria ou pane dos aparelhos além de, antes dos ensaios, serem realizada limpezas do sistema de combustível do motor e dos aparelhos de opacidade e emissões de gases.

Por fim, foram analisados os dados coletados e passados a uma planilha em formato Excel para melhor entendimento e compilação de dados, além da produção dos gráficos comparativos para todos os dados coletados nos ensaios.

#### 4.5. Consumo Energético

O consumo energético foi obtido através de dados de testes químicos dos combustíveis para valores de poder calorífico inferior e massa específica e aplicados em equação descrita e utilizada em seus ensaios por (FIORESE, 2011). Esta foi a equação base para as análises dos diferentes biocombustíveis quando em uso no grupo motor-gerador, conforme apresentada a seguir:

$$C_{EN} = Chv * \rho * PCI \quad (4)$$

onde:

$C_{EN}$  = Consumo Energético [ $\text{MJ h}^{-1}$ ];

$Chv$  = Consumo Horário Volumétrico [ $\text{L h}^{-1}$ ];

$\rho$  = Massa Específica do Combustível [ $\text{kg L}^{-1}$ ];

$PCI$  = Poder Calorífico Inferior [ $\text{MJ kg}^{-1}$ ].

#### 4.6. Ensaio com Banco de Resistência

Os ensaios com banco de resistência, carga acoplada ao grupo motor-gerador, foram realizados a fim de reproduzir outra condição real de funcionamento do motor para análise de opacidade, consumo e emissões para o biodiesel de banha de porco por rota etílica.

Foram realizados ensaios com um banco composto por 09 resistências gerando uma carga elétrica para consumo de energia do gerador. A configuração do banco de resistência representou 80% da sua carga nominal total de consumo de energia. O gerador alimenta o banco de resistências com uma tensão de 220V e corrente de 16A, conforme pode ser visualizado na Figura 4.6.



Figura 4.6. Banco de resistências.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados referentes ao percentual de conversão na produção dos biodieseis e das misturas; análises químicas; dados de opacidade, consumo e emissões, bem como comparativos entre as diferentes matérias-primas e entre as rotas de produção de biodiesel.

### 5.1. Percentual de Pureza e Percentual de Biodiesel nas Misturas

Todos os biocombustíveis apresentaram percentual de pureza acima das tolerâncias pré-estabelecidas pela regulamentação europeia EN14103-2003 e Resolução nº7 de 2008, publicada pela ANP. Foi obtido teores acima de 99% de pureza, o que representa altíssima pureza das misturas utilizadas nos ensaios.

Os resultados dos percentuais de misturas das amostras enviadas para análise foram bastante satisfatórios, apresentando desvios padrão mínimo de 0,07 e máximo de 1,00. Estes estão expressos nas Tabelas 5.1 a 5.3 e evidenciam a média entre 10 leituras no equipamento, operando com 40 “scans” por leitura para cada matéria prima utilizada.

Tabela 5.1. Dados do percentual de biodiesel etílico de banha de porco adicional ao diesel comercial.

Teor de biodiesel em diesel (Banha de Porco)												
Amostra/ Repetição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Desvio
<b>B7-comercial</b>	6,7	6,8	6,7	6,8	6,8	6,8	6,7	6,7	6,9	6,9	<b>6,78</b>	0,079
<b>B20 etílico</b>	22,0	22,0	22	21,9	22,1	22,1	22,1	22,0	22,1	22,1	<b>22,04</b>	0,070
<b>B25 etílico</b>	26,5	26,8	26,6	26,6	26,7	26,6	26,7	26,8	26,5	26,5	<b>26,63</b>	0,116
<b>B30 etílico</b>	31,2	31,1	31,2	31,3	31,2	31,3	31,3	31,0	31,2	31,3	<b>31,21</b>	0,099
<b>B50 etílico</b>	51,3	51,3	51,2	51,5	51,1	51,1	51,1	51,5	51,5	51,5	<b>51,31</b>	0,180

Tabela 5.2. Dados do percentual de biodiesel metílico de soja adicional ao diesel comercial.

Teor de biodiesel em diesel (Soja)												
Amostra/ Repetição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Desvio
<b>B20 metílico</b>	19,9	21	21,1	21,2	19,5	20,5	21,0	21,6	21,8	20,5	<b>20,81</b>	0,720
<b>B25 metílico</b>	24,0	25,6	25,5	26,7	26,5	24,4	26,6	26,6	25,8	26,9	<b>25,86</b>	1,000
<b>B30 metílico</b>	30,0	30,9	30,7	30,7	30,8	31,0	30,6	30,7	30,7	30,7	<b>30,68</b>	0,270
<b>B50 metílico</b>	50,9	51,0	50,9	51,2	51,3	51,4	51,2	51,6	51,7	51,7	<b>51,29</b>	0,310

Tabela 5.3. Dados do percentual de biodiesel etílico de soja adicional ao diesel comercial.

Teor de biodiesel em diesel (Soja)												
Amostra/ Repetição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Desvio
<b>B20 etílico</b>	20,5	20,5	20,3	20,5	20,5	20,5	20,7	21,1	20,8	20,9	<b>20,63</b>	0,240
<b>B25 etílico</b>	24,8	24,7	24,8	24,9	25,2	25,1	24,9	24,8	25,2	24,8	<b>24,9</b>	0,190
<b>B30 etílico</b>	29,7	30,0	30,1	30,5	30,7	30,4	30,9	31,0	31,0	30,5	<b>30,48</b>	0,440
<b>B50 etílico</b>	50,0	50,4	50,0	50,3	50,2	50,2	50,1	50,0	50,6	49,9	<b>50,17</b>	0,160

Os resultados para percentuais das misturas conferem ao estudo uma garantia de exatidão dos percentuais de biodiesel adicionados ao diesel comercial.

## 5.2. Análise Química das Misturas

Os resultados obtidos para as análises químicas, separados por matérias-primas, percentuais de misturas, composição elementar - CNH total, poder calorífico superior e inferior e massa específica são mostrados nas Figuras 5.1 a 5.5 e Tabela 5.4.

### *CNH Total*

Para análise de composição elementar, é possível verificar uma diminuição do percentual de carbono no combustível com a adição de biodiesel à mistura. Já os níveis de nitrogênio apresentaram teores baixos, variando pouco. Para os percentuais de hidrogênio, obtém-se uma diminuição com o acréscimo de biodiesel adicionado ao diesel.

A análise comparativa entre matérias-primas e rotas de produção para CNH não apresentou diferenças significativas. Estas se mantiveram dentro da precisão estabelecida pelo aparelho de medição que é de 0,01% (Figura 5.1, 5.2 e 5.3).

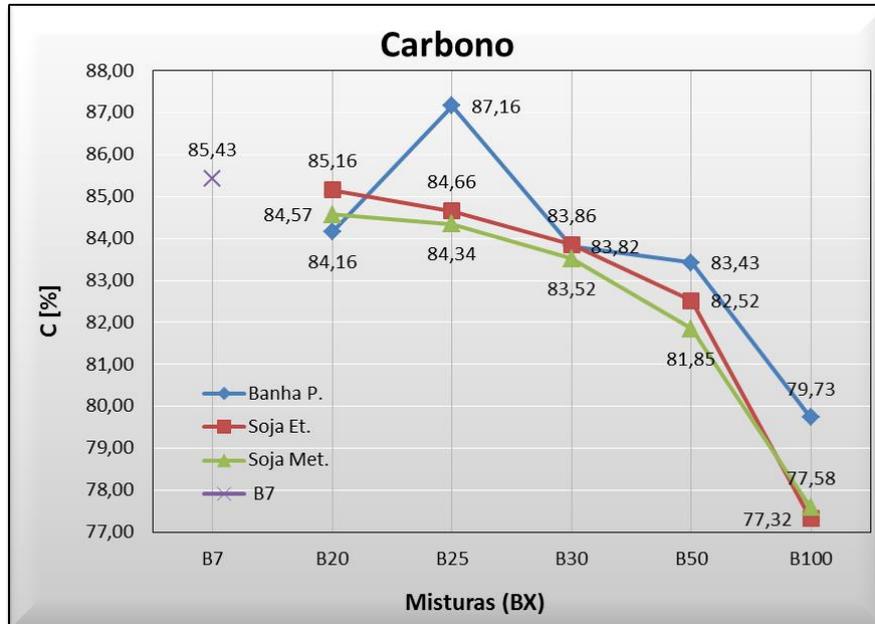


Figura 5.1. Teor de carbono para cada mistura.

