

MARCIO ROBERTO RIGOTTE

DESEMPENHO DE CONJUNTO MOTOR-GERADOR UTILIZANDO  
BIOCOMBUSTÍVEIS SOB CARGAS VARIADAS

CASCAVEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO - 2014

MARCIO ROBERTO RIGOTTE

DESEMPENHO DE CONJUNTO MOTOR-GERADOR UTILIZANDO  
BIOCOMBUSTÍVEIS SOB CARGAS VARIADAS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Professor Orientador: Dr. Deonir Secco

Professor Co-orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO – 2014

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362**

R428d Rigotte, Marcio Roberto  
Desempenho de conjunto motor-gerador utilizando biocombustíveis sob cargas variadas. / Marcio Roberto Rigotte — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2014.  
57 p.

Orientador: Prof. Dr. Deonir Secco  
Co-orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.  
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.  
Bibliografia.

1. Biodiesel. 2. Combustível (consumo específico). 3. Poder calorífico. 4. Eficiência energética. 5. *Crambe abyssínica*. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

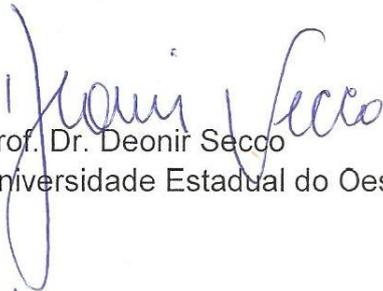
CDD 21°ed. 628.74

MARCIO ROBERTO RIGOTTE

**“Desempenho de conjunto motor-gerador utilizando  
biocombustíveis sob cargas variadas”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:

  
Prof. Dr. Deonir Secco

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

  
Prof. Dr. Flavio Gurgacz

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

  
Prof. Dr. Alcir José Modolo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Pato Branco

Cascavel, 14 de Fevereiro de 2014.

“Não considere nenhuma prática como imutável.

Mude e esteja pronto a mudar novamente.

Não aceite verdade eterna.

Experimente.”

B. F. Skinner

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Carla, pelo incentivo, carinho e compreensão;

À minha família, pelo estudo que proporcionaram desde a infância;

À UNIOESTE, pela estrutura e organização do PPGEA;

Ao professor e orientador Dr. Deonir Secco, pelo conhecimento transmitido, pela compreensão demonstrada e pelas ideias compartilhadas;

Aos professores Reginaldo Ferreira Santos, Samuel Nelson Melegari de Souza, Jair Antônio Cruz Siqueira e Reinaldo Aparecido Bariccatti por todas as conversas, sugestões e ensinamentos;

À Vanderléia Luzia Stockmann Schmidt, por sua eficiência, organização e prestatividade, e na pessoa dela a todos demais funcionários que, de uma forma ou outra, contribuíram com esta caminhada;

Aos vários amigos, companheiros de turma e outros, que fiz durante o mestrado;

A todos que de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Organograma da obtenção do biodiesel por meio da transesterificação.....	7
<b>Figura 2.</b> Comportamento do consumo específico (Kg KW h <sup>-1</sup> ) para diferentes cargas resistivas (KW).....	35
<b>Figura 3.</b> Consumo específico (Kg KW h <sup>-1</sup> ) máximo e mínimo observados por carga resistiva (KW). ....	35
<b>Figura 4.</b> Consumo específico (Kg KW h <sup>-1</sup> ) comparativo de diferentes combustíveis e misturas binárias em função das cargas resistivas.....	37
<b>Figura 5.</b> Eficiência energética (%) dos combustíveis por carga resistiva (KW). ....	39
<b>Figura 6.</b> A - Eficiência energética (%) máxima e mínima por carga resistiva (KW). B - Eficiência energética média (%) e consumo específico médio (Kg KW h <sup>-1</sup> ) por carga resistiva (KW). ....	40
<b>Figura 7.</b> A - Mistura binárias com eficiência energética (%) maiores que as do biodiesel puro. B - Combustíveis com eficiência energética (%) maiores que as do diesel.....	41

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Descrição dos tratamentos e respectivas siglas .....	20
<b>Tabela 2.</b> Propriedades físico-químicas do biodiesel obtido de diferentes matérias-primas.....	28
<b>Tabela 3.</b> Poder calorífico inferior ( $\text{MJ Kg}^{-1}$ ) dos combustíveis utilizados .....	29
<b>Tabela 4.</b> Consumo específico médio ( $\text{Kg KW h}^{-1}$ ) para carga resistiva de 1 KW .....	30
<b>Tabela 5.</b> Consumo específico médio ( $\text{Kg KW h}^{-1}$ ) para carga resistiva de 2 KW .....	31
<b>Tabela 6.</b> Consumo específico médio ( $\text{Kg KW h}^{-1}$ ) para carga resistiva de 3 KW .....	31
<b>Tabela 7.</b> Consumo específico médio ( $\text{Kg KW h}^{-1}$ ) para carga resistiva de 4 KW .....	32
<b>Tabela 8.</b> Consumo específico médio ( $\text{Kg KW h}^{-1}$ ) para carga resistiva de 5 KW .....	32
<b>Tabela 9.</b> Potência gerada (KW) pelo conjunto motor-gerador .....	54
<b>Tabela 10.</b> Consumo específico ( $\text{Kg KW h}^{-1}$ ) .....	56

RIGOTTE, Marcio Roberto. MSc, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro de 2014. **Desempenho de conjunto motor-gerador utilizando biocombustíveis sob cargas variadas**. Professor Orientador Dr. Deonir Secco.

## RESUMO

A crescente demanda por energia, associada a seus elevados custos e a busca por sustentabilidade propiciaram nos últimos anos um aumento na procura por biocombustíveis renováveis, dentre eles o biodiesel. Apesar do Brasil, e especificamente o Paraná, apresentarem vocação agrícola, com diversidade de matérias-primas para obtenção de biodiesel, esta permanece atrelada a demanda compulsória. Este trabalho buscou avaliar o desempenho energético de um conjunto motor-gerador utilizando diesel de petróleo e biodiesel de diferentes matérias primas. O experimento foi conduzido no Núcleo Experimental em Engenharia Agrícola (NEEA), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Cascavel – Paraná, utilizando delineamento experimental inteiramente casualizado. Os tratamentos utilizados foram o diesel de petróleo, e três diferentes tipos de biodiesel (crambe, soja e óleo residual de fritura), sendo o biodiesel utilizado puro (B100) e nas misturas binárias B10, B20 e B50. As cargas resistivas utilizadas foram de 1, 2, 3, 4 e 5 KW para cada tipo de combustível, com total de cinco repetições. Entre outras observações, foi avaliado o poder calorífico, o consumo específico (CE) e a eficiência energética (EE). O melhor CE foi o diesel com  $0,349 \text{ Kg KW h}^{-1}$  na carga 5 KW, seguido por BC20-2 com  $0,524 \text{ Kg KW h}^{-1}$  e o BC50-3 com  $0,433 \text{ Kg KW h}^{-1}$ . O biodiesel apresenta CE mais próximo do diesel com o aumento da carga resistiva, indicando que sua utilização em operações mais próxima da capacidade nominal é mais eficiente. Dentre os tipos de biodiesel, o de óleo de crambe apresentou menor CE, com alguns valores sem diferenças significativas (Tukey 5%) do CE do diesel, como o BC20-4 com  $0,383 \text{ Kg KW h}^{-1}$  e o BC10-5 com  $0,367 \text{ Kg KW h}^{-1}$ . As melhores EE foram DI-5 25,6%, BC100-5 25,5%, BC50-5 25,0%, BS100-5 24,8% e BORF100-5 24,6%. O biodiesel puro (B100) tende a apresentar melhor EE que as misturas binárias utilizadas. O BC100 apresentou EE de 9,9 17,8 21,8 24,3 e 25,5% respectivamente para as cargas resistivas de 1, 2, 3, 4 e 5 KW. Na gama de biocombustíveis avaliados, o de óleo de crambe obteve EE mais próxima ao do diesel, sendo que BC100 superou EE do diesel nas cargas 2, 3 e 4.

**PALAVRAS-CHAVES:** biodiesel, consumo específico de combustível, poder calorífico, eficiência energética, *Crambe abyssínica*.

RIGOTTE, Marcio Roberto. MSc, Western Paraná State University (UNIOESTE), February 2014. **Performance of engine-generator set using biofuels under varied loads.** Coordinating Professor: Dr. Deonir Secco.

### ABSTRACT

The rising demand for energy, coupled with its high cost and the search for sustainability propitiated in recent years an increase in demand for renewable biofuels, including biodiesel. Although Brazil, and specifically Paraná, present agricultural vocation, with diversity of raw materials for biodiesel production, it remains tied to demand compulsory. This work aimed to evaluate the energetic performance of an engine-generator set using diesel oil and biodiesel of different feedstocks. The experiment was conducted in the Experimental Nucleus for Agricultural Engineering (NEEA), State University of West Paraná (UNIOESTE), located in Cascavel - Paraná, using entirely randomized design. The treatments were diesel oil, and three different types of biodiesel (crambe, soybean and waste frying oil) being used pure biodiesel (B100) and the binary blends B10, B20 and B50. The resistive loads used were 1, 2, 3, 4 and 5 kW for each type of fuel, a total of five replications. Among other observations, we evaluated the heating value, specific fuel consumption (CE) and energy efficiency (EE). The best CE was diesel with 0,349 Kg KW h<sup>-1</sup> in the load 5 KW, followed by BC20-2 with 0,524 Kg kW h<sup>-1</sup> and BC50-3 with 0,433 Kg kW h<sup>-1</sup>. Biodiesel has the CE nearest of the diesel with increasing resistive load, indicating that its use in operation closest the rated capacity is more efficient. Among the types of biodiesel, the crambe oil showed lower CE, with some values without significant differences (Tukey 5%) of the diesel CE, as BC20-4 with 0,383 Kg kW h<sup>-1</sup> and BC10-5 with 0,367 Kg KW h<sup>-1</sup>. The best EE were DI-5 25,6%, BC100-5 25,5%, BC50-5 25,0%, BS100-5 24,8% and BORF100-5 24,6%. Pure biodiesel (B100) tends to show best EE that the binary blends used. The BC100 showed EE of 9,9 17,8, 21,8, 24,3 and 25,5% respectively for resistive load of 1, 2, 3, 4 and 50 KW. In the range of biodiesel evaluated, crambe oil obtained EE closer to diesel, and the BC100 exceeded diesel EE to the loads 2, 3 and 4.

**KEYWORDS:** biodiesel, specific fuel consumption, heating value, energy efficiency, *Crambe abyssínica*.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVO GERAL .....	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1 MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DO BIODIESEL .....	4
2.2 BIODIESEL .....	6
2.2.1 DEFINIÇÃO .....	6
2.2.2 OBTENÇÃO.....	6
2.2.3 CARACTERÍSTICAS .....	8
2.2.4 BIODIESEL NO BRASIL E NO PARANÁ .....	11
2.2.5 PERSPECTIVAS .....	13
2.3 MOTORES DE CICLO DIESEL UTILIZANDO BIODIESEL .....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	20
3.1 DESCRIÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO .....	20
3.2 COMBUSTÍVEIS .....	21
3.2.1 BIODIESEL .....	21
3.2.1.1 OBTENÇÃO.....	21
3.2.2.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS .....	22
3.3 CONJUNTO MOTOR-GERADOR.....	24
3.4 INSTRUMENTAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR-GERADOR.....	24
3.4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS .....	24
3.4.2 FLUXÔMETROS.....	24
3.4.3 TERMÔMETRO .....	25
3.4.4 ANALISADOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS.....	25
3.5 PARÂMETROS AVALIADOS.....	25
3.5.1 CONSUMO HORÁRIO VOLUMÉTRICO (Chv).....	25
3.5.2 CORREÇÃO DO VOLUME DO COMBUSTÍVEL.....	26
3.5.3 CONSUMO ESPECÍFICO (CE) .....	26
3.5.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	26
3.5.5 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA .....	27

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS.....	28
4.1.1 PODER CALORÍFICO .....	29
4.2 CONSUMO ESPECÍFICO.....	30
4.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	38
5. CONCLUSÃO.....	43
6. PERSPECTIVAS E SUGESTÕES .....	44
7. REFERÊNCIAS.....	45
ANEXOS .....	54
ANEXO A.....	54
ANEXO B.....	56

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar é vital para a obtenção de energia pelo homem e, apesar de o homem contar com várias fontes de energia, como a eólica, animal, fóssil e nuclear, indiretamente a maioria delas está associada à energia solar, como explicitado por Pimentel et al. (2008). Com a evolução tecnológica o homem ficou cada vez mais dependente de fontes energéticas, tanto para garantir seu *status quo*, como para suprir o processo em busca de novidades, mesmo que estas não sejam necessariamente essenciais.

Nos últimos anos há uma consciência mais generalizada quanto à necessidade de relacionar com mais intensidade a questão ambiental, situação evidenciada pelo uso constante de adjetivos como renováveis, limpos, ecológicos, etc. Na origem desta necessidade, além da consciência ecológica, está a percepção de que os combustíveis fósseis são findáveis e o custo elevado da energia, que atingiu patamares que justificam o investimento em fontes alternativas.

Segundo o relatório da International Energy Agency - IEA (2012), em 1973 a oferta mundial total de energia primária foi de 6,11 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (Gtep), e em 2010 foi de 12,72 Gtep, representando um aumento de 108,18%, ou seja, em apenas 37 anos a oferta energética global dobrou. Dentro deste aumento é visível a mudança proporcional observada, onde o petróleo, que representava 46,1% da energia em 1973, representou somente 32,4% em 2010, indicando que mesmo com significativo aumento no número absoluto houve queda no uso proporcional. Considerando somente as fontes que supriram o aumento da demanda energética entre os anos de 1973 e 2010, enquanto o petróleo, em números absolutos, teve um aumento de 46%, os biocombustíveis aumentaram sua contribuição em 98%.

Neste cenário, onde há demanda energética crescente e aumento dos índices de poluição, a agricultura desempenha papel primordial como fornecedora de matéria-prima para produção de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel. Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO (2013) destaca o potencial e a rápida formação do setor de biodiesel, o que é confirmado por Messineo, Volpe e Asdrubali (2012) ao apontarem crescimento das áreas destinadas

às culturas energéticas, com ênfase às destinadas a extração de óleo vegetal e produção de biodiesel.

Esta conjuntura torna o biodiesel uma alternativa frente a crescente demanda energética, desempenhando papel importante no quadro energético mundial, com potencial para desenvolvimento, especialmente no Brasil, principalmente por ser renovável e menos poluente, sendo possível projetar gradativo aumento da importância da biomassa que tende a aumentar proporcionalmente sua participação no fornecimento de energia nas próximas décadas.

Chegamos então a um paradoxo, onde há uma crescente oferta de energia, com uma influência cada vez menor do petróleo, porém sem aumento proporcional da utilização dos biocombustíveis, cujo potencial para substituição do petróleo já foi citado inúmeras vezes. Ocorre também que no país, em torno de 80% do biodiesel especificamente, utiliza soja (*Glycine Max L. Merril*) como matéria-prima, mesmo em regiões onde historicamente há diversidade na produção agropecuária.

Uma possível melhora nesta conjuntura passa não somente em buscar maior embasamento para determinação de planejamento na produção de matérias-primas para obtenção de biodiesel, mas também por possibilitar aos produtores e à indústria uma maior gama de dados regionalizados relativos ao tema, uma vez que a competitividade e o meio ambiente são fatores constantes. Portanto, é relevante a realização de trabalhos voltados a estas linhas de pesquisa que objetivem propor alternativas na geração de recursos renováveis.

Dentre as matérias primas para obtenção de biodiesel temos predominância de culturas que, além de atuarem como principal no ciclo agrícola, são geralmente inseridas com intensidade no setor alimentar. É o caso da soja, amplamente adaptada ao clima do país, utilizada em monocultivo intenso e com uma cadeia industrial de equipamentos tecnologia e processamento fortemente presente. Neste panorama, observa-se a inserção do crambe (*Crambe abyssínica*), uma cultura de inverno, não propícia para alimentação e apta para produção de biodiesel, necessitando de maior prospecção. É visível também o problema ambiental com a escassez de alternativas para o correto descarte dos óleos residuais de frituras, tanto da indústria como os domésticos, resíduos que quando incorretamente descartados acabam por resultar em danos ambientais.

Os trabalhos científicos com foco em biodiesel desenvolvidos nos últimos anos apresentam como característica, em sua maioria, a utilização de biodiesel oriundo de um tipo de matéria-prima, variando proporções de mistura, tempo de uso, tipo de esforço requerido, entre outros fatores. Há carência de estudos comparativos entre biodiesel oriundos de diferentes matérias-primas, como o realizado por Fiorese et al. (2011), ensejando assim área fértil para a realização de ensaios acadêmicos. Inserido neste tema, temos a pesquisa dos parâmetros de rendimento do motor utilizando biocombustíveis, uma vez que este difere em suas propriedades físico-químicas do diesel de petróleo, e mesmo entre biocombustíveis oriundos de diferentes matérias-primas há diferenças.

### **1.1 OBJETIVO GERAL**

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho energético operacional de conjunto motor-gerador utilizando como combustível o diesel de petróleo e diferentes tipos de biodiesel, obtidos a partir de óleo residual de fritura, óleo de soja (*Glycine Max L. Merril*) e óleo de crambe (*Crambe abyssínica*).

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o potencial do crambe como matéria-prima para produção de biodiesel;
- Obter dados comparativos sobre a utilização de diferentes biodiesel;
- Avaliar alternativas para o descarte dos óleos residuais de fritura;
- Avaliar o funcionamento dos motores de ciclo diesel quando utilizando biodiesel e a necessidade de adaptação.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DO BIODIESEL

O crambe (*Crambe abyssínica* Hoechst) é uma cultura oleaginosa, da família Brassicaceae, originária da Etiópia, de região de transição entre clima quente e temperado que posteriormente adaptou-se também a clima mais frio e seco, com ciclo produtivo curto, de inverno, possuindo elevado teor de óleo e alto potencial como matéria-prima para obtenção de biodiesel (WAZILEWSKI et al., 2012; FEROLDI et al., 2012).

Segundo Faculdade Assis Gurgacz – FAG (2013), a cultura é rústica, possui sistema radicular agressivo com potencial descompactador, com ciclo podendo variar de 77 a 136 dias, dependendo das condições edafoclimáticas. Os autores ressaltam que a inserção do crambe não deve objetivar o monocultivo, mas sim a rotação de cultura, com potencial para geração de renda devido ao seu alto teor de óleo para produção, entre outros produtos, de biodiesel, sendo porém fundamental a continuidade dos estudos relativos a sua adaptação á região oeste do Paraná, principalmente no tocante a sua utilização como cultura de 2ª safra (safrinha).

Para Chaves et al. (2012) com as confirmações advindas das pesquisas em torno do potencial de produção de óleo do crambe, a cultura passou de coadjuvante com finalidade de cobertura do solo a elemento chave no planejamento da produção agrícola, com potencial para utilização na produção de biodiesel. De acordo com Wazilewski et al. (2013), o biodiesel de óleo de crambe é mais estável oxidativamente que o biodiesel de óleo de soja, mantendo as características do combustível por tempo mais prolongado.

Em experimento realizado na região noroeste do estado do Paraná, Santos et al. (2013) avaliaram a produção de crambe sob doses de potássio, observando variações de 670 a 1450 Kg ha<sup>-1</sup>, sendo que a produção de óleo permaneceu na limite entre 240 a 600 Kg ha<sup>-1</sup>. Soratto et al. (2013) também avaliaram a produção do crambe sob adubação variada, no estado de São Paulo, obtendo valores que variaram de 539 a 2209 Kg ha<sup>-1</sup> para a produção de grãos e de 34,4 a 36,4% de óleo no grão.

A soja (*Glycine Max L. Merril*) pertence à família Fabaceae, sendo uma leguminosa com grão rico em proteínas, com teores de óleo próximos a 20%, sendo

empregada tanto para alimentação humana e animal quanto industrialmente para produção de sabão, resinas, cosméticos, tintas e biodiesel, entre outros usos. Segundo Reis et al. (2013), o fato de ser uma cultura já estabelecida, com características edafoclimáticas que permitem sua instalação em grande parte do país, torna a cultura uma das melhores opções para obtenção de óleo para produção de biodiesel.

Para Peres e Beltrão (2006), outros fatores que tornam a cultura da soja uma boa opção para produção de biodiesel são a grande área produtiva que proporciona escala de produção e a organização da cadeia produtiva já estabelecida, além de um mercado já organizado por tratar-se de uma grande commodity agrícola. Ressaltam ainda que estas características qualificam a soja como precursora do mercado de biodiesel de óleos vegetais, abrindo caminho para posterior inserção de outras culturas.

A produção de biodiesel pode também, indiretamente colaborar com a resolução de um problema ambiental. Como citado por Alvarenga e Soares (2010), existem vários resíduos contaminantes que são erroneamente descartados, como o óleo residual de fritura, o qual pode ser reaproveitado para a produção de biodiesel. Para Costa Neto et al. (2000) a fritura é um processo que utiliza gorduras vegetais para transferência de calor, resultando posteriormente em óleos residuais, com potencial de dano ambiental porém com vocação para matéria-prima para produção de biodiesel, conferindo valor comercial a um rejeito até então indesejado.

Os óleos vegetais, quando descartados de maneira impróprio no meio ambiente, possuem alto poder de causar danos ao meio ambiente. Segundo Ghesti et al. (2011), quando lançados na água os óleos vegetais acumulam-se na superfície dificultando a penetração de oxigênio e luz, e quando em contato com o solo também promovem uma impermeabilização, impedindo a infiltração da água ou mesmo as trocas gasosas. Em qualquer dos casos a consequência do descarte incorreto dos óleos vegetais acarreta danos com elevado custo ambiental. Moraes et al. (2013) ressaltam que, apesar da variação nas propriedades, o biodiesel obtido a partir de óleos residuais de fritura apresenta como vantagem mais relevante a redução do impacto poluidor.

Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais - ABIOVE (2013), a capacidade instalada de refino de óleos vegetais no Brasil em

2013, era de 24.310 toneladas por dia. Não foram encontrados dados precisos sobre qual proporção desta quantidade foi destinada para fins comestíveis, pois eles também podem ser usados na fabricação de biodiesel, tintas, vernizes, ceras, lubrificantes, sabões e outros produtos. Porém, a produção total de óleos vegetais nos permite constatar que há uma grande utilização alimentícia e conseqüentemente grande “oferta” de resíduos que, se por um lado são altamente poluidores, por outro apresentam potencial para utilização como matéria-prima na fabricação de biodiesel de qualidade.

## **2.2 BIODIESEL**

### **2.2.1 DEFINIÇÃO**

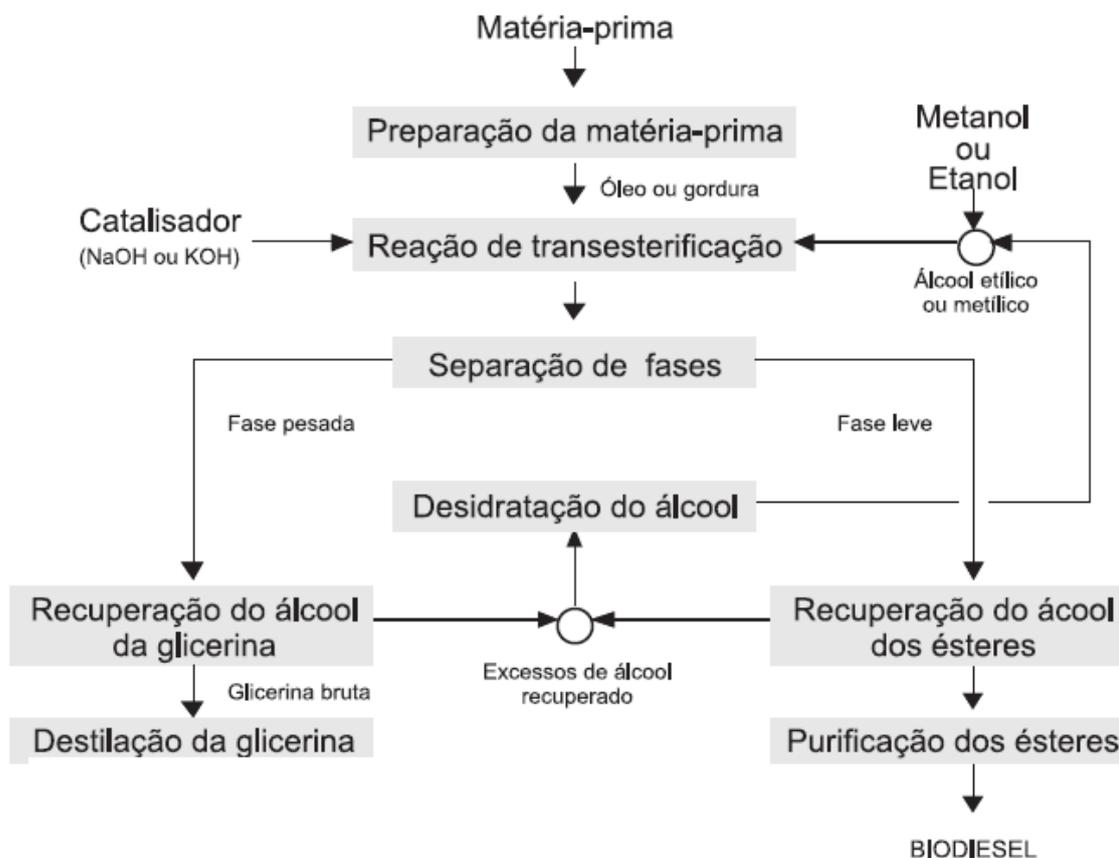
Brasil (2005) de forma genérica define biodiesel como “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.” De forma mais específica, Brasil (2012), na Resolução nº 14, de 11 de maio de 2012, no Art. 2, define biodiesel como “combustível composto de alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de gorduras de origem vegetal ou animal”.

Para Silva e Freitas (2008), biodiesel é um combustível biodegradável, oriundo de fontes renováveis como óleos vegetais ou gorduras animais. Sua utilização pode ocorrer sob mistura em diferentes proporções ao diesel mineral ou puro. A denominação utilizada para o biodiesel é BX, onde “X” indica a percentagem de biodiesel na mistura com diesel de petróleo, sendo B100 biodiesel puro e, por exemplo, B20 o combustível com 20% de biodiesel e 80% de diesel de petróleo (PINTO et al., 2005).

### **2.2.2 OBTENÇÃO**

A principal rota de obtenção do biodiesel é pela reação de transesterificação de ácidos graxos dos óleos vegetais ou animais com álcoois de cadeia curta, processo utilizado pela maioria das indústrias de biodiesel (MENEGETTI et al., 2013). Os álcoois empregados na transesterificação geralmente são de cadeia curta como metanol e etanol, sendo este último mais barato, mais abundante, menos

tóxico, porém menos reativo, necessitando maior quantidade (QUINTELLA et al., 2009). A Figura 1 apresenta de forma esquemática as fases do processo da transesterificação para obtenção do biodiesel.



**Figura 1.** Organograma da obtenção do biodiesel por meio da transesterificação. Adaptado de Brasil (2006).

Para Pinto et al. (2005), o processo de transesterificação industrial pode ser resumido considerando-se o óleo em um reator principal e o álcool e o catalisador homogeneizados em um reator secundário e posteriormente transferidos para o reator principal. Após aproximadamente 40 minutos a temperatura de 30 a 40°C a reação é completada, resultando em duas fases: a camada superior (biodiesel) e a camada inferior (glicerina mais álcool). O álcool pode ser recuperado e a glicerina purificada para outras utilizações.

Para Teixeira (2005), antes de serem submetidos ao processo de transformação em biodiesel, os óleos vegetais devem ser degomados e filtrados, não devem conter acidez livre acima dos limites, sob pena de acréscimo no consumo de catalisadores e devem conter o mínimo possível de umidade, evitando

que o processo produza sabão. Segundo o autor, os óleos vegetais apresentam-se muito mais viscosos quando comparados ao diesel, porém após o processo de transesterificação, o biodiesel apresenta características físico-químicas próximas às do diesel de petróleo. Fernandes Júnior et al. (2012) fazem observação semelhante quanto ao biodiesel a base de óleos de origem animal.

### **2.2.3 CARACTERÍSTICAS**

Diferentes matérias-primas resultam em biodiesel com diferentes características, pois óleos vegetais são compostos por diferentes ácidos graxos, sendo possível identificar pelo biodiesel qual foi a matéria-prima e o álcool utilizados (ROCHA et al., 2008). Pinto et al. (2005) citam como principais diferenças entre os óleos vegetais o número de cetanos, ponto de fusão, calor da combustão e viscosidade, que aumentam com o comprimento da cadeia dos ácidos graxos e decrescem com o aumento da insaturação. O ideal para produção de biodiesel são óleos ricos em cadeias longas e pouco insaturados. Devem ser considerados também os custos e a escala de produção, a percentagem de óleo na planta e o rendimento de óleo por área cultivada.