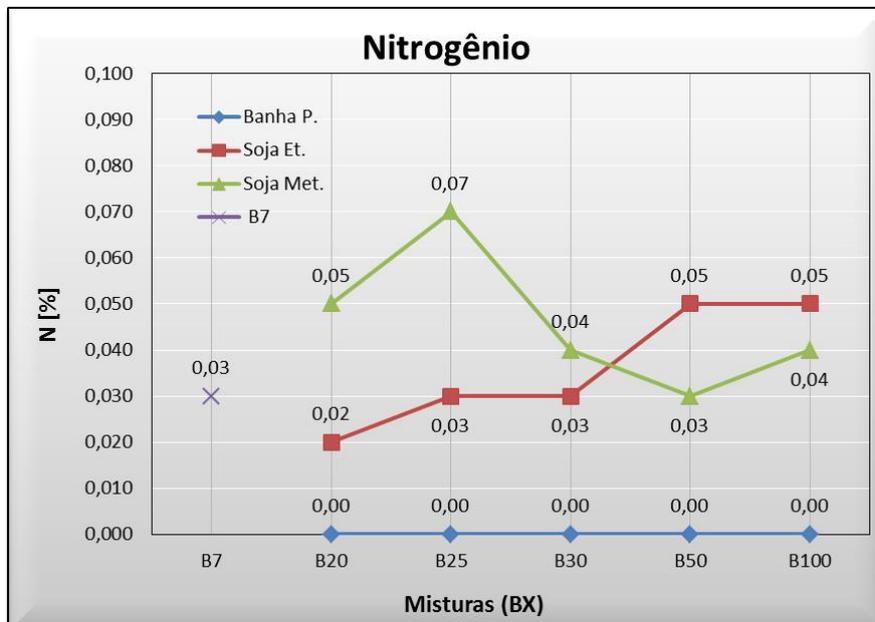


Figura 5.2. Teor de nitrogênio para cada mistura.

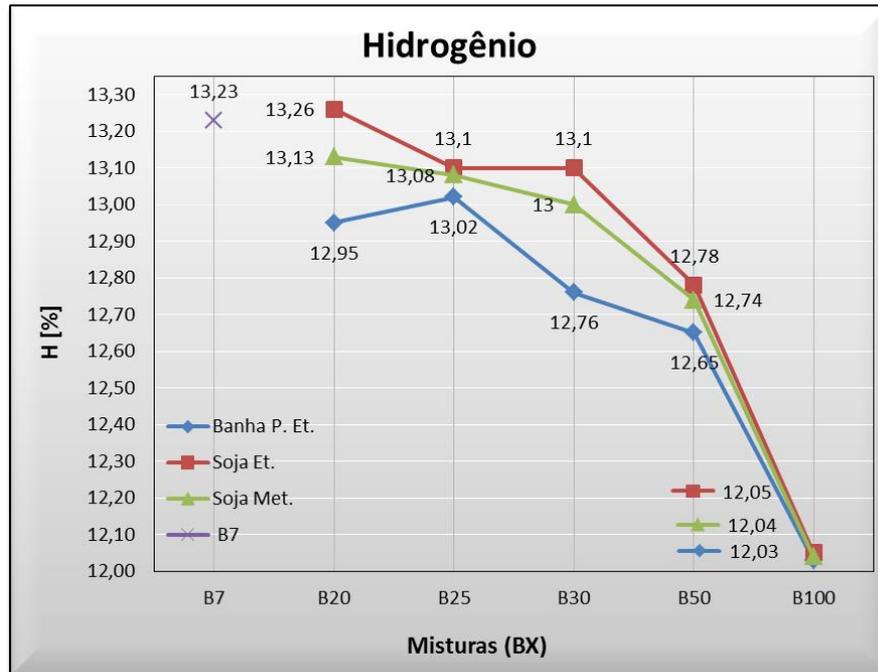


Figura 5.3. Teor de hidrogênio para cada mistura.

Os resultados encontrados para as análises de percentual de carbono, nitrogênio e hidrogênio (Tabela 5.4) confirmam dados da literatura (TEXEIRA, 2010), mantendo-se dentro dos limites conferidos aos biocombustíveis que juntamente com o percentual de oxigênio totalizam 100%, estão detalhados a seguir:

- A análise do B7 referência mostrou 85,43%C, 0,03%N e 13,23%H;

- As análises das misturas para a matéria-prima banha de porco por rota etílica mostraram valores máximos de 87,16%C e 13,02%H para o B25 e valores mínimos de 79,73%C e 12,03%H para o B100, além de não apresentarem teores de nitrogênio nas misturas. Este comportamento constatado do B25 não se repetiu para as demais matérias-primas e rotas de produção.

- As análises para soja por rota metélica mostraram valores máximos de 84,57%C e 13,13%H para o B20 e valores mínimos de 77,58%C e 12,04%H para o B100, e teores médios de nitrogênio de 0,05%;

Tabela 5.4. Dados de característica físico-química para cada mistura.

Matéria-Prima	Misturas [BX]	CNH Total [%]	Poder Calorífico [MJ kg <sup>-1</sup> ]		Massa Específica [kg m <sup>-3</sup> ]
			SUP	INF	
DIESEL REF.	B7	85,43 %C	43,84	43,64	837,2
		0,03 %N			
		13,23 %H			
BANHA DE PORCO ETÍLICO	B20	84,16 %C	44,45	41,66	840,7
		0,00 %N			
		12,95 %H			
	B25	87,16 %C	44,03	41,22	842,6
		0,00 %N			
		13,02 %H			
	B30	83,82 %C	43,86	41,12	844,2
		0,00 %N			
		12,76 %H			
	B50	83,43 %C	42,67	39,94	851,6
		0,00 %N			
		12,65 %H			
B100	79,73 %C	39,78	37,18	871,9	
	0,00 %N				
	12,03% H				
SOJA METÍLICO	B20	84,57 %C	44,36	41,54	844,3
		0,05 %N			
		13,13% H			
	B25	84,34 %C	44,01	41,18	846,6
		0,07 %N			
		13,08 %H			
	B30	83,52 %C	43,73	40,93	848,7
		0,04 %N			
		13,00 %H			
	B50	81,85 %C	42,77	40,03	858,0
		0,03 %N			
		12,74 %H			
B100	77,58 %C	39,84	37,24	881,7	
	0,04 %N				
	12,04 %H				
SOJA ETÍLICO	B20	85,16 %C	44,49	41,62	843,6
		0,02 %N			
		13,26 %H			
	B25	84,66 %C	44,28	41,45	845,2
		0,03 %N			
		13,10 %H			
	B30	83,86 %C	44,01	41,18	847,4
		0,03 %N			
		13,10 %H			
	B50	82,52 %C	42,98	40,22	854,7
		0,05 %N			
		12,78 %H			
B100	77,32 %C	40,17	37,58	876,3	
	0,05 %N				
	12,05 %H				

- Para as análises dos combustíveis de soja por rota etílica obteve-se os valores máximos com o B20 (85,16 %C e 13,26 %H) e mínimos com o B100 (77,32%C e 12,05%H), e teores médios de nitrogênio de 0,04%.

Em seus ensaios, TEXEIRA (2010), obteve para o B100: 76,98% de carbono, 0,07% de nitrogênio e 13,13% de hidrogênio, dados bem próximos (diferenças máximas menores que 7%) dos encontrados neste trabalho, conforme Tabela 5.4.

#### *Poder Calorífico*

Os valores para PCS e PCI podem ser vistos na Tabela 5.4 e representam a razão entre unidades de energia e unidade de massa ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ), e estão resumidos e listados em função da matéria-prima e rota utilizada, e comparados ao diesel referência (B7):

- Para o B7 referência obteve-se  $43,84 \text{ MJ kg}^{-1}$  e  $43,64 \text{ MJ kg}^{-1}$ , respectivamente, para PCS e PCI;
- Para a matéria-prima banha de porco por rota etílica foram obtidos valores máximos de  $44,45 \text{ MJ kg}^{-1}$  e  $41,66 \text{ MJ kg}^{-1}$  para o B20 e valores mínimos de  $39,78 \text{ MJ kg}^{-1}$  e  $37,18 \text{ MJ kg}^{-1}$  para o B100 para PCS e PCI, respectivamente;
- As análises para soja por rota metílica mostraram valores máximos de  $44,36 \text{ MJ kg}^{-1}$  e  $41,54 \text{ MJ kg}^{-1}$  para o B20 e valores mínimos de  $39,84 \text{ MJ kg}^{-1}$  e  $37,24 \text{ MJ kg}^{-1}$  para o B100, respectivamente, para PCS e PCI;
- Nas análises para soja por rota etílica obteve-se os valores máximos de  $44,49 \text{ MJ kg}^{-1}$  e  $41,62 \text{ MJ kg}^{-1}$  para o B20 e valores mínimos de  $40,17 \text{ MJ kg}^{-1}$  e  $37,58 \text{ MJ kg}^{-1}$  para o B100, para PCS e PCI.

Os resultados para poderes caloríficos mostrados na Figura 5.4 mostram um comportamento global que representa uma diminuição do poder calorífico dos biocombustíveis em função do aumento da adição de biodiesel ao diesel, independentemente do tipo de matéria-prima ou rota de produção, comportamento também verificado por NASCIMENTO (2014). Observa-se o B7 com maiores valores

nominais de PCI, e o B100 de banha de porco por rota etílica com os menores valores encontrados para PCI.

Conforme comentado anteriormente e relatado na literatura (NASCIMENTO, 2014), isso deve-se possivelmente ao biodiesel ser um éster alquílico e, portanto, conter em sua estrutura átomos de oxigênio ligados a átomos de carbono, os quais apresentam-se já parcialmente oxidados, possuindo então menores poderes caloríficos.