A produção de biodiesel deve ser planejada de forma a obter-se produto com características que permitam sua utilização em substituição ao diesel de petróleo. Para Parente (2003), a viabilidade técnica de um combustível para motores diesel pode ser analisada por suas propriedades, dando destaque como principais propriedades físicas:

- Viscosidade – caracteriza a resistência do líquido ao escoamento;
- Densidade – relaciona a massa por um determinado volume;
- Lubricidade – poder de lubrificação do combustível;
- Ponto de névoa – temperatura em que, sob refrigeração, o líquido começa a ficar turvo;
- Ponto de fluidez – temperatura na qual o combustível não mais esco livremente;
- Ponto de fulgor – temperatura em que o combustível é inflamável na presença de chama ou faísca;

- Poder calorífico – quantidade de energia por unidade de massa fornecida por um combustível quando ele é queimado;
- Índice de cetano – corresponde ao percentual volumétrico de cetanos, indicando o período de tempo entre o início da injeção e o início da ignição. Quanto maior o índice melhor a combustão do combustível;
- Teor de enxofre – quando presente, os produtos resultantes de sua composição são danosos ao meio ambiente. É ausente no biodiesel;
- Poder de solvência – capacidade de dissolver outras substâncias.

Em comparação com o diesel, o biodiesel é mais denso e viscoso, o que aumenta a heterogeneidade na combustão; tem maior número de cetanos, elevando a qualidade da ignição do combustível; maior ponto de fulgor, que confere mais segurança no transporte e armazenamento; e valores mais altos de ponto de névoa, de entupimento de filtro a frio e de fluidez, tendendo a solidificação parcial e entupimento de filtros a temperaturas mais baixas (LÔBO; FERREIRA, 2009).

Ao analisarem comparativamente diesel de petróleo e biodiesel oriundo de pinhão manso (*Jatropha curcas*), Krishnakumar et al. (2008) detectaram que a viscosidade a 40°C, apesar do valor do biodiesel (4,82 cSt<sup>1</sup>) ficar acima do diesel (2,86 cSt), é um valor dentro das normas ASTM<sup>2</sup> para biodiesel. O ponto de névoa e o ponto de fluidez do biodiesel foram, respectivamente, 8 e -2°C, enquanto o diesel apresentou 5 e -6°C. Quanto ao ponto de fulgor e o ponto de combustão, o biodiesel apresentou valores de 128 e 136°C, comparativamente a 65 e 78°C do diesel. O poder calorífico do biodiesel (42,80 MJ Kg<sup>-1</sup>) foi inferior ao do diesel (44,34 MJ Kg<sup>-1</sup>).

A quantidade de energia liberada durante a oxidação de uma quantidade definida de combustível é denominada poder calorífico, portanto quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida. Segundo Soranso et al. (2008), o poder calorífico do biodiesel é menor quando comparado ao diesel de petróleo, o que reflete em maior consumo de combustível para obter a mesma energia.

Silva et al. (2012a), ao analisarem o funcionamento de um conjunto motor-gerador com diferentes proporções de biodiesel oriundo de gorduras residuais de

---

<sup>1</sup> No Sistema Internacional, a unidade da viscosidade cinemática é m<sup>2</sup>/s. No sistema CGS é utilizada a unidade Stokes (St), sendo preferível utilizar a forma centistokes (cSt). 1 Stokes = 100 cSt = 100 mm<sup>2</sup>/s = 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s.

<sup>2</sup> ASTM International, originalmente conhecida como American Society for Testing and Materials, é um órgão estadunidense de normalização que publica normas técnicas.

agroindústrias de abate de aves concluíram que o poder calorífico superior de uma mistura diesel/biodiesel regride linearmente com o acréscimo dos teores de biodiesel, apresentando como valores de poder calorífico superior para B0 44,351 MJ Kg<sup>-1</sup>, para B20 43,666 MJ Kg<sup>-1</sup>, para B40 42,347 MJ Kg<sup>-1</sup>, para B60 41,120 MJ Kg<sup>-1</sup> e para B100 38,440 MJ Kg<sup>-1</sup>.

O menor poder calorífico acaba por significar um maior consumo específico de combustível e uma menor potência gerada. Errasti Cabrera et al. (2013), ensaiando motor diesel utilizando biodiesel de pinhão manso (*Jatropha curcas*) em bancada dinamométrica, observaram que, em relação ao diesel puro, houve aumento do consumo específico de combustível de 6,4% quando utilizado B10 e 11,3% com B20. Quanto à potência observada, a redução foi de 4,7% utilizando B10 e 5,9% durante o uso de B20, sempre comparativamente ao diesel puro.

Quando comparado ao diesel de petróleo, o biodiesel apresenta características importantes que devem ser levadas em consideração, como o maior consumo volumétrico e a menor estabilidade de armazenamento. Acevedo e Mantilla (2011) observaram que o biodiesel apresenta densidade de combustível menor que o diesel normal, necessitando mais volume para fornecer a mesma energia, além de viscosidade mais elevada, o que interfere no ponto de névoa e no ponto de fluidez, e baixa estabilidade oxidativa, limitando o tempo de armazenamento, características que também são observadas por Da Cunha et al. (2009).

A estabilidade oxidativa, que representa a suscetibilidade do combustível às mudanças físicas e químicas por oxidação quando exposto ao ar, é um fator importante no biodiesel, afetando a qualidade e o desempenho (FERRARI e SOUZA; 2009). Zuleta et al. (2012) demarcam que esta característica é dependente da matéria-prima que deu origem ao biodiesel, devendo ser levado em consideração no planejamento de cadeias produtoras, pois quanto menor a estabilidade oxidativa maior a necessidade de antioxidantes a fim de evitar a degradação dos materiais dos sistemas com os quais o biodiesel entre em contato.

McCormick e Westbrook (2007) relatam vários estudos que apresentam as consequências da utilização de biocombustível degradado devido à baixa estabilidade oxidativa. Entre os exemplos, ressalta-se a possibilidade de separação do combustível em duas fases, ocasionando problemas operacionais com o sistema de injeção de combustível, inclusive com a bomba injetora e também a possibilidade

de formação de depósitos no sistema. Pode ocorrer também a formação de níveis elevados de ácidos, corroendo assim as partes de metais do sistema, sendo recomendada a adição de aditivos para armazenamentos superiores a seis meses.

Fator importante a ser considerado na caracterização do biodiesel é que o mesmo não contém enxofre, elemento que ocasiona desgastes no motor e chuva ácida. Além disto, a combustão do biodiesel gera menos poluentes que o diesel, uma vez que a quantidade de CO<sub>2</sub> lançada na atmosfera foi captada durante o crescimento da planta que originou a matéria-prima (GUARIEIRO, et al., 2008; FERRARI; OLIVEIRA; SCABIO, 2005). Um bom exemplo é o estudo realizado por Kozerski e Hess (2006) que analisaram as emissões de ônibus metropolitanos e observaram que, utilizando diesel e biodiesel de óleo de soja, houve emissão de, respectivamente 16.414,6 e 7.715,4 Kg de CO por mês.

#### **2.2.4 BIODIESEL NO BRASIL E NO PARANÁ**

O Brasil é um país com vocação natural para agricultura, sendo o clima e o solo adequados para uma ampla gama de culturas que podem servir de matéria prima para a produção de biodiesel, inclusive culturas que não competem com as alimentares (QUINTELLA et al., 2009). Silva e Freitas (2008) consideram que para obter eficiência energética e econômica com culturas visando produção de biodiesel, as práticas agrícolas utilizadas são fatores determinantes. Para tanto, é necessário uma assistência técnica de qualidade, capacitada para além de selecionar dentre as melhores opções disponíveis a que melhor se adapta as condições de cada caso, também propor novas técnicas que visem melhorar as práticas em questão.

Cada região do país tem suas características que direcionam o planejamento da cadeia de obtenção do biodiesel. Para Brasil (2006), as culturas oleaginosas consideradas potenciais para a produção de biodiesel e adaptadas para a região sul do país são girassol (*Helianthus annuus*), soja (*Glycine Max L. Merrill*), amendoim (*Arachis hypogaea L.*), colza (*Brassica napus*) e eventualmente mamona (*Ricinus communis L.*) e algodão (*Gossypium sp.*), destacando a alta produtividade obtida pelos agricultores da região, o que favorece um dos objetivos que é o adensamento energético, visando obter maior potencial energético por unidade de área.

Quanto às usinas produtoras de biodiesel, o Brasil conta hoje com uma capacidade autorizada para produção de biodiesel superior à produção, a qual anda atrelada com a demanda compulsória legal. Segundo Brasil (2013a), em maio de 2013, o país contava com 67 usinas produtoras de biodiesel autorizadas, com capacidade produtiva de mais de 7 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  ( $21.397,06 \text{m}^3 \text{dia}^{-1}$ ), enquanto a produção ficou próxima à demanda compulsória, em torno de  $2.800.000 \text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ , demonstrando espaços para avanços na produção de biodiesel, característica esta que se repete quando analisada somente a região sul do país. Estes dados demonstram que atualmente a utilização do biodiesel ocorre somente nos termos exigidos pela legislação, mesmo com disponibilidade de matéria-prima para sua fabricação.

Segundo Brasil (2013b), às matérias-primas para produção de biodiesel no Brasil, no acumulado até março de 2013 apresentavam três integrantes principais: soja (69,3%), gordura bovina (21,1%) e algodão (4,0%), sendo que todas as regiões do país, com exceção do norte, apresentam o óleo de soja como principal matéria-prima. Quanto à região sul do país, o óleo de soja, em abril de 2013, deu origem a 80,59% do biodiesel produzido, sendo o restante oriundo de gordura bovina (17,22%), gordura de porco (1,59%), óleo de fritura usado (0,21%), óleo de nabo forrageiro (0,36%) e gordura de frango (0,02%) (BRASIL, 2013a).

Somadas, as duas principais matérias-primas (soja e gordura bovina) dão origem a mais de 90% do biodiesel produzido, tanto nacionalmente como na região sul, mesmo quando considerada a produção dos últimos cinco anos (BRASIL, 2013c), expondo assim uma dependência destas duas fontes para produção de biodiesel.

Esta dependência de óleo de soja para produção de biodiesel na região sul do país é contrastante com a diversidade da cadeia produtiva primária que o estado do Paraná apresenta, a qual tem potencial para diversificar as matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel. O estado do Paraná, segundo dados do Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social - IPARDES (2013), apresentou produção agropecuária em 2012 cuja participação na produção nacional foi significativamente alta, contribuindo com o abate de 26,30% das aves, 19,69% dos suínos e 4,28% dos bovinos, sendo também um dos maiores produtores nacionais de grãos.

Peixoto (2008) complementa que além da necessidade de diversificação do material de origem do biodiesel, há a necessidade de desenvolvimento tecnológico e agrônômico, no intuito de tornar o biodiesel uma alternativa produtiva viável, permitindo assim maior transformação do potencial do biodiesel em realidade.

Uma opção que a produção de biodiesel oferece é a possibilidade de dar destinação a resíduos que normalmente são rejeitados. Barros, Wust e Meier (2008) utilizaram resíduos de caixas de gordura como matéria-prima para produção de biodiesel, transformando um dejetos em um produto com valor econômico, gerando renda e empregos, mesmo que em pequena escala.

### **2.2.5 PERSPECTIVAS**

Dabdoub e Bronzel (2009) consideram que, apesar do potencial de utilização do biodiesel, ainda não ocorreu seu uso enquanto produto sustentável e competitivo, demonstrando grande oportunidade de pesquisa acadêmica e industrial, principalmente no tangente a diferentes matérias-primas, à composição química do óleo extraído, ao rendimento energético e aos custos. Outra análise é emitida por Christophe et al. (2012) ao questionarem a sustentabilidade futura da utilização de óleos vegetais frente à característica exponencial da demanda energética e a possibilidade de concorrência com a produção de alimentos.

Masiero e Lopes (2008) em estudo sobre as perspectivas para o biodiesel verificaram que o Brasil é indicado em vários estudos como um dos principais líderes no setor de bioenergia. Maricato, Noronha e Fujino (2010) indicam a mesma conclusão, ressaltando, porém que uma extensa fronteira agrícola não basta, sendo necessário também o domínio tecnológico do processo, desde o cultivo agrícola até a produção do biodiesel. Neste sentido, os autores relatam que em pesquisa quanto à produção tecnológica através da análise de patentes, escassas são de empresas brasileiras e geralmente concentradas em poucas áreas de estudo. Afirmam ainda que o Brasil tem condições de tornar-se líder em tecnologias, devendo-se, no entanto pensar no conjunto de tecnologias para a cadeia produtiva do biodiesel e em políticas efetivas para a inserção do biodiesel na matriz energética.

Num contexto mais amplo, a intensificação do uso do biodiesel proporciona uma série de benefícios. Quintella et al. (2009) citam como principais as melhoras ambientais através das reduções das emissões causada pela queima do

combustível, o desenvolvimento social rural principalmente pela ampliação das alternativas de cultivo e renda e a independência energética de fornecedores externos de combustível, uma vez que possibilita a obtenção interna de energia.

### **2.3 MOTORES DE CICLO DIESEL UTILIZANDO BIODIESEL**

Com a evolução da tecnologia, a força de trabalho manual no meio agrícola foi paulatinamente convertida pelo trabalho mecanizado, sendo que na atualidade, a quase totalidade do trabalho é realizada por máquinas equipadas com motores de ciclo diesel. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006), os tratores existentes nos estabelecimentos agropecuários em 2006 totalizavam 788.053 unidades, resultando em uma proporção de 1,518 tratores por estabelecimento agropecuário.

Os dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA (2013) apresentam que o número de unidades vendidas no atacado no mercado interno no ano de 2012 (entre cultivadores motorizados, tratores de roda e de esteira, colhedoras e retroescavadoras) totalizou 70.139, um aumento de 35,95% em relação à média da última década. Deste total, 55.819 unidades foram tratores de rodas vendidos em 2012. No estado do Paraná foi vendido, em 2012, o total de 7.125 tratores de rodas e 1.587 colhedoras, que representam, respectivamente 12,77 e 25,28% do total nacional, demonstrando um perfil mecanizado, conseqüentemente suscetível a avanços tecnológicos que influenciem o consumo energético do diesel de petróleo ou eventuais substitutos, como o biodiesel.

O motor “ciclo diesel”, como é conhecido, foi invenção do alemão Rudolph Diesel, e utilizava inicialmente óleo de amendoim e na sequência diversos outros óleos vegetais. O alto custo das matérias primas vegetais fez com que estas fossem substituídas pelo petróleo (óleo diesel), que apresentava baixo custo, densidade energética e disponibilidade (SILVA; FREITAS, 2008).

Uma preocupação inicial com a utilização do biodiesel em substituição ao diesel de petróleo é quanto às modificações necessárias no motor de modo a permitir a utilização do combustível alternativo. Pinto et al. (2005) afirmam não serem necessárias grandes modificações nos motores de ciclo diesel para efetuar a substituição do diesel pelos ésteres de óleos vegetais. Guarieiro et al. (2008) corroboram a assertiva incluindo que além dos óleos vegetais serem substitutos

adequados para o diesel de petróleo, o biodiesel é a alternativa mais viável de transformar óleos vegetais em combustíveis eficientes em motores por compressão.

Pinto et al. (2005), ressaltam porém que a utilização de óleos vegetais em motores de ciclo diesel possibilita a ocorrência de vários problemas, entre eles o espessamento do óleo lubrificante por contaminação com óleo vegetal, a formação de depósitos de carbono devido a combustão incompleta ocasionada pela maior viscosidade e volatilidade, e uma menor potência e eficiência térmica do conjunto. Estas observações permitem refletir que apesar do biodiesel poder ser utilizado em motores de ciclo diesel sem maiores modificações, as misturas binárias com maior proporção de biodiesel tendem a apresentar problemas secundários como os elencados acima.

Corrêa, Maziero e Storino (2011) realizaram ensaios em bancada dinamométrica através da tomada de potência de trator agrícola, utilizando mistura de 5% de biodiesel de sebo bovino ao diesel comercial durante 600 horas de funcionamento do motor (marca MWM, modelo D229.3, que usualmente utiliza bomba injetora Bosch em linha). Apesar de haver indícios de leve redução de potência e aumento de consumo, o uso da mistura com biodiesel apresentou-se exequível para uso prolongado em motores ciclo diesel de injeção direta, não sendo observado desgaste interno anômalo.

Analogamente, ao avaliarem a utilização de biodiesel de soja puro (B100) em comparação com diesel de petróleo em um motor quatro cilindros de ciclo diesel submetido a diferentes níveis de rotação, Volpato et al. (2009) concluíram pela viabilidade da utilização de biodiesel de soja puro (B100) como combustível substituto ao diesel.

Apesar de alguns trabalhos apresentarem como completa a adaptação do biodiesel ao motor de ciclo diesel, outros resultados mais detalhados permitem observar alguns problemas. Lôbo e Ferreira (2009) citam que a elevada viscosidade do biodiesel prejudica sua atomização, ocasionando heterogeneidade na combustão e possibilidade de deposição de resíduos nas partes internas do motor. Outra característica negativa citada pelos autores refere-se ao fato do biodiesel ter ponto de fluidez, de entupimento de filtro a frio, de névoa e de solidificação a temperaturas mais elevadas quando comparadas as do diesel de petróleo, o que pode ocasionar problemas se a máquina não for devidamente adaptada.

Xue et al. (2011), ao revisarem publicações científicas sobre o desempenho de motores diesel utilizando biodiesel observaram que, apesar da necessidade de mais estudos conclusivos, principalmente em ensaios de longa duração, algumas trabalhos concluem que o uso de biodiesel em substituição ao diesel tende a ocasionar redução de depósitos de carbono e também menor desgastes de peças do motor. A redução dos depósitos de carbono ocorreria, segundo os autores, devido à menor formação de fuligem durante a combustão e o menor desgaste seria devido a maior lubricidade inerente ao biodiesel, que reduziria a fricção. Estas características permitem supor que o uso do biodiesel permitira prolongar, ou mesmo manter, a vida útil do motor, sendo necessário porém, aprofundar estes estudos e avaliar conjuntamente com outros parâmetros.

Utilizando misturas de diferentes concentrações de biodiesel de soja no diesel como combustível de um motor de ciclo diesel sob diferentes demandas de carga, Reis et al. (2013) verificaram que com a elevação da concentração de biodiesel houve acréscimo nas emissões de oxigênio ( $O_2$ ) e de óxido de nitrogênio ( $NO_x$ ). Ocorreu também redução nas emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), a qual praticamente extinguiu-se em concentrações de biodiesel acima de 80%. Esta tendência é observada também com a utilização de biodiesel oriundo de outras matérias-primas.

Reis et al. (2013) também avaliaram a temperatura dos gases de escape como parâmetro para determinar a eficiência do processo de combustão e verificaram que com a elevação da concentração de biodiesel houve acréscimo na eficiência de combustão devido à menor temperatura dos gases. Como explicação ao fato, os autores citam que o biodiesel apresenta maior quantidade de moléculas livres de oxigênio, ocasionando mais equilíbrio entre combustível e comburente. Este dado deve ser observado com ressalvas, uma vez que, como veremos no decorrer desta revisão, vários trabalhos apontam que elevadas concentrações de biodiesel tendem a apresentar queima deficitária do combustível devido a problemas com sua atomização ineficiente.

Uma das principais características benéficas do consumo de biodiesel é sua capacidade de ser menos poluente em suas emissões do que o diesel de petróleo. Rinaldi et al. (2007) afirmam que a queima do diesel causa mais fuligem que a do

biodiesel, pois este não possui compostos aromáticos que podem sofrer combustão incompleta, provocando menor interferência na qualidade do ar.

O Consumo Específico de Combustível (CE) representa a quantidade, em massa, de combustível utilizado para disponibilizar determinada quantidade de energia. Por representar relação direta entre o consumo mássico de combustível e o trabalho realizado, permitindo assim comparações eficientes entre diferentes combustíveis e regimes de operação, este parâmetro de análise tem sido utilizado em vários trabalhos como os de Soranso et al. (2008), Tabile et al. (2009), Volpato et al. (2012) e Silva et al. (2012a), entre vários outros autores.

Utilizando diesel comercial (B5) comparativamente com misturas contendo 10, 20 e 100% (B10, B20 e B100) de biodiesel de soja como combustível de motor ciclo diesel de trator com tomada de potência em bancada dinamométrica, Nietiedt et al. (2011a), verificaram redução de potência com o aumento da proporção de biodiesel, o que poderia ser explicado pelo menor poder calorífico do biodiesel. Como houve distanciamento entre as curvas a partir de certo momento, deduziram que, como o biodiesel é mais viscoso, houve atomização ineficiente do combustível, prejudicando a queima do combustível. Como o biodiesel apresenta mais cetanos, que beneficia a queima do combustível, até certas proporções de biodiesel a viscosidade tem sua interferência anulada.

Quanto ao consumo específico, os mesmos autores observaram que a mistura B100 apresentou consumo 10,9% superior ao B5. Já as diferenças de consumo específico entre as misturas B5 e B10 e entre B10 e B20 não foram significativas, apesar da mistura B10 apresentar o menor consumo específico do ensaio. Utilizando biodiesel a partir de gorduras residuais de aves, Silva et al. (2012a) observaram que o consumo específico utilizando B100 como combustível foi 23% maior em relação ao B0. Em condições similares, Maziero et al. (2006) detectaram acréscimo de 21,8% no consumo específico de combustível quando utilizando B100 de biodiesel de girassol. Godeša, Jejčič e Poje (2010), utilizando biodiesel de canola em motor diesel também verificaram perda de potência e torque e aumento no consumo específico de combustível.

Salvador, Mion e Benez (2009) ao analisarem a conversão de energia e o consumo específico de combustível de trator agrícola atuando em diferentes sistemas de preparo periódico do solo, concluíram que valores baixos de consumo

específico representam uma otimização conjunta do desempenho do motor, da eficiência tratórea e da acomodação do implemento à fonte de tração.

Grotta et al. (2008) avaliaram o desempenho de trator agrícola tracionando grade aradora utilizando biodiesel do tipo etílico filtrado, a base de óleo residual de soja, nas proporções de 0, 25, 50, 75 e 100% de mistura com diesel de petróleo. Quanto à potência na barra de tração, somente para B100 houve diferença significativamente inferior, principalmente com o aumento da velocidade de deslocamento do trator. Quanto à capacidade de campo ( $\text{ha h}^{-1}$ ) também houve queda significativa com a utilização de B100 em velocidades maiores, atribuída ao reduzido poder calorífico do biodiesel e conseqüente queda no desempenho do motor, implicando em menor capacidade de campo efetiva. Concluíram que a utilização de biodiesel até a proporção de 50% não compromete o desempenho do trator.

Tabile et al. (2009) analisaram o desempenho operacional através do consumo de combustível de conjunto trator-escarificador utilizando biodiesel etílico destilado oriundo de mamona em diferentes proporções. Observaram que conforme houve aumento na proporção de biodiesel, ocorreu o mesmo para o consumo horário volumétrico, ponderal e específico de combustível, porém com o aumento da carga na barra de tração, o consumo horário volumétrico e ponderal aumentaram, mas houve decréscimo no consumo específico de combustível.

Utilizando diferentes proporções (0, 5, 15, 25, 50, 75 e 100%) de biodiesel (50% etílico e 50% metílico) de óleo residual de frituras em trator agrícola a fim de avaliar o desempenho dinâmico, Soranso et al. (2008) detectaram que além da mistura de biodiesel etílico com metílico não limitar o funcionamento do trator, houve acréscimo de 15,5% no consumo horário volumétrico, 16% no consumo por área trabalhada e 18% no consumo específico de combustível do biodiesel puro em relação ao diesel de petróleo. Apesar de a potência na barra de tração não apresentar diferenças significativas entre as diferentes proporções de biodiesel, o rendimento efetivo na barra de tração decresceu 14% do B100 em comparação ao B0.

Um enfoque interessante é o conceito de Eficiência Energética (EE), abordado por Mialhe (1996) sob a nomenclatura Rendimento Termo-mecânico ou Global, referindo-se a eficiência com que o motor de combustão interna disponibiliza

como energia mecânica a energia contida no combustível após sua utilização, ou seja, ao rendimento, em porcentagem, relacionando a entrada de energia química com o fornecimento de energia, no nosso caso energia elétrica por tratar-se de conjunto motor-gerador. Ressalta-se que além da existência de outros fatores que influenciam nesta eficiência, como o modelo do motor, o fato da EE não considerar os valores absolutos de energia produzida, mas valores proporcionais à quantidade previamente contida no combustível consumido para gerá-la.

Existem várias possibilidades de matérias-primas para efetuar a produção de biodiesel, porém, segundo Dabdoub e Bronzel (2009) é necessário correlacionar as substâncias da matéria-prima com o biodiesel, pois estas características interferem nas propriedades físicas e químicas, afetando a queima do biodiesel no motor e interferindo diretamente na eficiência, no desgaste, na formação de depósitos e nas emissões.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido no Laboratório de Gaseificação e Micro Geração de Eletricidade da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Cascavel - PR, latitude 24° 59' Sul, longitude de 53° 26' Oeste com altitude de 682 metros, entre os dias 02 e 15 de outubro de 2013.

O ensaio de desempenho utilizou delineamento experimental inteiramente casualizado, com 5 repetições. Conforme pode ser visualizado na Tabela 1, os tratamentos utilizados foram o diesel de petróleo (DI) e biodiesel oriundo de três diferentes matérias-primas, sendo elas o BC - óleo de crambe (*Crambe abyssínica* Hoechst), BS - óleo de soja (*Glycine Max L. Merrill*) e BORF - óleo residual de frituras, em cinco diferentes proporções (10, 20, 50 e 100%) com diesel de petróleo, em conjunto motor-gerador, com alternância de cargas.

**Tabela 1.** Descrição dos tratamentos e respectivas siglas

Sigla	% Diesel	% Biodiesel de Crambe	% Biodiesel de Soja	% Biodiesel de Residual de Fritura
DI	100	-	-	-
BC10	90	10	-	-
BC20	80	20	-	-
BC50	50	50	-	-
BC100	-	100	-	-
BS10	90	-	10	-
BS20	80	-	20	-
BS50	50	-	50	-
BS100	-	-	100	-
BORF10	90	-	-	10
BORF20	80	-	-	20
BORF50	50	-	-	50
BORF100	-	-	-	100

As cargas resistivas relativas ao regime de trabalho de motor-gerador, utilizadas para cada mistura citada anteriormente, foram de 1, 2, 3, 4 e 5 KW, totalizando 6 cargas resistivas para cada mistura de diesel/biodiesel. As referidas cargas foram nominadas com a adição do seu valor após a sigla do tratamento, por

exemplo, DI-2 é o tratamento com 100% de diesel na carga de 2 KW e BC100-5 o tratamento com 100% de biodiesel de crambe na carga de 5 KW.

## **3.2 COMBUSTÍVEIS**

O diesel de petróleo foi adquirido em estabelecimento comercial da região, habitualmente utilizado em máquinas agrícolas. O diesel de petróleo apresentou composição B5, ou seja, continha 5% de biodiesel em sua composição, devido à legislação vigente no país, sendo considerado como B0 devido à impossibilidade de identificação da matéria prima de origem deste biodiesel.

### **3.2.1 BIODIESEL**

#### **3.2.1.1 OBTENÇÃO**

O biodiesel foi obtido através de processo de transesterificação pela via metílica em procedimento realizado no Laboratório de Biocombustíveis da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, campus Cascavel – PR.

Para obtenção do biodiesel foi utilizado à proporção de 400 ml de óleo bruto da matéria-prima, 100 ml de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) e 2,6 g de hidróxido de potássio (KOH). O óleo bruto foi filtrado e aquecido à temperatura de  $60^\circ\text{C}$ , utilizando placa aquecedora com agitador mecânico. Foi então adicionado à mistura de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) com hidróxido de potássio (KOH) que estava reservada. Depois de decorridos 30 minutos a temperatura constante de  $60^\circ\text{C}$  com agitação ininterrupta, a mistura reacional foi transferida para funil de separação, permanecendo em repouso por 24 horas permitindo a separação de fases, sendo a fase pesada composta basicamente por glicerina e a fase leve composta por biodiesel.

Após a separação, o biodiesel foi submetido a uma sequência de lavagens com água destilada, objetivando a remoção do excesso de hidróxido de potássio (KOH). Foi utilizada a proporção de três partes de biodiesel para uma parte de água destilada, ambos aquecidos a  $60^\circ\text{C}$  com agitação por três minutos, após os quais a mistura era novamente transferida para funil de separação, aguardando-se a separação de fases entre o biodiesel e a água destilada. O número de repetições deste processo permaneceu entre 6 e 8 para todas as matérias-primas.

Utilizou-se solução composta por 0,1 g de fenolftaleína ( $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ ) e 10 ml de etanol absoluto ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) P.A. como indicadora da conclusão do processo de

lavagem ao adicionar duas gotas desta solução em 100 ml da água separada após o processo.

A fenolftaleína ( $C_{20}H_{14}O_4$ ) a 1%, quando usada para titulação, apresenta-se incolor em meio ácido (pH abaixo de 8,2), levemente rosada (pH entre 8,2 e 9,8) e roxa em meio alcalino (pH entre 9,8 e 12,0). Com o excesso de hidróxido de potássio (KOH) no biodiesel, as primeiras lavagens resultaram em água destilada com pH maior que 10,0 e conseqüentemente coloração roxa após a titulação. O processo foi repetido até que a titulação resultasse em solução incolor, indicando, através do pH abaixo de 8,2 que a concentração de hidróxido de potássio (KOH) no biodiesel estava em conformidade.

O biodiesel foi então submetido à estufa a 60°C até atingir peso constante, em processo que perdurou por 72 horas e indicou que o mesmo estava livre de umidade e pronto para os testes de conformidade com a legislação vigente, a Resolução nº14 da ANP (Brasil, 2012).