A observação do comportamento entre matérias-primas e rotas de produção para poderes caloríficos não apresentou diferença significativa, já que estas foram mínimas (menores que 1,1%), conforme pode ser visualizado na Figura 5.4.

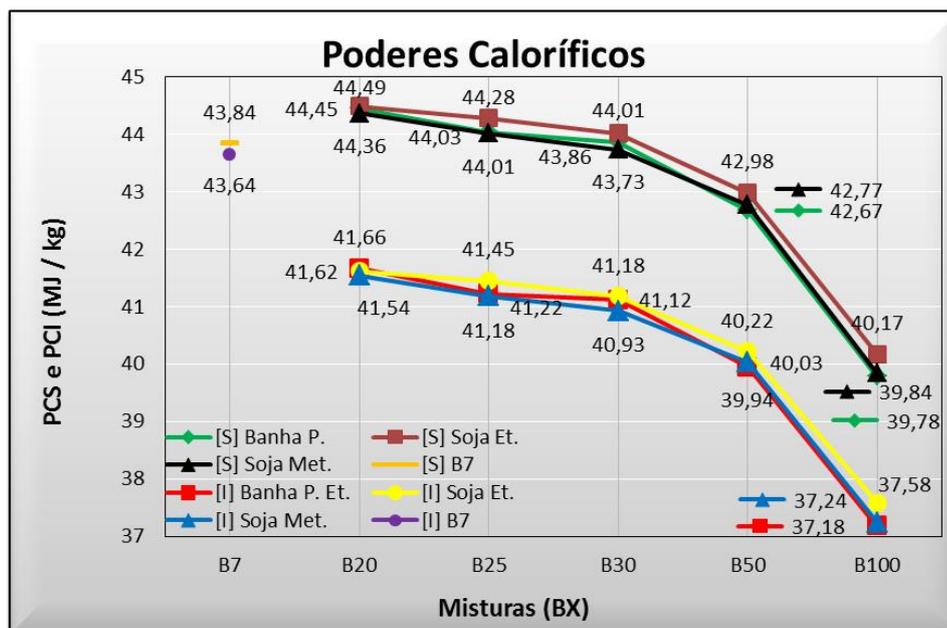


Figura 5.4. Poderes caloríficos superiores (PCS) e inferiores (PCI) para cada mistura.

### Massa Específica

A Tabela 5.4 mostra os resultados encontrados para massa específica em unidades de massa dividido por unidade de volume ( $\text{kg m}^{-3}$ ), e estão resumidos e listados a seguir em função da matéria-prima e rota utilizada e comparados ao diesel referência (B7), onde:

- Para a análise do B7 referência foi obtido valor médio de  $837,2 \text{ kg m}^{-3}$ ;

- A matéria-prima banha de porco por rota etílica mostrou valores máximos de massa específica de  $871,9 \text{ kg m}^{-3}$  para o B100 e valores mínimos de  $840,7 \text{ kg m}^{-3}$  para o B20;
- A soja por rota metílica mostrou valores máximos de  $881,7 \text{ kg m}^{-3}$  para o B100 e valores mínimos de  $844,3 \text{ kg m}^{-3}$  para o B20;
- Para as análises dos combustíveis de soja por rota etílica obteve-se os valores máximos de  $876,3 \text{ kg m}^{-3}$  para o B100 e valores mínimos de  $843,6 \text{ kg m}^{-3}$  para o B20.

A Figura 5.5 mostra o aumento da massa específica de cada mistura proporcionalmente à adição de biodiesel, evidenciando o B7 como o de menor massa específica e o B100 de soja por rota metílica o de maior massa específica.

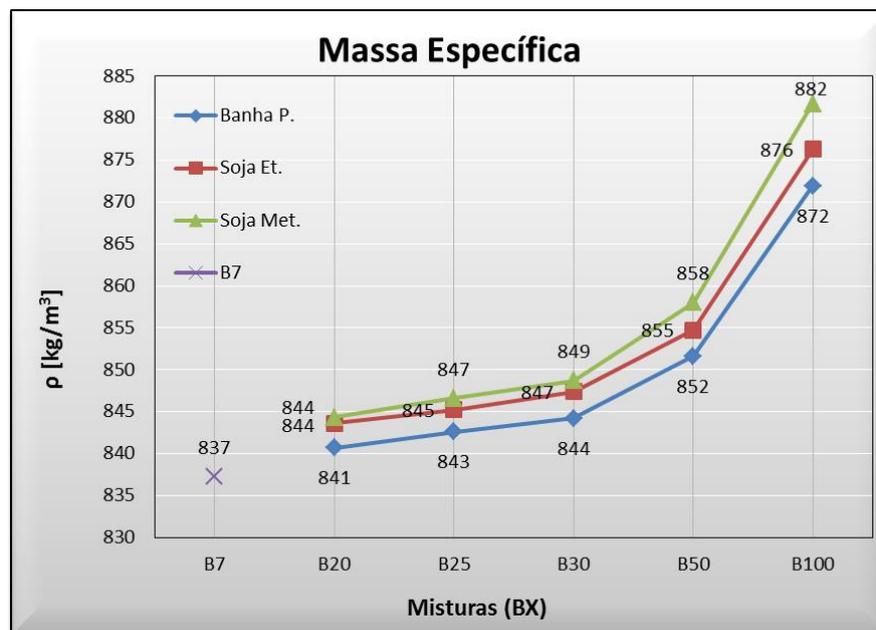


Figura 5.5. Massas específicas para cada mistura.

Em seus resultados, OLIVEIRA (2013) constatou massa específica dos biodieseis produzidos a partir de diversas matérias-primas, incluindo soja e banha, com valores entre  $865 \text{ kg m}^{-3}$  e  $882 \text{ kg m}^{-3}$ , estando em concordância com os resultados obtidos neste trabalho, bem como valores encontrados por YOSHIDA

(2013) em sua pesquisa de  $850 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $858.4 \text{ kg m}^{-3}$  e  $880.9 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente para B20, B50 e B100, em biodieseis produzidos a partir de soja.

A análise comparativa realizada entre os biodieseis para massa específica não apresentou diferenças significativas, mantendo-se em escala decimal.

### 5.3. Opacidade, Consumo e Emissões

Para os resultados deste tópico foram preparados gráficos comparativos para opacidades, consumos e emissões dos gases em função de cada mistura analisada em um comparativo de matérias-primas e de rota de produção.

#### *Opacidade*

Para informações de opacidade, foram utilizados resultados dos testes, conforme Tabela 5.5 e Figura 5.6, onde é visto que à medida que há o acréscimo de biodiesel, seja etílico ou metílico, de soja ou de banha de porco no diesel, ocorre também a diminuição proporcional dos níveis de opacidade.

Resultados encontrados por LOPES (2006) comprovam a redução da opacidade à medida que se aumentou a quantidade de biodiesel. Em seus ensaios o autor obteve uma redução média de 49% do B0 para B100 e justificou, possivelmente, a relação com a maior eficiência da combustão do biodiesel em relação ao diesel de petróleo.

Os resultados mostrados conforme gráficos de opacidades (Figura 5.6) explicitam o B7 como combustível emissor de maior opacidade (6,85%) junto ao B20 de banha de porco por rota etílica (6,20%), e o B100 de soja por rota metílica como emissor de menor valor de opacidade com 1,40%.

Foi obtida uma redução percentual das opacidades em 75% entre o diesel referência (B7) e o B100 de banha de porco etílica, 72% entre o B7 e o B100 de soja etílico e quase 80% entre o B7 e o B100 de soja metílico, tendo comportamento superior aos encontrados por LOPES (2006).

Tabela 5.5. Dados de opacidades para cada mistura.

MISTURAS	RPM		Opacidade		
	INÍCIO	FIM	INÍCIO	FIM	MÉDIA
<b>B7 REF.</b>	4260	3950	5,7	8,0	<b>6,9</b>
<b>BANHA DE PORCO ETÍLICO</b>					
<b>B20</b>	3960	3820	4,5	7,9	<b>6,2</b>
<b>B25</b>	3860	3690	4,7	5,3	<b>5,0</b>
<b>B30</b>	3720	2620	6,0	2,5	<b>4,3</b>
<b>B50</b>	3900	4040	3,4	4,4	<b>3,9</b>
<b>B100</b>	3710	3940	3,2	0,1	<b>1,7</b>
<b>SOJA ETÍLICO</b>					
<b>B20</b>	3760	3820	6,4	5,6	<b>6,0</b>
<b>B25</b>	3870	3780	6,1	5,5	<b>5,8</b>
<b>B30</b>	3940	4020	5,1	3,1	<b>4,1</b>
<b>B50</b>	3330	4160	4,5	3,4	<b>4,0</b>
<b>B100</b>	3910	3940	0,7	3,0	<b>1,9</b>
<b>SOJA METÍLICO</b>					
<b>B20</b>	3100	3180	4,6	6,4	<b>5,5</b>
<b>B25</b>	3770	3750	3,5	1,4	<b>2,5</b>
<b>B30</b>	3920	3780	2,2	2,0	<b>2,1</b>
<b>B50</b>	3770	3930	1,7	1,3	<b>1,5</b>
<b>B100</b>	2340	2600	1,5	1,3	<b>1,4</b>