### 3.2.2.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Objetivando avaliar a conformidade citada, do biodiesel com a legislação, foram realizados teste de acidez, densidade, viscosidade e poder calorífico.

O teste de acidez utilizou 25 ml de solução 2:1 (volume: volume) de éter etílico ( $C_4H_{10}O$ ) e etanol absoluto ( $CH_3CH_2OH$ ) em aproximadamente 2 g de biodiesel, pesadas em balança analítica (com quatro casas decimais). Esta solução, após a adição de 2 gotas de fenolftaleína ( $C_{20}H_{14}O_4$ ) a 1% como indicador, foi titulada com solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH) a 0,01 M até a viragem para coloração rosa persistente por 30 segundos, aplicando o volume gasto da solução na Equação (1), descrita em Instituto Adolfo Lutz (2008):

$$IA = \left( \frac{V \cdot f \cdot 5.61}{P} \right) \quad (1)$$

Onde:

IA - índice da acidez;

V - solução de hidróxido de potássio (KOH) 0,01 M gasto na titulação (mL);

f - fator da solução de hidróxido de sódio 0,01 M; e

P - massa da amostra de biodiesel usado na titulação (g).

Para verificação da densidade utilizou-se densímetro convencional de leitura direta, próprio para combustíveis líquidos, aferido pela ANP. Como auxílio de proveta, estabilizou-se a temperatura do biodiesel em 20°C utilizando sistema de banho termostatizado. O densímetro foi então submerso no biodiesel e efetuada a leitura após a estabilização do mesmo.

A obtenção do valor da viscosidade cinemática apresentada pelo biodiesel foi conduzida com a utilização de um viscosímetro Cannon-Fenske Opaque de fluxo reverso (nº 150) e de sistema de banho termostatizado. O método consiste em manter o viscosímetro com quantidade predeterminada de óleo em seu interior, a temperatura constante de 40°C e cronometrar o tempo que o líquido demorou para percorrer, sob ação da gravidade, um tubo capilar calibrado. A viscosidade cinemática é o produto do tempo de escoamento pela constante de calibração do viscosímetro a dada temperatura, sendo obtida através da Equação (2):

$$V = C \cdot t \quad (2)$$

onde:

V - viscosidade cinemática ( $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ );

C - constante de calibração do viscosímetro, ( $\text{mm}^2 \text{s}^{-2}$ ); e

t - tempo de escoamento medido (s).

A constante de calibração do viscosímetro é obtida em tabela fornecida pelo fabricante do equipamento.

O poder calorífico dos combustíveis foi determinado com a utilização de calorímetro de bomba modelo E2K, seguindo metodologia determinada pelo fabricante que consistiu em pesar aproximadamente 0,4 g de biodiesel em recipiente adiabático apropriado, o qual foi pressurizado a 3,04 MPa, sendo também acoplado um fio de ignição, conforme descrito por Silva et al. (2012b). Levou-se o recipiente ao calorímetro, o qual, após a adequada programação, fornece o valor do poder calorífico superior (PCS) do combustível em  $\text{MJ Kg}^{-1}$ . O poder calorífico inferior (PCI) foi calculado segundo a Equação (3), descrita por Volpato et al. (2009)

$$PCI = PCS - 3,052 \quad (3)$$

Onde:

PCI - poder calorífico inferior ( $\text{MJ Kg}^{-1}$ ); e

PCS - poder calorífico superior ( $\text{MJ Kg}^{-1}$ ).

### **3.3 CONJUNTO MOTOR-GERADOR**

O conjunto motor-gerador utilizado é da marca Branco, modelo BD 6500CF, monofásico, com 7,36 KW (10 cv) de potência, 5,0 KVA de potência nominal, tensão de saída 110 / 220 V e controle de tensão com capacitor (sem escova). Antes do ensaio, o equipamento passou por revisão para regulagem em estabelecimento credenciado pela marca. As cargas resistivas foram aplicadas com a utilização de um banco de resistências, com potência dissipada baseada em tensão de alimentação de 220 VCA. Este banco estava composto por 9 resistências (2 de 250, 2 de 500, 2 de 1000 e 3 de 2000 W) com possibilidade de acionamento isolado ou simultâneo com controle através de quadro de comando, permitindo a adequação das cargas utilizadas (0, 1, 2, 3, 4 e 5 KW).

### **3.4 INSTRUMENTAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR-GERADOR**

#### **3.4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS**

Para efetuar o registro dos dados fornecido pelos equipamentos, máquinas e sensores de avaliação foi utilizado sistema de aquisição e registro de dados analógicos e digitais de alta resolução da marca Novus, modelo FieldLogger, com oito entradas analógicas e oito digitais, todas configuráveis, memória interna de 2 MB, contagem com tempo mínimo do pulso de 2 ms e capacidade de 1000 registros por segundo, distribuídos entre os canais configurados. Ao sistema de aquisição de dados foram conectados dois fluxômetros de forma a permitir o registro dos dados de consumo de combustível avaliados.

#### **3.4.2 FLUXÔMETROS**

Com o intuito de avaliar o consumo de combustível, foram instalados dois medidores de fluxo volumétrico (fluxômetros), adequados para uso em processos líquidos. Os fluxômetros utilizados são da marca Oval, modelo Super Micro FlowMate LSF41, composto por duas engrenagens ovais que convertem em frequências de pulsos o volume de combustível deslocado. O método de detecção é por sensor magnético, tendo a vazão máxima de  $100 \text{ L h}^{-1}$ , com medição de 1 ml por pulso. Um medidor de fluxo foi instalado na saída do reservatório de combustível, de forma a quantificar o combustível que está sendo fornecido ao motor, enquanto o outro foi instalado no retorno do combustível, quantificando o combustível não

utilizado, permitindo assim, pela diferença entre as quantidades, obter exatamente a quantidade volumétrica de combustível utilizado pelo motor em cada instante. O sistema de aquisição de dados foi configurado para efetuar 20 leituras por segundo.

### 3.4.3 TERMÔMETRO

Foi instalado um termômetro digital no reservatório de combustível, possibilitando assim a avaliação da temperatura do combustível, em graus centígrados (°C), no momento de seu fornecimento ao motor-gerador. Os dados obtidos com este sensor foram anotados de forma manual, periodicamente a cada minuto, para posterior correção do volume do combustível a temperatura de 20°C.

### 3.4.4 ANALISADOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

O analisador de grandezas elétricas utilizado é da marca Instrutherm, modelo AE 200, medição True RMS, com precisão de análise de corrente e tensão de  $\pm 0,5\%$ . Dentre várias grandezas elétricas avaliadas, observou-se especificamente a potência elétrica gerada pelo conjunto motor-gerador, avaliada em Watt (W). Este equipamento não apresentou necessidade de conexão com sistema de aquisição de dados uma vez que possui sistema próprio com tal finalidade, o qual foi configurado para efetuar 10 leituras por segundo.

## 3.5 PARÂMETROS AVALIADOS

### 3.5.1 CONSUMO HORÁRIO VOLUMÉTRICO ( $Chv$ )

Para o cálculo do volume de combustível consumido por hora foram utilizados os valores avaliados pelos fluxômetros durante o experimento, os quais foram inseridos na Equação (4), adaptado de Yanai et al. (1999).

$$Chv = \left( \frac{Va - Vr}{t} \right) * 3,6 \quad (4)$$

Onde:

$Chv$  - consumo horário volumétrico ( $L h^{-1}$ );

$Va$  - volume de combustível na alimentação (mL);

$Vr$  - volume de combustível no retorno (mL);

$t$  - tempo de duração da repetição (s); e

3,6 - fator de conversão de  $mL s^{-1}$  para  $L h^{-1}$ .

### 3.5.2 CORREÇÃO DO VOLUME DO COMBUSTÍVEL

O Consumo horário volumétrico corrigido para temperatura de 20°C foi obtido utilizando Tabelas oficiais (BRASIL, 1970) para obtenção do fator de correção, utilizando a Equação (5):

$$Chvc = f \cdot Chv \quad (5)$$

Na qual:

Chvc - consumo horário volumétrico corrigido (L h<sup>-1</sup>);

f - fator de correção (tabelado), e

Chv - consumo horário volumétrico analisado no experimento.

### 3.5.3 CONSUMO ESPECÍFICO (CE)

O consumo específico foi calculado conforme a Equação (6), adaptada de Gabriel Filho et al. (2010).

$$CE = \frac{Chvc \cdot Dc}{PEG} \quad (6)$$

Onde:

CE - consumo específico (Kg KW h<sup>-1</sup>);

Chvc - consumo horário volumétrico corrigido (L h<sup>-1</sup>);

Dc - densidade do combustível (Kg dm<sup>-3</sup>); e

PEG - potência elétrica gerada no conjunto motor-gerador (KW).

### 3.5.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para o cálculo da eficiência energética, foi utilizado a Equação (7), adaptada de Soranso et al. (2008) e Silva et al. (2012a).

$$EE = \frac{360}{PCI * CE} \quad (7)$$

Na qual:

EE - eficiência energética (%);

PCI - poder calorífico inferior do combustível (MJ Kg<sup>-1</sup>);

CE - consumo específico do combustível (Kg KW h<sup>-1</sup>); e

360 - fator de conversão entre unidades e percentagem

### **3.5.5 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA**

Os valores obtidos para o Consumo Específico de Combustível (CE) foram organizados em diferentes formas visando permitir uma melhor interpretação, sendo realizada análise estatística para cada carga resistiva e também para cada combustível avaliado, além do conjunto de todas as cargas com todas as misturas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e na sequência, se negada à hipótese de nulidade dos efeitos de tratamentos a 5% de significância, realizou-se comparação entre médias dos tratamentos, utilizando o teste de Tukey, objetivando identificar quais médias diferem entre si. Para esta análise estatística utilizou-se o software livre Sisvar versão 5.3. Dados que não apresentaram distribuição normal foram submetidos à transformação de Box-Cox e somente então avaliados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

O biodiesel obtido a partir de óleo de crambe, óleo de soja e óleo residual de fritura, para os parâmetros analisados, ficou em conformidade com os limites estabelecidos por Brasil (2012) na Resolução nº 14 da ANP, como pode ser observado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Propriedades físico-químicas do biodiesel obtido de diferentes matérias-primas

Característica	Unidade	Limite	Diesel	Biodiesel		
				Crambe	Soja	Residual de fritura
Índice de acidez (máx.)	mg KOH g <sup>-1</sup>	0,5	-	0,38	0,31	0,40
Massa específica (20°C)	Kg m <sup>-3</sup>	850-900	855	873,4	881,1	878,2
Viscosidade cinemática (40°C)	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	3,0-6,0	3,58	5,65	4,09	4,02

Destaca-se que, apesar de estar enquadrado dentro dos limites estabelecidos pela legislação supracitada, o índice da acidez do biodiesel de crambe e de óleo residual de fritura apresentaram valores elevados quando comparado com o biodiesel de óleo de soja. O mesmo ocorre com a viscosidade cinemática do biodiesel de óleo de crambe, com valores próximos ao limite superior da legislação.

Caso a viscosidade ultrapassasse os limites estabelecidos na legislação, Macêdo et al. (2009) citam como alternativas, a mistura do biodiesel mais viscoso com outro de menor viscosidade ou mesmo a mistura dos seus óleos brutos antes da transesterificação. Os autores citam também a utilização de maiores quantidades de álcool no processo de transesterificação tendem a reduzir a presença de triglicerídeos e conseqüentemente a viscosidade do biodiesel.

Estas situações já eram esperadas, pois são características provenientes das qualidades da matéria-prima utilizada para fabricação do biodiesel e, apesar de influenciarem nos dados analisados, encontram-se em conformidade com os parâmetros estabelecidos na legislação.

#### 4.1.1 PODER CALORÍFICO

Os valores médios de poder calorífico inferior (PCI), obtidos após 3 repetições, estão apresentados na Tabela 3. O B100 de óleo de crambe apresentou PCI de 36,68 MJ Kg<sup>-1</sup>, valor similar ao encontrado por Wazilewski et al. (2012) de 36,52 MJ Kg<sup>-1</sup>. O biodiesel de óleo de crambe, dentre as matérias-primas estudadas, foi o que apresentou o maior valor de PCI, porém sem diferença significativa, sendo o B100 de crambe 0,7 e 1,3% superior ao B100 de soja e de residual de fritura, respectivamente.

**Tabela 3.** Poder calorífico inferior (MJ Kg<sup>-1</sup>) dos combustíveis utilizados

Combustível	PCI Médio (MJ Kg <sup>-1</sup> )				
	B0	B10	B20	B50	B100
Diesel	40,39				
Biodiesel de óleo de crambe		40,09	39,76	38,58	36,68
Biodiesel de óleo de soja		40,10	39,72	38,46	36,42
Biodiesel de óleo residual de fritura		40,07	39,66	38,34	36,20

O B100 de óleo de soja apresentou PCI médio de 36,42 MJ Kg<sup>-1</sup>, corroborando com os estudos de Linares e Teixeira (2010), que relataram valor de 36,58 MJ Kg<sup>-1</sup>. Silva et al. (2010) obtiveram, para biodiesel de óleo de soja, PCI de 36,30 MJ Kg<sup>-1</sup> e para biodiesel de óleo residual de fritura 35,58 MJ Kg<sup>-1</sup>, valor este 1,7% inferior ao encontrado neste trabalho e indicado na Tabela 3 de 36,20 MJ Kg<sup>-1</sup> para o B100 de óleo de fritura.

Para outras matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel, Fiorese et al. (2012) obtiveram, para biodiesel de óleo de frango, PCI de 39,30 MJ Kg<sup>-1</sup>, Silva et al. (2012b), também para biodiesel de óleo de frango detectaram PCI de 35,39 MJ Kg<sup>-1</sup>. Rojas-González et al. (2011), obtiveram PCI para biodiesel de óleo de dendê de 37,04 MJ Kg<sup>-1</sup>, para biodiesel de óleo de mamona 37,77 MJ Kg<sup>-1</sup> e para biodiesel de óleo residual de fritura 36,94 MJ Kg<sup>-1</sup>.

Observa-se que mesmo quando utilizado processos similares de obtenção do biodiesel, o PCI do biodiesel pode apresentar variações decorrentes da qualidade da matéria-prima utilizada no processo, devendo ser objeto de atenção tanto durante procedimentos de pesquisa quanto em fabricação comercial.

Pela Tabela 3 é possível visualizar que as três matérias-primas utilizadas para obtenção de biodiesel apresentaram valores semelhantes de PCI. Detecta-se também que o diesel apresenta maior valor de PCI, sendo que o PCI das misturas é inversamente proporcional a quantidade de biodiesel na mesma, devido ao maior poder calorífico do diesel em relação aos biocombustíveis avaliados, como observado também por Francesquett et al. (2010). Um menor poder calorífico implica em maior consumo de massa do combustível para proporcionar a mesma quantidade de energia gerada.