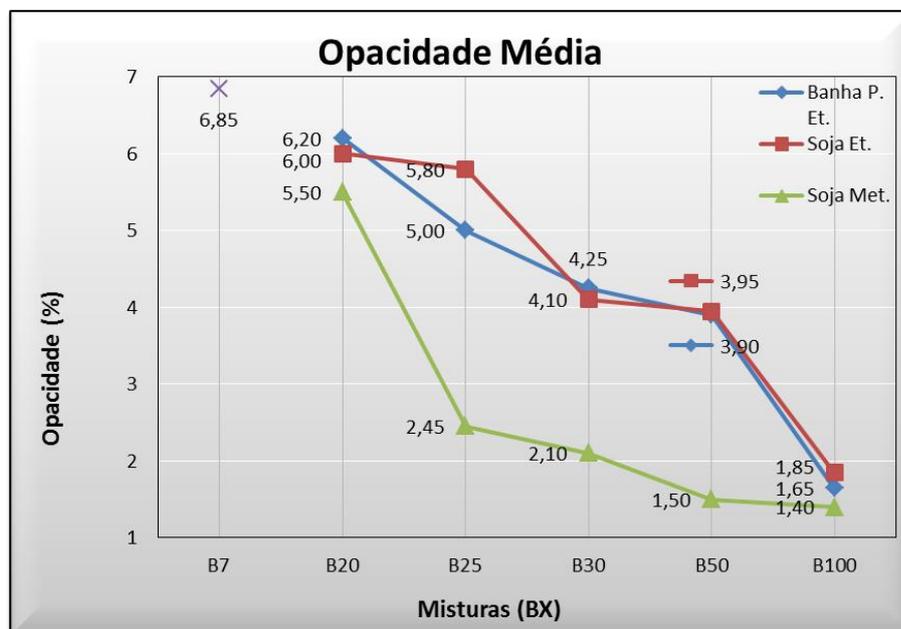


Figura 5.6. Opacidades médias para cada mistura.

Para a opacidade, o comparativo entre matérias-primas e rotas de produção também não apresentou diferenças significativas, conforme Figura 5.6. Alguns dados da literatura revisada confrontam os dados encontrados quanto a opacidades

(NASCIMENTO, 2004), já que se sabe que o biodiesel é menos volátil que o diesel, então, alguma parcela do combustível normalmente não queima durante a combustão. Com isso, quanto maior o teor de biodiesel metílico ou etílico na mistura, tanto maior será o valor de resíduo de carbono e assim, a formação de depósitos na câmara de combustão do motor. Juntamente com isso, misturas com ésteres etílicos possuem maior viscosidade do que as misturas com ésteres metílicos, e isso influencia na qualidade da queima da mistura ar/combustível, assim somando motivos para a formação de depósitos na câmara em consequência de uma combustão incompleta.

### *Consumo*

Para informações de consumo também foram utilizados resultados globais dos testes, conforme Figura 5.7 e mostrados também na Tabela 5.6. É possível verificar um padrão, confirmando dados apresentados da literatura (SORANSO, 2008; FERRARI, 2005), onde há um maior consumo de combustível quando da adição de biodiesel ao diesel, seja ele produzido a partir de qualquer matéria-prima ou por qualquer rota de produção.

Isto provavelmente deve-se ao fato de que o combustível apresenta menor poder calorífico proporcional à adição de biodiesel, portanto, diminuindo o seu poder de queima na câmara, deixando assim a combustão menos eficiente, e conseqüentemente, aumentando o consumo de combustível proporcional (TABILE, 2007).

Conforme dados da Tabela 5.6 houve um aumento percentual de consumo entre o B7 e os biodieseis B100. Com a utilização do B100 de banha de porco etílica obteve-se aumento de 44% no consumo em massa, com o B100 de soja etílica foi apresentado aumento de 33% no consumo, já com o B100 de soja metílica obteve-se quase 60% de aumento de consumo de combustível.

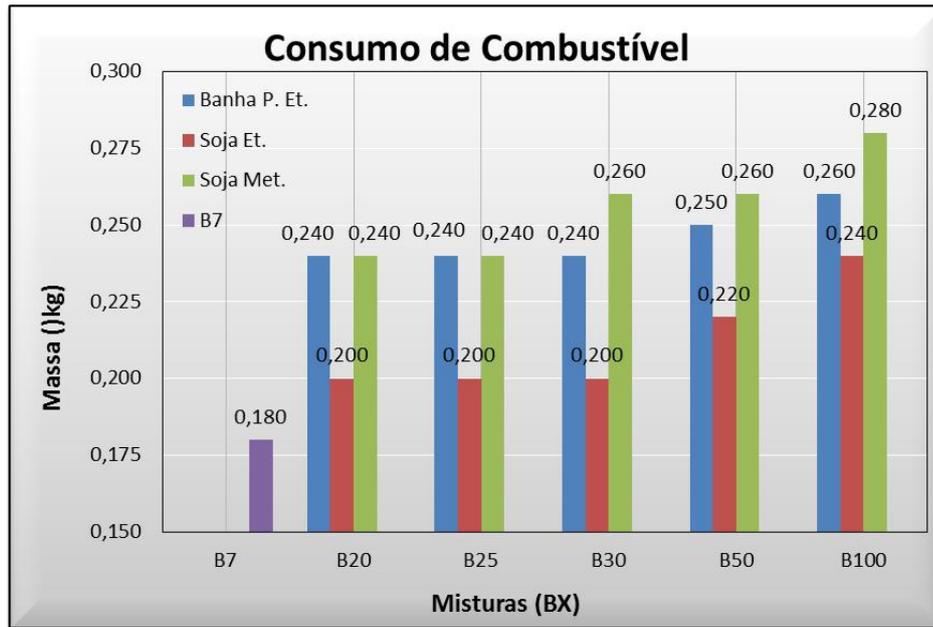


Figura 5.7. Consumos mássico para cada mistura.

Tabela 5.6. Dados de massa de combustível consumido para cada mistura.

Misturas	Consumo S/ Banco			Horários Testo		Data	Temp. Ar	Umidade Rel. Ar	Pressão Atm.
	Início	Fim	Total (kg)	Início	Fim				
B7 Ref.	3,180	3,000	0,180	14:18	14:28	21/mai	22 °C	44%	762 mmHg
<b>BANHA DE PORCO</b>									
B20	0,420	0,180	0,240	14:34	14:44				
B25	1,300	1,060	0,240	15:49	15:59				
B30	2,260	2,020	0,240	16:10	16:20				
B50	1,860	1,610	0,250	17:22	17:32				
B100	2,100	1,840	0,260	17:43	17:53	01/jun	18,5 °C	48%	771 mmHg
<b>SOJA ETÍLICO</b>									
B20	2,920	2,720	0,200	16:23	16:33				
B25	2,620	2,420	0,200	15:52	16:02				
B30	2,460	2,260	0,200	15:24	15:34				
B50	3,520	3,300	0,220	12:04	12:14	03/jun	22,5 °C	43%	764 mmHg
B100	3,220	2,980	0,240	11:09	11:19				
<b>SOJA METÍLICO</b>									
B20	2,360	2,120	0,240	16:48	16:58				
B25	1,780	1,540	0,240	17:06	17:16				
B30	2,500	2,240	0,260	11:31	11:41	16/jun	15,9 °C	32%	770 mmHg
B50	2,960	2,700	0,260	11:48	11:58				
B100	2,540	2,260	0,280	12:10	12:20				

Dados relativos aos consumos, pouco inferem sobre as matérias-primas ou rotas de produção em uma análise comparativa porque apresentaram variações muito pequenas da ordem de 0,060kg de variação máxima de massa de combustível consumida entre os tipos analisados, conforme mostra Figura 5.7.

### *Emissões*

Para os resultados obtidos das emissões foram elaborados gráficos com valores médios e os respectivos desvios padrão. São mostrados gráficos dos valores médios das emissões em função das matérias-primas e rotas de produção em um comparativo para cada gás ( $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{NO}_2$ , NO, e  $\text{NO}_x$ ) para cada mistura percentual de biodiesel.

Em geral, para todas as matérias-primas e rotas de produção, é possível verificar (Figuras 5.8 a 5.10) uma simetria entre as curvas de emissões dos gases  $\text{NO}_x$ , NO,  $\text{NO}_2$ , porém há uma inversão de comportamento a partir de certo percentual de mistura para cada caso, onde começa a existir aumento da emissão destes gases, confirmando assim, literatura descrita por GUARIEIRO (2011) e FIORESE (2013). A análise do comportamento para os gráficos dos gases  $\text{CO}_2$  e CO não mostrou variação considerável, mantendo-se levemente abaixo dos valores encontrados na literatura (YOSHIDA, 2013; DEMIRBAS, 2009).