#### 4.2 CONSUMO ESPECÍFICO

Os valores médios de CE para as cargas resistivas de 1, 2, 3, 4 e 5 KW estão apresentados respectivamente nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8. Para todas as cargas o tratamento DI apresentou valores menores de CE quando comparado aos valores das misturas com biodiesel, variando de 0,3491 Kg KW h<sup>-1</sup> na carga de 5 KW a 0,5077 Kg KW h<sup>-1</sup> na carga de 2 KW.

**Tabela 4.** Consumo específico médio (Kg KW h<sup>-1</sup>) para carga resistiva de 1 KW

Tratamento	CE (Kg KW h <sup>-1</sup> )
DI-1	0,8843 a
BORF20-1	0,9555 b
BC20-1	0,9646 b c
BORF10-1	0,9662 b c
BORF50-1	0,9669 b c
BC50-1	0,9802 b c d
BC10-1	0,9873 b c d
BC100-1	0,9893 b c d
BS20-1	0,9904 b c d
BORF100-1	0,9961 c d
BS50-1	0,9966 c d
BS100-1	1,0106 d
BS10-1	1,0121 d
DMS	0,0397
CV(%)	1,85

Médias de tratamentos seguidas por letras distintas diferem pelo Teste Tukey a 5% de significância.

**Tabela 5.** Consumo específico médio (Kg KW h<sup>-1</sup>) para carga resistiva de 2 KW

Tratamento	CE (Kg KW h <sup>-1</sup> )
DI	0,5077 a
BC20	0,5236 a b
BC50	0,5277 a b c
BORF20	0,5476 b c d
BC100	0,5503 b c d
BC10	0,5541 c d
BORF10	0,5567 d e
BS20	0,5625 d e
BS50	0,5631 d e
BS10	0,5674 d e
BORF50	0,5676 d e
BS100	0,5834 e
BORF100	0,6183 f
DMS	0,0288
CV(%)	2,36

Médias de tratamentos seguidas por letras distintas diferem pelo Teste Tukey a 5% de significância.

**Tabela 6.** Consumo específico médio (Kg KW h<sup>-1</sup>) para carga resistiva de 3 KW

Tratamento	CE (Kg KW h <sup>-1</sup> )
DI	0,4204 a
BC20	0,4274 a b
BC50	0,4329 a b c
BORF20	0,4390 a b c d
BC10	0,4422 a b c d e
BC100	0,4495 b c d e
BORF10	0,4510 b c d e
BS10	0,4555 c d e
BS20	0,4559 c d e
BORF50	0,4566 c d e
BS50	0,4640 d e
BS100	0,4680 e f
BORF100	0,4931 f
DMS	0,0281
CV(%)	2,85

Médias de tratamentos seguidas por letras distintas diferem pelo Teste Tukey a 5% de significância.

**Tabela 7.** Consumo específico médio (Kg KW h<sup>-1</sup>) para carga resistiva de 4 KW

Tratamento	CE (Kg KW h <sup>-1</sup> )
DI	0,3787 a
BC20	0,3832 a b
BC50	0,3913 a b c
BC10	0,3931 a b c d
BORF20	0,3948 a b c d e
BORF10	0,3987 b c d e
BC100	0,4045 b c d e
BS20	0,4056 c d e
BS10	0,4086 c d e
BORF50	0,4089 c d e
BS50	0,4128 d e
BS100	0,4285 e f g
BORF100	0,4318 f g
DMS	0,0167
CV(%)	1,89

Médias de tratamentos seguidas por letras distintas diferem pelo Teste Tukey a 5% de significância.

**Tabela 8.** Consumo específico médio (Kg KW h<sup>-1</sup>) para carga resistiva de 5 KW

Tratamento	CE (Kg KW h <sup>-1</sup> )
DI	0,3491 a
BC10	0,3672 a b
BC20	0,3687 b c
BORF20	0,3731 b c d
BC50	0,3733 b c d
BORF10	0,3768 b c d
BS20	0,3828 b c d e
BC100	0,3850 b c d e
BORF50	0,3861 c d e f
BS10	0,3871 d e f
BS50	0,3903 d e f
BS100	0,3981 e f
BORF100	0,4039 f
DMS	0,0182
CV(%)	2,18

Médias de tratamentos seguidas por letras distintas diferem pelo Teste Tukey a 5% de significância.

Nietiedt et al. (2011a), ao analisarem o motor de um trator agrícola acoplado à bancada dinamométrica, utilizando diesel de petróleo e biodiesel de soja, avaliaram o CE do diesel em  $0,235 \text{ Kg KW h}^{-1}$  como menor que o CE do BS100 que foi de  $0,264 \text{ Kg KW h}^{-1}$ . Fiorese et al. (2012), em ensaio com motor de trator agrícola em bancada dinamométrica, operando com biodiesel de óleo de frango, óleo diesel e as misturas B20, B40, B60, B80 e B100, constataram que o CE do diesel foi menor ( $0,262 \text{ Kg KW h}^{-1}$ ) quando comparado ao B100 de óleo de frango ( $0,289 \text{ Kg KW h}^{-1}$ ).

O menor CE apresentado pelo diesel de petróleo deve-se principalmente a dois fatores com influência direta sobre o mesmo: a menor densidade e o maior poder calorífico do combustível, o que é corroborado por Chaves et al. (2012) e Mofijur et al. (2014). Como o sistema de injeção proporciona combustível em base volumétrica, com a maior densidade do biodiesel, mantendo-se a mesma pressão no sistema, há injeção de mais massa de combustível para o mesmo volume devido a maior densidade, resultando em maior consumo mássico para o biodiesel. Atabani et al. (2013) citam que a viscosidade do combustível também pode influenciar a atomização, provocando queima incompleta do combustível e consequente aumento do consumo específico em determinadas condições de operação.

Observa-se também nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8 que há relação inversamente proporcional entre o consumo específico e a carga resistiva, pois com o aumento da carga de 2 para 3, 4 e 5 KW, o consumo específico para o BC100, por exemplo, passou respectivamente de 0,5503 para 0,4495, 0,4045 e  $0,3850 \text{ Kg KW h}^{-1}$ . Esta relação é observada individualmente em cada mistura quando comparadas as diferentes cargas resistivas.

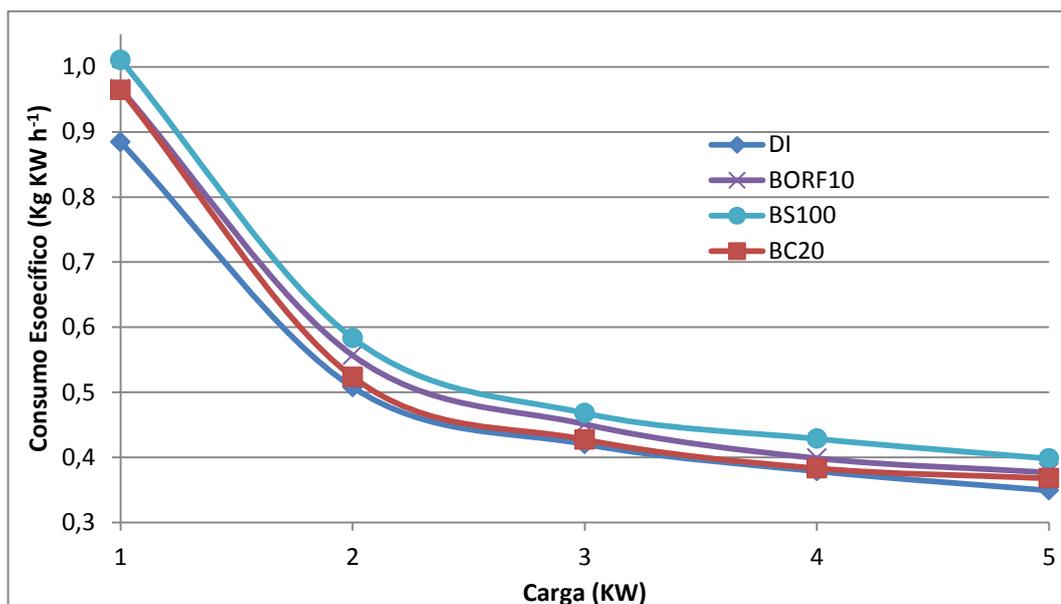
Tabile et al. (2009) ao analisarem o desempenho de trator agrícola operando com diesel fóssil e misturas com biodiesel de mamona também observam esta relação inversamente proporcional ao concluírem que para a mesma proporção de mistura do biodiesel, uma carga maior na barra de tração resulta inversamente em decréscimo no valor do CE. O CE para a carga de 13 KN foi de  $0,456 \text{ Kg KW h}^{-1}$  e com o aumento da carga para 23 KN o CE diminuiu para  $0,358 \text{ Kg KW h}^{-1}$ . No entanto, Rojas-González et al. (2011) observaram, ao analisarem motor-gerador utilizando diesel, biodiesel de mamona, dendê e óleo residual de fritura sob diferentes cargas, que o CE é diretamente proporcional a carga aplicada. Para o óleo residual de fritura, observaram CE de  $0,131 \text{ Kg KW h}^{-1}$  para a carga de 0,54

KW, 0,163 Kg KW h<sup>-1</sup> para a carga de 1,49 KW e 0,174 Kg KW h<sup>-1</sup> para a carga de 2,41 KW, ou seja, com o aumento da carga houve aumento no CE. Os demais combustíveis avaliados apresentaram comportamento semelhante.

Esta diferença de resultados obtidos pode estar relacionada com o dimensionamento dos equipamentos avaliados. Apesar das rotações serem constantes em cada experimento, a condição de operação de cada motor individualmente, caso incluía ou não o ponto de máxima capacidade de potência, pode resultar em diferentes comportamentos de CE. Mialhe (1996) cita, como pontos de interesse na curva de desempenho resultante do ensaio de motores, o ponto de consumo específico mínimo, quando as condições operacionais relativas ao torque e a rotação estão ótimas, ocorrendo o máximo valor para a eficiência global do motor enquanto conversor energético do combustível. A amplitude dos valores das cargas de trabalho utilizadas também podem, caso a amplitude seja pouca, não denotar o real comportamento do CE com a variação das cargas.

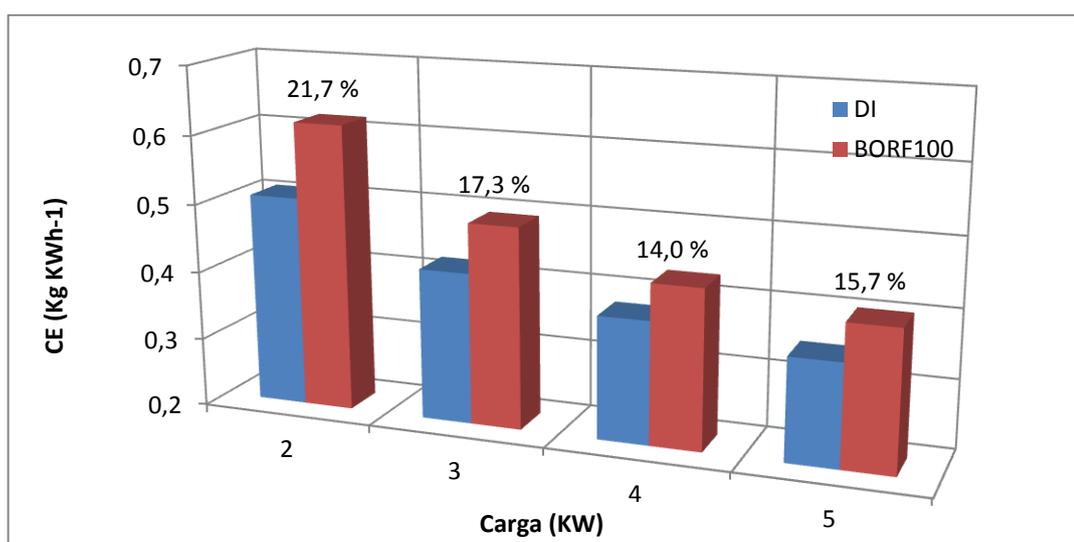
O estudo realizado por Volpato et al. (2009) permite visualizar esta questão com maior clareza. Os autores avaliaram o desempenho do motor de um trator através da tomada de potência, utilizando diesel e biodiesel de soja sob diferentes rotações de operação, traçando com os resultados uma curva de tendência do consumo específico. Gráficamente pode-se observar que para 415 rpm, o CE observado foi de 234,6 g KW h<sup>-1</sup>, para 500 rpm o CE foi de 228,0 g KW h<sup>-1</sup> e para 600 rpm o CE foi de 242,2 g KW h<sup>-1</sup>. Inicialmente o CE diminui com o aumento da rotação de trabalho, apresentando relação inversa. Porém quando a rotação aproxima-se da rotação máxima, a tendência do CE é aumentar com o aumento da rotação, apresentando relação diretamente proporcional.

A amplitude de cargas utilizadas neste trabalho não permitiu avaliar tal tendência, pois não permitiu observar o ponto de consumo específico mínimo, descrito por Mialhe (1996). Porém, é possível observar que o CE, para uma mesma mistura, apresentou variações menores a cada acréscimo de carga. Considerando o tratamento DI nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8, o CE em relação à carga anterior, apresentou decréscimo de 17,20% na Carga 3, 9,92% na Carga 4 e 7,82% na Carga 5 KW, ou seja, com o aumento da carga houve redução gradativamente menor do CE, melhor observado na Figura 2.



**Figura 2.** Comportamento do consumo específico ( $\text{Kg KW h}^{-1}$ ) para diferentes cargas resistivas (KW).

A Figura 3 representa os valores de CE máximos e mínimos encontrados, coincidindo com os tratamentos BORF100 e DI, respectivamente. Proporcionalmente observa-se que a diferença entre o CE máximo e o mínimo decresce com o aumento da carga. Para a Carga 2 o máximo é 21,78% maior que o mínimo, para a Carga 3 é de 17,29%, para a Carga 4 é de 14,02% e para a Carga 5 KW é de 15,70%. O diesel apresentou o menor CE e os outros tratamentos tendem a aproximar-se deste valor com o aumento da carga resistiva aplicada, indicando que, utilizando biodiesel, operações mais próximas da capacidade nominal tendem a serem mais eficientes.