Confirmando os dados de FIORESE, 2013; YOSHIDA, 2013 e DEMIRBAS, 2009, neste trabalho se obteve um aumento máximo de 9% de CO e 0,5% de  $\text{CO}_2$  quando comparado o B7 com B100, confirmando a baixa variação destas emissões.

O aumento considerável dos óxidos de nitrogênio pode ser justificado pela condição estrutural de fabricação de um grupo motor-gerador, como a robustez relativa a um motor ciclo diesel, além da ineficiência de troca de calor por se tratar de um motor estacionário, o que causam temperaturas elevadas na câmara de combustão. Além disso, a presença de oxigênio em excesso, devido a um possível débito na injeção de combustível previsto para o B100 em função de seu menor poder calorífico e maior massa específica, além do aumento de oxigênio no combustível quando da adição de biodiesel; influenciam diretamente o poder de atomização do biocombustível, justificando o aumento de  $\text{NO}_x$  e seus derivados (LOPES, 2006; COSTA, 2007).

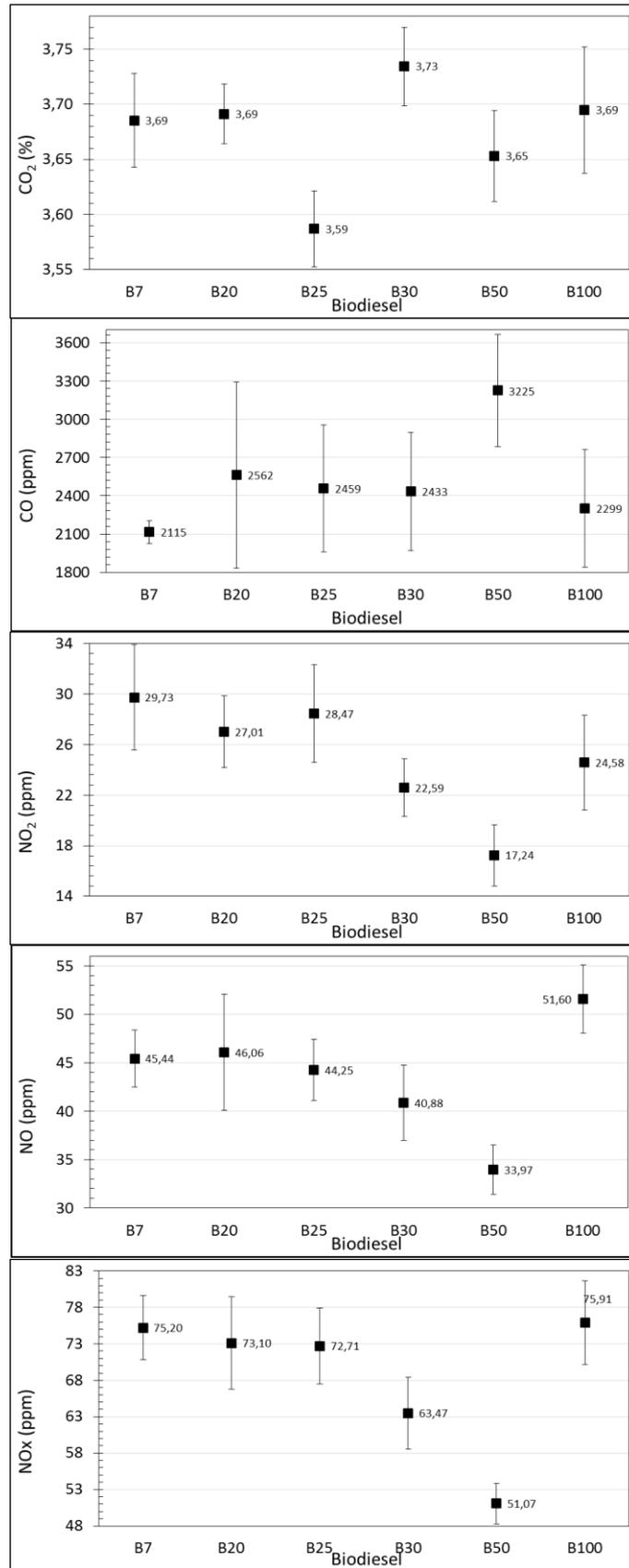


Figura 5.8. Emissões médias para banha de porco por rota etílica.

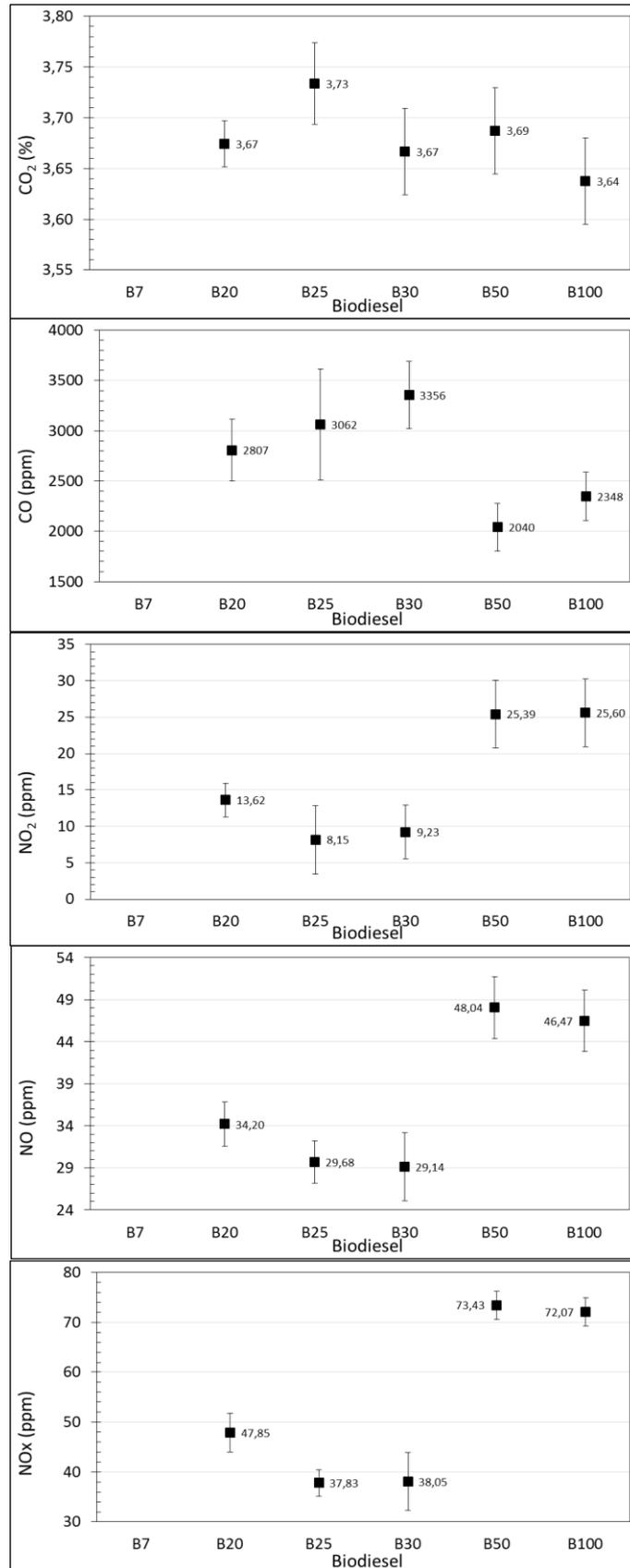


Figura 5.9. Emissões médias para soja por rota etílica.