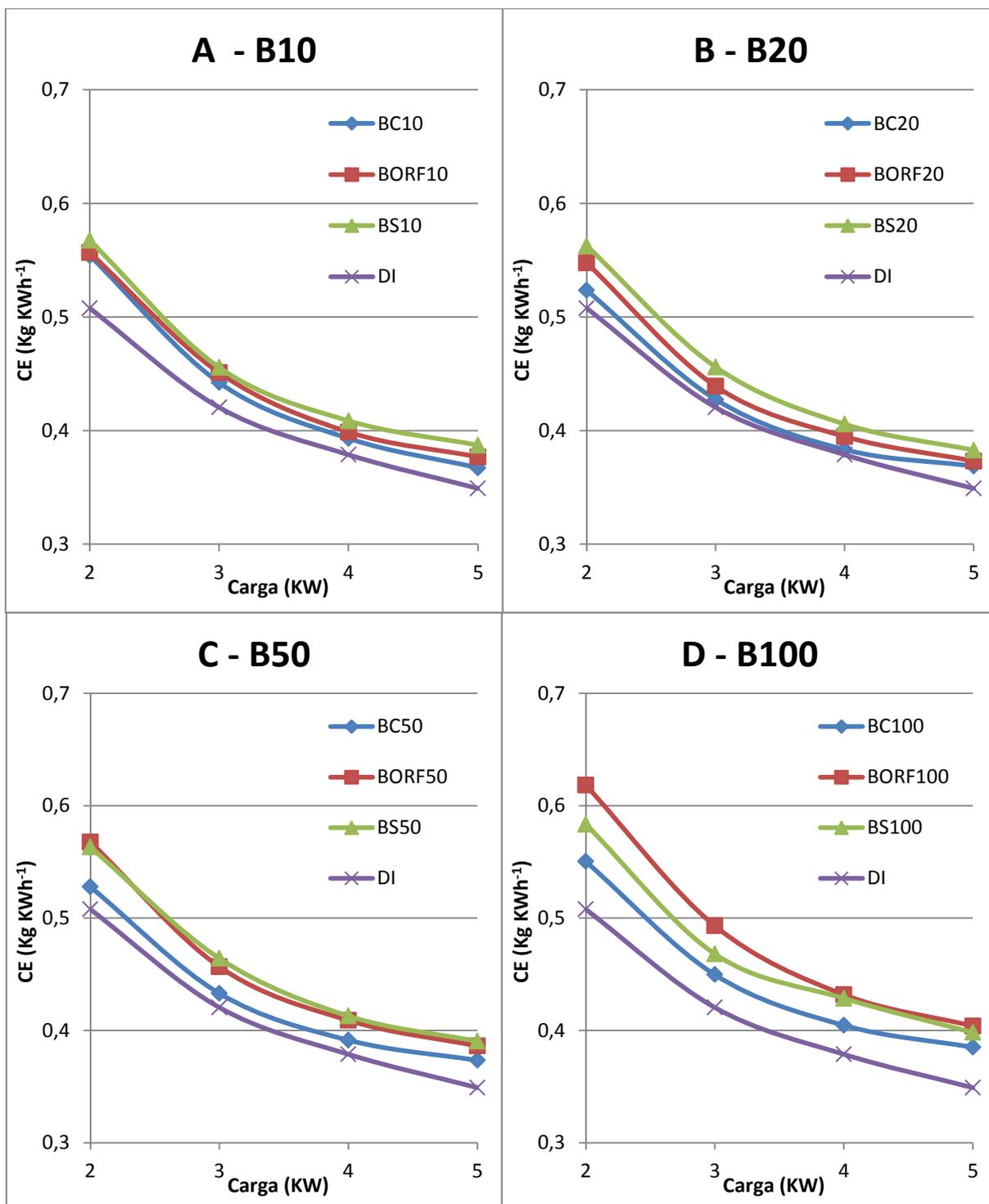
**Figura 3.** Consumo específico ( $\text{Kg KW h}^{-1}$ ) máximo e mínimo observados por carga resistiva (KW).

Castellanelli et al. (2008) ao avaliarem o desempenho de motor de ciclo diesel sob variadas rotações utilizando biodiesel de soja, observaram que a diferença entre os valores de CE máximo e mínimo foi de 35,15% a 1400 rpm, 8,06% a 1800 rpm, 8,99% a 2200 rpm e 7,56% a 2600 rpm. Diante destas características de tendência de aproximação de curvas em altas rotações e cargas maiores, indicaram a possibilidade de atomização insuficiente, ocasionada principalmente pela viscosidade elevada do biodiesel, que nas condições de pressão e injeção das rotações menores não conseguiria formar spray com tamanho, forma e penetração adequados.

Este fator não é tão expressivo a rotações elevadas associadas a cargas maiores, indicando que misturas com maior concentração de biodiesel seriam mais interessantes nestas situações. Devido ao fato do biodiesel apresentar características diferenciadas do diesel de petróleo, seria interessante a reengenharia de alguns sistemas do motor; Especificamente neste caso, o sistema de injeção do combustível poderia ser reavaliado de forma a permitir, através da utilização de reservatórios diferenciados de combustível, a utilização de diesel quando o motor operasse em faixas de potência mais baixas e de biodiesel em faixas de potência maiores, resultando assim em funcionamento do motor mais próximo do ideal em uma gama maior de situações.

Outra possibilidade, citada por Xue et al. (2011), é o reajuste dos sistemas do motor, principalmente do sistema de injeção, otimizando a ignição e a combustão, pois se mantidas para o biodiesel as mesmas condições de tempo e pressão de injeção utilizadas para o diesel, a diferença de características como densidade, viscosidade e índice de cetanos não permitirá o funcionamento ideal do motor, resultando em um aproveitamento ineficaz do combustível.

Na Figura 4, observa-se que o biodiesel de óleo de crambe, em todas as proporções de mistura com diesel fóssil, apresentou valores de CE mais próximos ao do diesel. Para todas as misturas binárias com crambe, observa-se que os valores de CE para as cargas de 3 e 4 KW estão mais próximos aos valores do DI, enquanto que para a carga de 5 KW ocorre distanciamento entre estes valores, possivelmente por influência da maior viscosidade. As misturas BS e BORF apresentaram valores similares de CE, mais evidentes para B10 (Figura 4 A) e B50 (Figura 4 C).



**Figura 4.** Consumo específico ( $\text{Kg KW h}^{-1}$ ) comparativo de diferentes combustíveis e misturas binárias em função das cargas resistivas.

Considerando todos os combustíveis, os valores de CE mais próximos ao do DI foram observados utilizando B20 (Figura 4 B) e, dentre estes, destacou-se o crambe, com valores similares ao do diesel. Castellanelli et al. (2008) em seus

estudos, verificaram que o BS20 destacou-se, apresentando desempenho superior ao do diesel, com valor de CE mínimo de 0,276 Kg KW h<sup>-1</sup> contra 0,280 Kg KW h<sup>-1</sup> apresentado pelo diesel, ambos a 1.667 rpm.

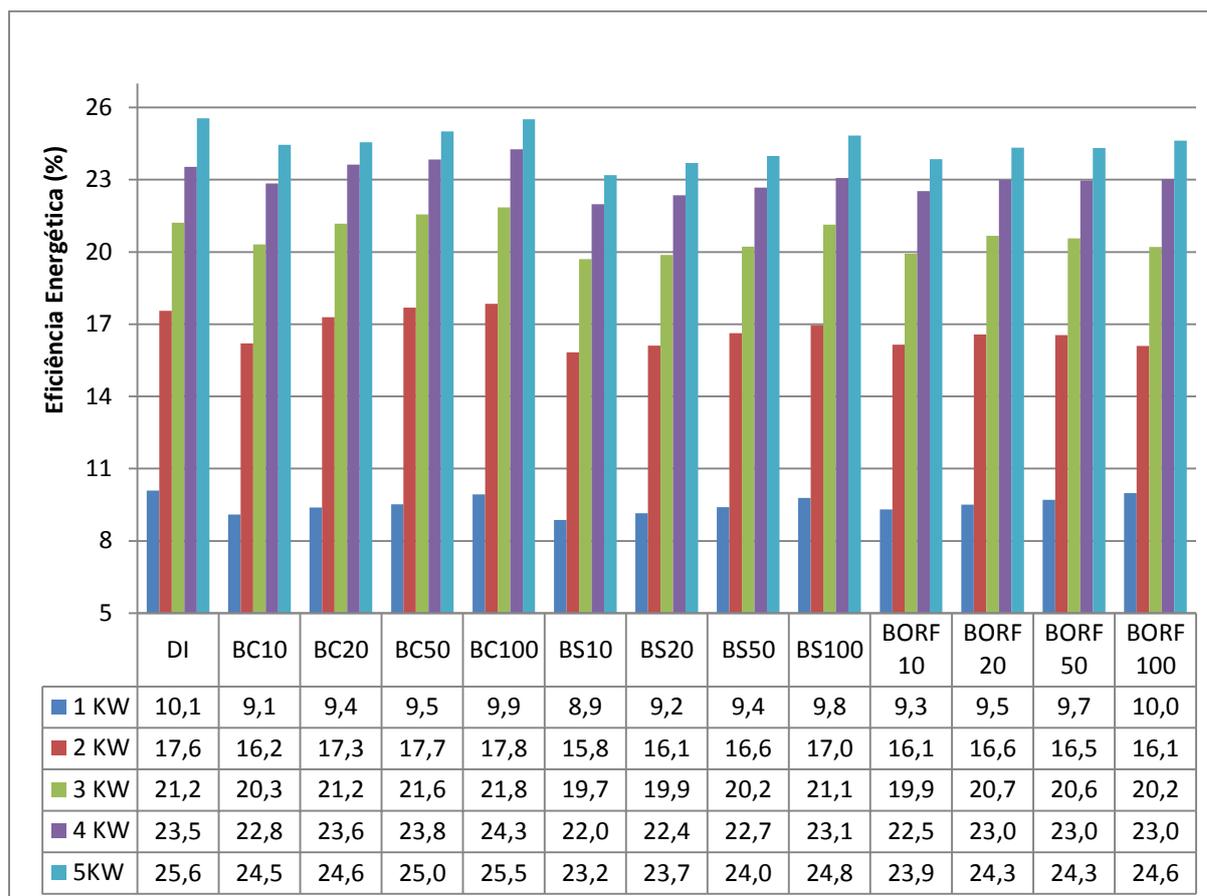
Pelas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8 observa-se que as misturas BC20 e BC50 não apresentaram diferença significativa para o diesel nas cargas de 2, 3 e 4 KW, demonstrando assim o potencial para utilização deste combustível nestas proporções de misturas em substituição ao diesel de petróleo. Chaves et al. (2012), utilizando biodiesel de crambe e soja em motor-gerador sob diferentes cargas resistivas e avaliando a potência gerada, observaram que para as cargas resistivas de 2, 3 e 4 KW o biodiesel de crambe apresentou potência gerada similar ao do diesel de petróleo, fato não observado a cargas maiores e que interfere diretamente no cálculo do CE.

Para Nietiedt et al. (2011b), o fato de algumas misturas binárias com baixa proporção de biodiesel apresentarem desempenho melhor tanto quanto ao diesel como ao biodiesel puro deve-se ao fato de tais misturas apresentarem a vantagem da adição do maior número de cetanos do biodiesel sem a dificuldade de atomização, ocasionando melhor queima do combustível.

Observa-se que vários trabalhos concluem que não são necessárias modificações nos motores de ciclo diesel para sua utilização com biodiesel como combustível. Porém, deve-se avaliar se além do funcionamento adequado, os sistemas e regulagens do motor proporcionam uma utilização próxima do ideal, fator que é determinante para maior utilização do biodiesel. Observa-se também contradição entre alguns relatos do comportamento de eficiência e consumo específico do combustível. Esta contradição deve-se principalmente as diferenças metodológicas e à variabilidade de motores e condições utilizados.

### **4.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

A Figura 5 apresenta os valores obtidos para EE para todos os combustíveis avaliados, para cada carga resistiva. O tratamento DI-5 apresentou a melhor EE, de 25,6%, seguido por BC100-5 com 25,5%, BC50-5 com 25,0%, BS100-5 com 24,8% e BORF100-5 com 24,6%, sendo todos obtidos operando com a carga de 5 KW. As EE mais baixas foram observadas para BS10 de todas as cargas, em média 9% inferior ao DI.



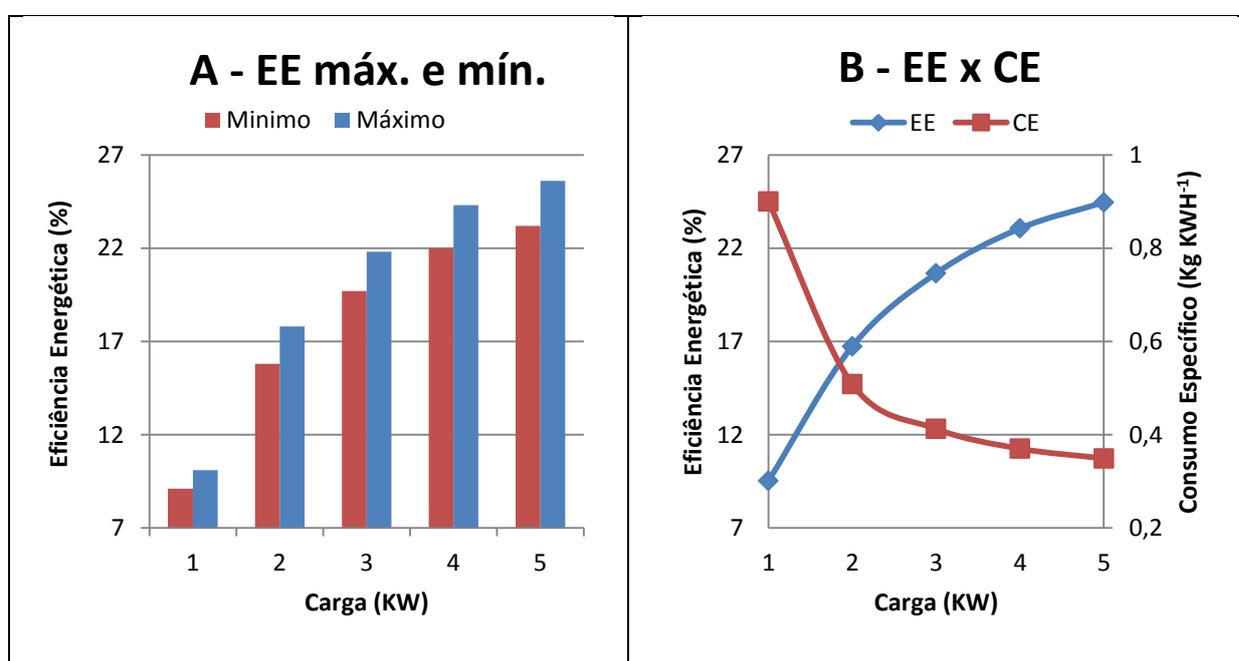
**Figura 5.** Eficiência energética (%) dos combustíveis por carga resistiva (KW).

Quanto ao desempenho das misturas, observa-se na Figura 6A, um aumento nos valores de EE diretamente proporcional ao aumento da carga resistiva. A diferença entre a máxima e a mínima permaneceu proporcional para todas as cargas, com o máximo sendo aproximadamente 11% maior que o mínimo em cada carga. Com relação à média dos combustíveis, observa-se um aumento de 76% na EE da carga 1 KW para a carga 2 KW, 23% para a carga 3 KW, 12% para a carga 4 KW e 6% para a carga 5 KW, indicando uma tendência de acréscimos cada vez menores na EE com o aumento da carga resistiva.