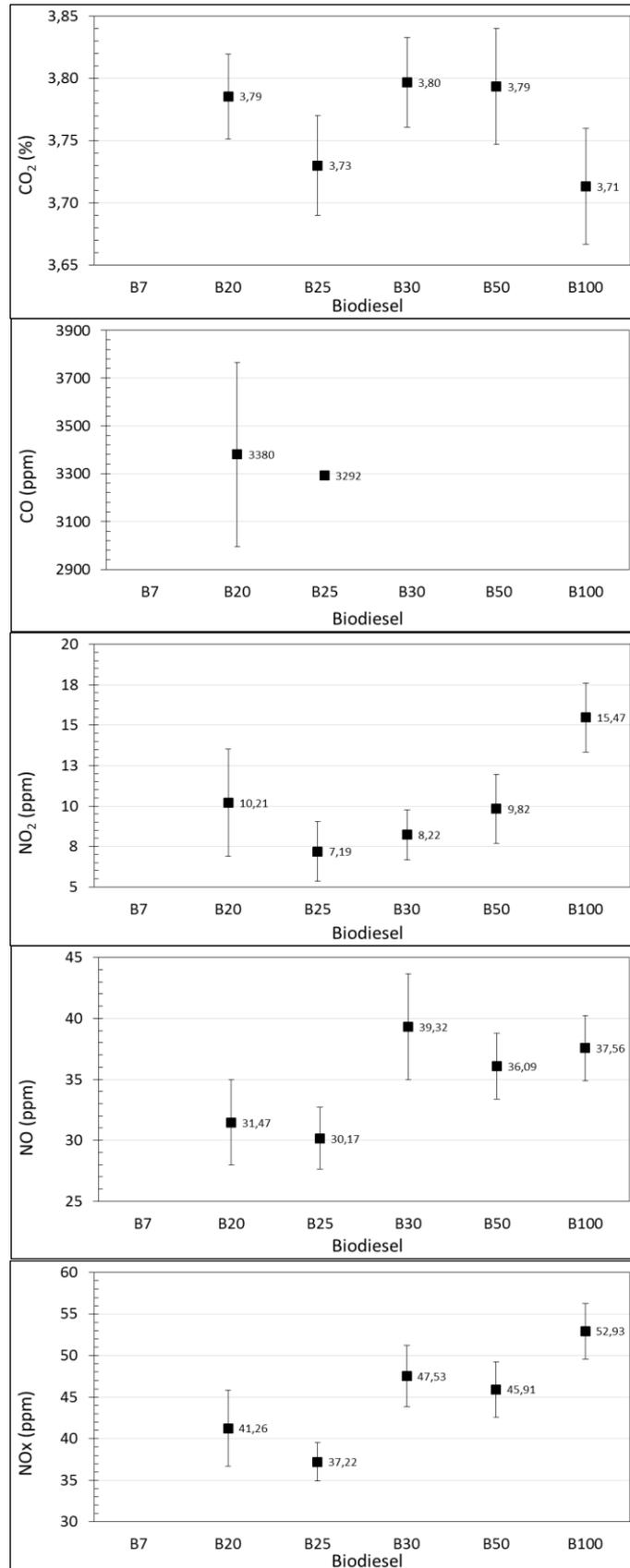


Figura 5.10. Emissões médias para soja por rota metílica.

Para os resultados de emissões em ensaios com banha de porco por rota etílica (conforme observado na Figura 5.8) é possível verificar uma inversão de comportamento das curvas de emissões para  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{NO}$  a partir do B50.

As emissões dos ensaios com soja por rota etílica forneceram resultados onde é possível verificar uma inversão de comportamento das curvas de emissões para  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{NO}$  a partir do B25, conforme Figura 5.9.

Para o caso de biodiesel de soja por rota metílica observa-se que a inversão de comportamento das curvas de emissões para  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{NO}$  ocorreram a partir do B25, conforme Figura 5.10.

Os ensaios de emissões médias possuíam variações de comportamento pouco esperados para as diferentes matérias-primas e rotas, não evidenciando um padrão de comportamento entre as curvas, conforme pode ser analisado nas Figuras 5.8 a 5.10.

#### **5.4. Consumo Energético**

Os dados de consumo horário volumétrico ( $\text{Chv}$ ) e consumos energéticos ( $\text{Cen}$ ) para cada mistura pode ser visto na Tabela 5.7. A Figura 5.11 mostra o gráfico construído com estes dados e evidencia o aumento do consumo energético em função da adição de biodiesel à mistura.

O comportamento do consumo energético (Figura 5.11), o qual apresenta uma leve tendência de crescimento para os biodieseis de soja, tanto etílico quanto metílico, discorda dos dados encontrados por FIORESE (2011), que concluiu que aumentando o teor de biodiesel, obtém-se maior consumo horário volumétrico e menor consumo energético. Esta discordância pode ser atribuída à taxa de aumento dos consumos horários volumétricos ser maior que a taxa de diminuição dos poderes caloríficos encontrados nos ensaios (do B7 para o B100) que foram utilizados na Equação (4) para chegar aos resultados de  $\text{Cen}$ .

Tabela 5.7. Dados de consumo horário volumétrico (Chv) e consumo energético (Cen).

MATÉRIA-PRIMA	MISTURAS [BX]	Chv [kg h <sup>-1</sup> ]	Cen [MJ h <sup>-1</sup> ]
DIESEL REF.	B7	1,08	47,13
	B20	1,44	59,99
BANHA DE PORCO ETÍLICO	B25	1,44	59,36
	B30	1,44	59,21
	B50	1,5	59,91
	B100	1,56	58,00
	B20	1,44	59,82
SOJA METÍLICO	B25	1,44	59,30
	B30	1,56	63,85
	B50	1,56	62,45
	B100	1,68	62,56
	B20	1,2	49,94
SOJA ETÍLICO	B25	1,2	49,74
	B30	1,2	49,42
	B50	1,32	53,09
	B100	1,44	54,12

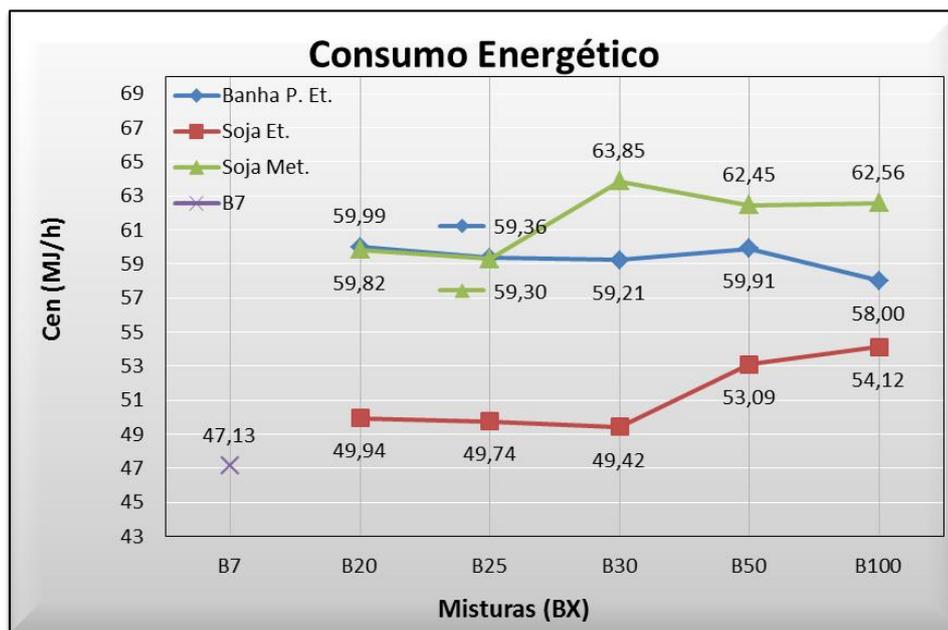


Figura 5.11. Consumo energético global.

No gráfico da Figura 5.11 é possível verificar um comportamento inverso (decrecente) da curva de consumo energético para a matéria-prima banha de porco, devido possivelmente, ao fato da taxa de aumento do Chv ser baixo se comparado à taxa de decréscimo do PCI em função da adição de biodiesel ao diesel, conforme explicitado na Equação 4.

A análise comparativa dos consumos energéticos para as diferentes matérias-primas e rotas de produção revelou um comportamento muito próximo da banha de porco etílica e a soja metílica, diferenciando pouco da soja etílica.

### 5.5. Comparativo dos Ensaios com Banco de Resistência

Foram realizados, além de ensaios com o motor livre de carga, também o sistema acoplado a um gerador e banco de resistências para se obter um comparativo com o motor em regime de trabalho, conforme Figuras 5.18 a 5.21 e Tabela 5.8.

Para os ensaios de opacidade (Tabela 5.8) foi observado um decréscimo dos valores com adição de biodiesel a mistura concordando com ensaios realizados sem banco de resistências e com literatura previamente discutida. Valores de opacidade menores para os combustíveis com o banco de resistência foram encontrados se comparados ao ensaios com motor rodando livre de carga.

Tabela 5.8. Opacidades médias percentuais com e sem banco de resistências.

<b>CARGA / BIODIESEL</b>	<b>B7 - IND.</b>	<b>B100 - Banha P. Et.</b>	<b>B100 - Soja Et.</b>
<b>COM</b>	8,10	0,20	0,15
<b>SEM</b>	6,85	1,65	1,85

Os resultados relativos aos consumos em massa de combustível com carga acoplada ao sistema seguem padrão crescente com a adição de biodiesel a mistura, tendo valores maiores que os encontrados nos ensaios sem banco de resistências, conforme pode ser visto na Tabela 5.9. Este aumento de consumo é devido à maior carga aplicada ao grupo motor-gerador.

Tabela 5.9. Consumos médios de combustível [kg] com e sem banco de resistências.

<b>CARGA / BIODIESEL</b>	<b>B7 - IND.</b>	<b>B100 - Banha P. Et.</b>	<b>B100 - Soja Et.</b>
<b>COM</b>	0,400	0,440	0,420
<b>SEM</b>	0,180	0,260	0,240

Os valores para emissões médias com carga podem ser visualizados na Figura 5.12 e mostram um comportamento similar aos ensaios sem carga. Para valores de emissões de óxidos de nitrogênios, obteve-se maiores emissões

relativas, devido às maiores temperaturas envolvidas na queima na câmara de combustão e se observa também uma inversão da curva a partir da utilização do B25. Já os níveis de CO, foram menores se comparados com ensaios sem carga, e apresentou também inversão de comportamento a partir da mistura B25. Valores de CO<sub>2</sub> mostram comportamento crescente até o B30, onde começa a decrescer até o B100.

Na análise comparativa de emissões para banha de porco com carga e sem carga aplicada ao grupo motor-gerador (Figura 5.13) foram encontradas curvas com comportamento similares para os gases CO<sub>2</sub>, NO e NO<sub>x</sub> quando da adição de biodiesel à mistura, apenas diferenciando quantitativamente, onde foram encontrados maiores valores de emissões para o sistema com carga aplicada.

Para as emissões de CO foi verificado comportamento oposto das curvas, onde os maiores valores foram obtidos para o sistema sem carga aplicada. Já para o NO<sub>2</sub>, o comportamento das curvas variou, tendo maiores valores de emissões para o sistema sem carga até o B25, onde há uma inversão do comportamento das curvas conforme Figura 5.13.

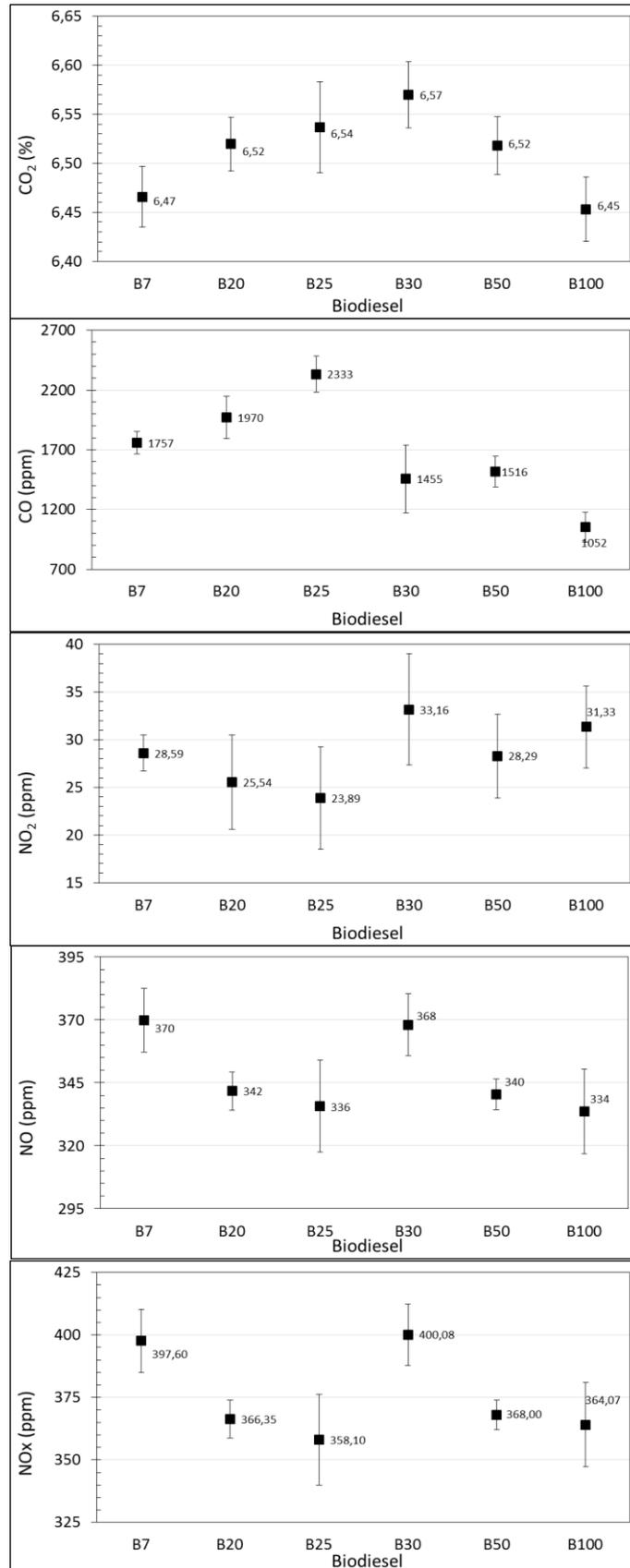


Figura 5.12. Emissões médias com desvio padrão para banha de porco por rota ética com banco de resistências.

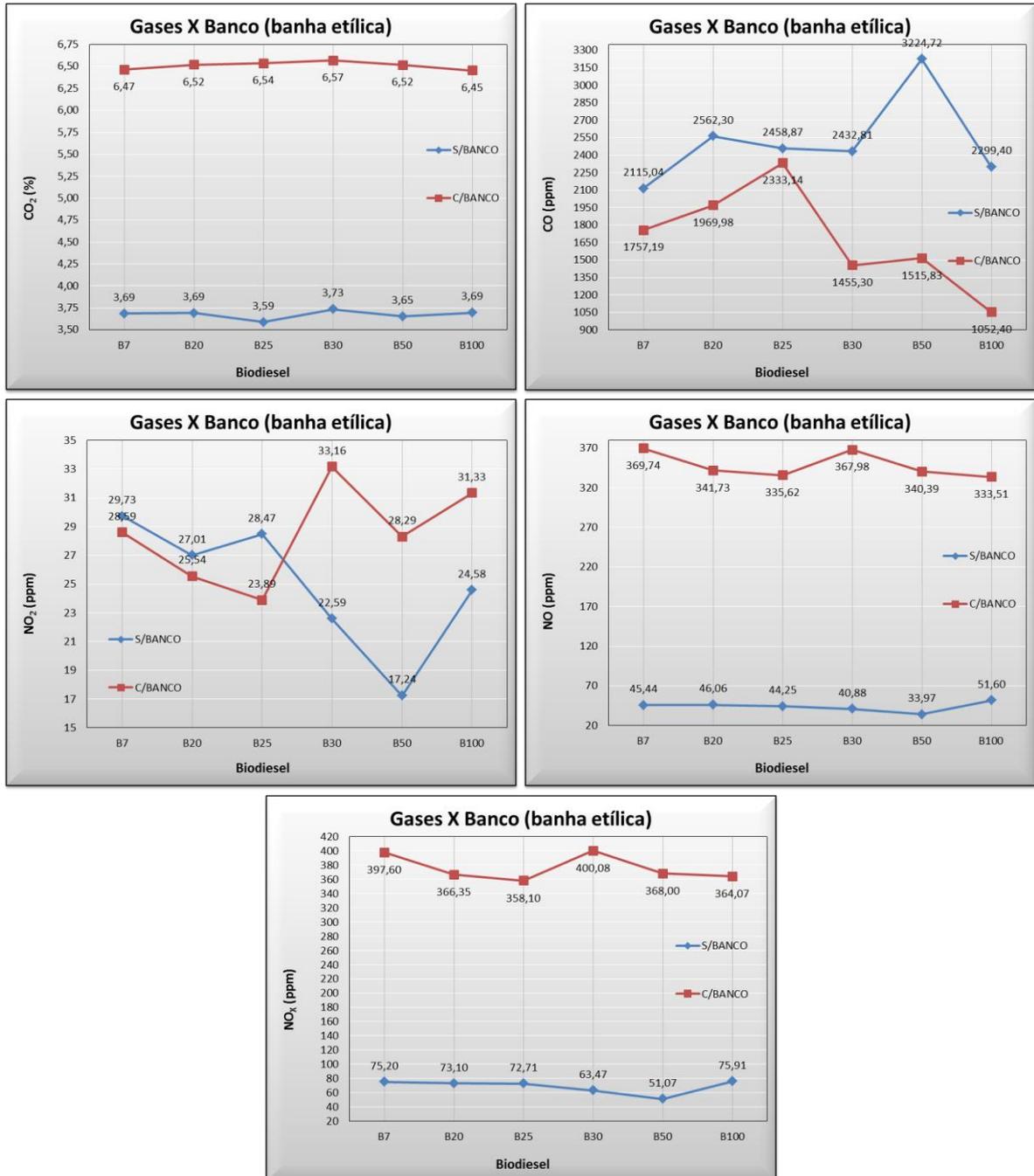


Figura 5.13. Emissões médias para banha de porco por rota etílica com e sem banco de resistências.

## 5.6. Considerações Finais

O comparativo entre as matérias-primas para produção de biodiesel mostra que os óleos vegetais, que possuem grande parte das cadeias insaturadas (caso do óleo de soja) ou as gorduras animais que são muito saturadas (como a banha de porco) influenciam diretamente nas propriedades físico-químicas aqui apresentadas e no uso final do biodiesel em motores.

Na utilização do biodiesel, quando presente grande quantidade de cadeias saturadas, são gerados problemas de entupimento, seja dos bicos injetores do motor, seja dos filtros de combustível, principalmente em regiões de baixas temperaturas ambiente. Já no armazenamento é onde se estuda bastante o uso de aditivos, conservantes ou antioxidantes. Uma saída encontrada é a produção do biodiesel com uma variedade de matérias-primas misturadas no intuito de modificar as características finais do biocombustível e melhorar assim seu uso e armazenamento.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados permitiram as seguintes conclusões:

*Para uma análise em função do aumento da adição de biodiesel ao diesel*

- Os dados de poderes caloríficos apresentaram o B20 de soja etílica como o combustível de maior valor encontrado de poder calorífico;
- Em relação aos dados das *opacidades, consumos e emissões* dos combustíveis 20%, 25%, 30% e 50% de biodiesel-diesel, e 100% de biodiesel, conclui-se que o B100 de soja metílico apresentou o melhor comportamento para opacidade, os combustíveis B20, B25 e B30 de soja etílica apresentaram valores iguais e obtiveram os mais favoráveis comportamentos para consumo. Para as emissões de CO, o B50 de soja etílica apresentou melhor comportamento, para CO<sub>2</sub> foi o B25 de banha etílica quem foi favorável no uso e para os gases NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, o que menos emitiu foi o B25 de soja metílica. Já para emissões de NO, o combustível mais favorável observado foi o B25 de soja etílica;
- Em relação aos dados de *consumo energético*, o combustível que melhor apresentou comportamento favorável (mais eficiente energeticamente) foi o B30 de soja etílica;
- Em relação às análises dos ensaios *com e sem banco de carga*, foi verificado que o B100 de soja etílica para opacidade e consumo foi o combustível que melhor agregou qualidades em seu uso. Para emissões com banha de porco etílica foi verificado grande aumento quando da utilização de cargas para CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub> e NO<sub>2</sub> a partir do B25, e o contrário para CO e NO<sub>2</sub> até B20;

*Para uma análise em função das matérias-primas e rotas de produção estudadas*

- Em termos gerais, não foi possível verificar grandes diferenças relativas, o que permite afirmar a grande proximidade de característica, composição físico-química, eficiências térmica e energética e emissões, entre a banha de porco etílica, a soja etílica e a soja metílica, possibilitando assim os seus usos a depender apenas de fatores externos como clima, oferta e principalmente custo.

## **7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar ensaios de torque e potência do motor, além de eficiência energética incluindo balanços de massa e térmicos do sistema;
- Utilizar misturas percentuais de biocombustíveis nos ensaios práticos desde o diesel referência, B10, B20, B30, B40, B50, B60, B70, B80, B90 e o biodiesel puro B100;
- Realizar ensaios junto à bancada dinamométrica, em um comparativo prático-teórico da combustão de biodieseis em motor ciclo diesel juntamente com a modelagem matemática desta combustão, realizada por software Open Foam.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 14065:2013. **Destilados de Petróleo e Óleos Viscosos — Determinação da Massa Específica e da Densidade Relativa pelo Densímetro Digital**. 2013;

ABNT NBR 7148:14. **Petróleo e Derivados de Petróleo — Determinação da Massa Específica, Densidade Relativa e °API. Método do Densímetro**. 2014;

ALVES, G. **Utilização dos Óleos de Fritura para a Produção de Biodiesel**. Monografia - Faculdade de Tecnologia de Araçatuba – Araçatuba. 2010;

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis. **Boletim Mensal de Biodiesel**, 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 02/02/2016;

ASTM D5291-2010. **Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Petroleum Products and Lubricants**. 2010;

ASTM1298-12b. **Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method**. 2012;

ASTM D4052-11. **Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter**. 2011;

ASTM D5865-13. **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke**. 2013;

BIODIESELBR. **Revista Referência Mundial Sobre Biodiesel**. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/index>. Acesso em: 31/07/2013;

BNEF. **Bloomberg New Energy Finance**, 2013. Disponível em: <http://www.about.bnef.com>. Acesso em: 02/08/2013;

BOSCH. **Automotive Handbook**, Stuttgart, 2006;

CEMIG. **Companhia Energética de Minas Gerais – Alternativas Energéticas**, 2012. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/Inovacao/alternativasenergeticas>. Acesso em: 05/02/1016;

COSTA, Y. **Análises Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com Mistura de Diesel e Gás Natural**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007;

DANTAS, M.B. **Blendas de Biodiesel: Propriedades de Fluxo, Estabilidade Térmica e Oxidativa e Monitoramento Durante Armazenamento**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2010;

DEMIRBAS, A. **Biofuels Securing the Planet's Future Energy Needs**. Energy Conversion and Management 50. p. 2239–2249. 2009;

EIA. **Energy Information Administration - International Energy Outlook (IEO)**, 2013. Disponível em: <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/>. Acesso em: 14/10/2013;

ENCARNAÇÃO, A.P. **Geração de Biodiesel pelos Processos de Transesterificação e Hidroesterificação, uma Avaliação Econômica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008;

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 02/08/13;

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 2012;

FERRARI, R.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, 19-23, 2005;

FIGLIARESE, D. **Desempenho em Dinamômetro e Emissões Residuais de um Motor de Trator Agrícola Operando com Misturas Binárias de Óleo Diesel B5 e Biodiesel de Óleo de Frango**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011;

FONTOURA, L. A. **Apostila da III Escolar de Biodiesel – CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia – 2013-a**;

FONTOURA, L. A. **Biodiesel - Curso de Extensão, Utilização e Obtenção de Biocombustíveis**. CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia. 2013-b;

GAZZONI, D. **Balço de Emissões de CO<sub>2</sub> por Biocombustíveis no Brasil: Histórico e Perspectivas**. EMBRAPA - 2009;

GOES, T.; ARAÚJO, M. **Biodiesel e sua Sustentabilidade**. 2009;

GUARIEIRO, L. L. N.\*; Vasconcellos, P. C.; Solci, M. C. **Poluentes Atmosféricos Provenientes da Queima de Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis: Uma Breve Revisão**. *Rev. Virtual Quim.*, 3 (5), 434-445 – 2011;

IBICT. **Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. O Biodiesel**. Disponível em <http://www.biodiesel.gov.br>. Acesso em: 20/09/2015;

IBP. **Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis**, 2012. Disponível em: <http://www.ibp.org.br/>. Acesso em: 14/10/2013;

JOVÍLSON C.M.; et al. **Diesel Engine Emissions Characterizations, Fueled with Biodiesel/Diesel Mixtures**. In: International Congress of Mechanical Engineering, Brasília. 2009;

JULIATO, A. **Análise da Influência de Diferentes Misturas de Biodiesel no Desempenho e Emissões de Poluentes de Um Motor Diesel Agrícola**. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2006;

KALAM, M.A.; Masjuki, H.H. **Biodiesel from Palm Oil - An Analysis of its Properties and Potential**. *Biomass and Bioenergy*, 23 471-479. 2002;

KNOTHE, G.; et al. **Manual de Biodiesel**. Curitiba: Edgard Blücher, 2006;  
LAPUERTA, M., ARMAS, O., FERNANDEZ, J. R., **Effect of Biodiesel Fuels on Diesel Engine Emissions**. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 198-223. 2008;

LEI DIRETO. **Lei No 11.097, de 13 de Janeiro de 2005**. Disponível em: <http://www.leidireto.com.br/lei-11097.html>. Acesso em: 30/06/2015;

LOPES, A. **Biodiesel em Trator Agrícola: Desempenho e Opacidade**. 158 f. Tese (Livre Docência em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006;

MENEGHETTI, P. **A Reação de Transesterificação, Algumas Aplicações e Obtenção de Biodiesel** – *Rev. Virtual Quim.* 2013, 5 (1), 63-73 – 2013;

NASCIMENTO, D. R. **Determinação de Resíduo de Carbono em Misturas de Diesel/Biodiesel**. Revista Virtual Química, 6 (4), 911-923. 2014;

NBB. **National Biodiesel Board**. 2006. Disponível em: <http://www.biodiesel.org>. Acesso em: 10/02/2015;

OLIVEIRA, D. **Obtenção de Biodiesel por Transesterificação em Dois Estágios e sua Caracterização por Cromatografia Gasosa: Óleos e Gorduras em Laboratório de Química Orgânica**. Quim. Nova, Vol. 36, No. 5, 734-737, 2013;

RAKOPOULOS, C.D.; et al. **Comparative Performance and Emissions Study of a Direct Injection Diesel Engine using Blends of Diesel Fuel with Vegetable Oils or Bio-Diesels for Various Origins**. Energy Conversion and Management, 47 3272–3287. 2006;

SALDIVA, P. **Quanto Vale Uma Vida?** São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com>. Acesso em: 10/02/2015;

SORANSO, A.M. **Desempenho Dinâmico de Um Trator Agrícola Utilizando Biodiesel Destilado de Óleo Residual**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.12, n.5, p.553–559, 2008;

SOTO, F.P. **Apresentação de Emissões**. Seminário SAE, 2006;

TABILE, R.A. **Efeito do Biodiesel de Mamona no Diesel Interior e Metropolitano em Trator Agrícola**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. São Paulo, 2009;

TABILE, R.A. **Opacidade da fumaça de um trator agrícola funcionando com Biodiesel metílico de gordura hidrogenada**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 4. Varginha. 2007.

TEIXEIRA, C.V. **Análise de Emissões e Desempenho de Motores Diesel Utilizando Óleo Diesel Comercial, Biodiesel de Palma (B100) e Misturas (BX)**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2010;

TESTO. **Manual de Instruções**, Testo 350 M/XL / 454. 2012;

YOSHIDA, H.H. **Comparative Performance of a Diesel Cycle Engine Using Blends of Diesel and Biodiesel**. In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013) November 3-7, 2013, Ribeirão Preto, SP. 2013.