Rabelo et al. (2004), utilizando DI e BORF, constataram que a EE aumenta com o aumento da rotação do motor, obtendo valores máximos de 25,0% para DI e 25,5% para BOURF, ambos a 2.200 rpm, rotação a partir da qual a EE apresentou valores menores. Acevedo e Mantilla (2011), utilizando diesel e biodiesel de óleo de palma em motor de ciclo diesel observaram que a eficiência do sistema para os combustíveis utilizados apresentavam tendência a aumentar com o aumento da

carga aplicada, justificando o fato pela redução na perda de calor e aumento na potência desenvolvida com o aumento da carga.

Apesar do CE influenciar diretamente a EE por ser parte integrante dos seus cálculos, é importante ressaltar a relação inversamente proporcional entre ambas. Um CE menor resulta em uma EE maior, conforme pode ser visualizado na Figura 6B, que explana as médias da EE e do CE de todos os tratamentos do experimento. Silva et al. (2012a), ao observarem EE iguais ou menores que 15% para cargas de até 2 KW, indicaram que faixas de carga menores tendem a apresentar CE maiores e conseqüentemente EE menores.

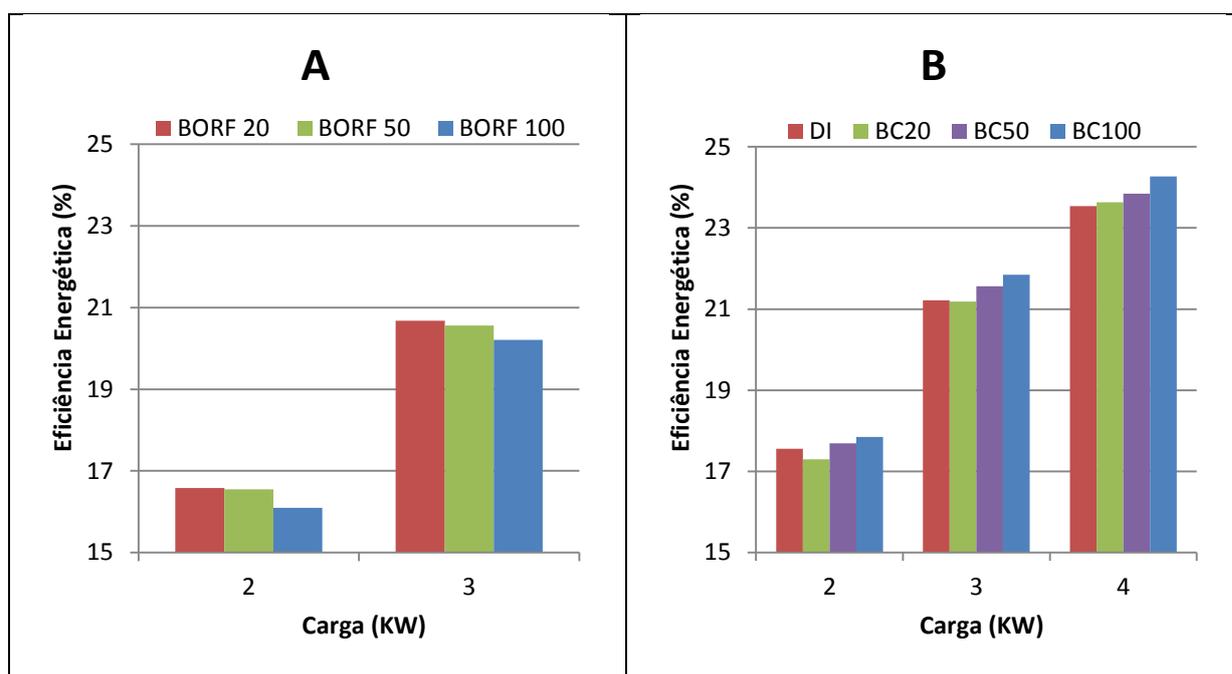


**Figura 6. A** - Eficiência energética (%) máxima e mínima por carga resistiva (KW). **B** - Eficiência energética média (%) e consumo específico médio (Kg KW h<sup>-1</sup>) por carga resistiva (KW).

Para o biodiesel de crambe e de soja, observa-se que a EE foi mais alta utilizando B100, e as misturas binárias não apresentaram tendência a superar os valores de B100 e DI. O biodiesel de óleo residual de fritura foi o único biodiesel com misturas binárias com valores de EE superiores ao biodiesel puro, cujos valores podem ser visualizados na Figura 7A, sendo BORF20-2 e BORF50-2 com EE 3,0 e 2,8% melhores que o BORF100-2 e BORF20-3 e BORF50-3 com EE 2,3 e 1,7% melhores que o BORF100-3.

Os combustíveis que superaram o diesel em EE estão graficamente dispostos na Figura 7B, com destaque para o BC50 nas cargas 3 e 4 KW,

respectivamente com EE 1,6 e 1,3% superior ao DI, e o BC100 nas cargas 2, 3 e 4 KW, respectivamente com EE 1,6, 3,0 e 3,1% superior ao DI. O biodiesel de crambe apresentou EE similar a do diesel, sendo o único biodiesel a superar o diesel, nas condições descritas acima. Esta melhor EE apresentada pelo biodiesel de crambe representa o potencial da cultura como matéria-prima para biodiesel, além de, segundo Jasper et al. (2010), que efetuaram análise energética da cultura do *Crambe abyssínica* Hochst, o balanço é favorável para produção do crambe, sendo o retorno de 8,98 unidades para cada empregada.



**Figura 7. A** - Mistura binárias com eficiência energética (%) maiores que as do biodiesel puro. **B** - Combustíveis com eficiência energética (%) maiores que as do diesel.

Os estudos de Fiorese et al. (2012) mostraram que com o aumento da proporção de biodiesel de óleo de frango nas mistura binárias houve redução do consumo de energia e aumento da eficiência do motor de trator em bancada dinamométrica. Entre outras, as EE relatadas foram de 32,28% para B100, 31,48% para B60 e 30,85% para B20. Os autores argumentaram que a melhor EE deu-se pelo acréscimo no número de cetanos proporcionado pelo acréscimo de biodiesel, resultando em melhor ignição e combustão, além do menor atrito proporcionado pela melhor lubrificação resultante da ação lubrificante do biodiesel.

Godeša, Jejčič e Poje (2010) estudaram o desempenho de motor de trator utilizando óleo de colza, observando que, apesar do poder calorífico do B100 ser

13,2% inferior, a EE do B100 foi 3,7% superior ao do diesel fóssil. Relataram também que o uso do B100 ocasionou, em relação ao diesel, aumento de CE em 11%, porém com diminuição de potência e torque. Valor similar foi avaliado neste trabalho, onde apesar do PCI do biodiesel de crambe ser 9,2% inferior ao PCI do diesel, a mistura BC100-4 apresentou EE 3,1% superior ao DI-4.

Barbosa et al. (2008), utilizando biodiesel de óleo de soja, avaliaram o desempenho de um motor ciclo diesel em bancada dinamométrica, relatando como maior valor de EE obtido, 39,6% para B100, sendo na média, a EE do B100 4% superior ao do diesel. Seus resultados mostram que a mistura binária com 2% de biodiesel apresentou desempenho menor tanto em relação ao B100 quanto ao diesel. Rabelo et al. (2004) também observaram valores de EE para diesel (26,7%) inferiores em 8% aos obtidos para B50 (29%), sendo inferior também ao B20 e B100 de óleo residual de fritura com valores intermediários para a faixa de rotação de 2000 a 2400 rpm. Nas rotações inferiores a 2.000 rpm não houve diferença significativa de rendimento.

Silva et al. (2012a), utilizando biodiesel de óleo de frango nas misturas binárias B0, B20, B40, B60 e B100 em conjunto motor-gerador sob diferentes cargas resistivas, obtendo EE máxima de 22% com diesel a 4,36KW. Quanto às misturas binárias, o B20 apresentou EE de 22% a 3,10 KW, semelhante ao diesel, e as demais misturas, EE no máximo 21%. Os autores ressaltam que a diferença de EE entre qualquer das misturas binárias e o diesel não ultrapassou 3%

Pela diversidade de tendências observadas na literatura, algumas inclusive opostas, pode-se estabelecer a hipótese de que o modelo do motor utilizado exerce interferência direta sobre a tendência dos resultados obtidos para a EE, uma vez que os detalhes técnicos da construção de cada máquina favorecem ou prejudicam determinada característica do combustível, importando assim em comportamentos muito específicos para um mesmo combustível em motores diferentes.

## 5. CONCLUSÃO

Para a metodologia adotada, nas condições descritas neste estudo, foi possível observar que:

- O poder calorífico do diesel foi superior aos biocombustíveis avaliados;
- O menor CE foi do diesel, com  $0,3491 \text{ g KW h}^{-1}$  para a carga resistiva de 5 KW, sendo menor que os biocombustíveis testados, em qualquer carga resistiva;
- O CE apresenta relação inversamente proporcional com a carga resistiva, porém com decréscimos cada vez menores com o aumento da carga;
- Com o acréscimo da carga resistiva o biocombustível apresenta CE mais próximo do diesel, indicando que sua utilização em operações mais próximas da capacidade nominal são mais eficientes;
- Dentre as misturas binárias, a B20 apresentou melhor CE para cada combustível individualmente, em média 4,8% melhor que o B100 para o crambe; 3,84% para a soja e 9,65% melhor para o residual de fritura;
- Dentre os tipos de biocombustível, o de óleo de crambe apresentou menor CE, com alguns valores sem diferir estatisticamente do CE do diesel;
- A EE apresentou relação diretamente proporcional com a carga resistiva, porém com acréscimos cada vez menores com o aumento da carga. A proporção entre a máxima e mínima EE permaneceu em aproximadamente 11% com a variação das cargas resistivas;
- O biocombustível puro (B100) tende a apresentar melhor EE que as misturas binárias utilizadas. Dentre os biocombustíveis, o de óleo de crambe obteve EE mais próxima ao do diesel.

## 6. PERSPECTIVAS E SUGESTÕES

Este trabalho, como outros já publicados, demonstrou o potencial de utilização dos biocombustíveis, especificamente do biodiesel, em substituição ao diesel de petróleo em condições mais avançadas comparativamente as já adotadas atualmente. A avaliação da utilização do biodiesel considerando o seu consumo específico e seu rendimento energético, propicia uma real visualização do seu valor enquanto combustível. Estudos que demonstrem este potencial de culturas consideradas secundárias ampliam a gama de opções de matéria-prima para produção de biodiesel, o que não somente propicia uma maior inserção do biodiesel na cadeia energética, mas possibilita a inclusão econômica de pequenos produtores, os quais comumente apresentam maior diversidade produtiva por não praticarem o monocultivo, o que é favorecido pela possibilidade de utilização do crambe.

Como sugestão a trabalhos futuros, ressalta-se a importância de dimensionar antecipadamente a capacidade operativa do motor utilizado, objetivando a obtenção de curvas de comportamento mais completas, tanto para o consumo específico como para a eficiência energética. Abordagem interessante seria a avaliação do desempenho operacional de trator utilizando biodiesel de óleo de crambe, através de ensaios a campo.

Ressalta-se também a importância de avaliar modificações na estrutura e nos sistemas dos motores de ciclo diesel de forma a permitir que sua utilização com biodiesel seja mais eficiente, permitindo assim maior inserção deste combustível.

## 7. REFERÊNCIAS

ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. **Pesquisa de capacidade instalada da indústria de óleos vegetais – 2013**. Coordenadoria de Economia e Estatística. Disponível em: <<http://www.abiove.org.br>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

ACEVEDO, H.; MANTILLA, J. Performance and emissions of a heavy duty diesel engine fuelled with palm oil biodiesel and premium diesel. **Dyna**, Medellín, y. 78, n. 170, p. 152-158, dec. 2011.

ALVARENGA, B.M.; SOARES, M.A. Potencialidade de produção de biodiesel por óleos e gorduras residuais na cidade de Itabira-MG. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 6, p. 721-729, nov.-dez. 2010.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário da indústria automobilística brasileira 2013**. Centro de Documentação da Indústria Automobilística CEDOC, São Paulo: Ipsis, 2013. 160 p.

ATABANI, A.E. et al. Non-edible vegetable oils: a critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 211-245, 2013.

BARBOSA, R.L. et al. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set.-out. 2008.

BARROS, A.A.C.; WUST, E.; MEIER, H.F. Estudo da viabilidade técnico-científica da produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 3, p. 255-262, jul.-set. 2008.

BRASIL, Resolução CNP nº 6, de 25 de junho de 1970 - 1521ª Sessão Ordinária. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 jun. 1970.

BRASIL, Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 jan. 2005. Seção 1, p. 8.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – Secretaria de Produção e Agroenergia. **Plano nacional de agroenergia 2006-2011**. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 2 ed. rev., 110 p. 2006.

BRASIL, Resolução ANP nº 14, de 11 de maio de 2012. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 maio 2012.

BRASIL, ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim mensal do biodiesel**. Brasília, mai. 2013a. 13 p. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 29 jun. 2013a.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. **Boletim mensal dos combustíveis renováveis**. Departamento de Combustíveis Renováveis, Brasília, edição n.64, maio 2013b.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Secretaria de Produção e Agroenergia. **Anuário estatístico de agroenergia 2012**. MAPA/ACS, Bilingue, Brasília, 284 p. 2013c.

CASTELLANELLI, M. et al. Desempenho de motor de ciclo diesel em bancada dinâmométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 145-153, jan.-mar. 2008.

CHAVES, L.I. et al. Variação da potência de saída de um gerador em função da utilização de biodiesel de crame e soja. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2012.

CHRISTOPHE, G. et al. Recent developments in microbial oils production: a possible alternative to vegetable oils for biodiesel without competition with human food? **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 55, n. 1, p. 29-46, jan.-feb. 2012.

CORRÊA, I.M.; MAZIERO, J.V.G.; STORINO, M. Mistura de biodiesel de sebo bovino em motor diesel durante 600 horas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 7, p. 1189-1194, jul. 2011.

COSTA NETO, P.R. et al. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 531-537, ago. 2000.

DA CUNHA, M.E. et al. Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale. **Fuel Processing Technology**, v. 90, p. 570-575, 2009.

DABDOUB, M.J.; BRONZEL, J.L. Biodiesel: visão crítica do status atual e perspectivas na academia e na indústria. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 776-792, 2009.

ERRASTI CABRERA, M. et al. Caracterización de un motor diesel trabajando con mezclas de aceite de Jatropha y combustible diesel. **Ingeniería Energética**, v. 34, n. 3, p. 198-207, dic. 2013.

FAG - Faculdade Assis Gurgacz. **Cultura do crambe**. Boletim Técnico. Organizador: Renato Cassol de Oliveira [e outros]. Assoeste, Cascavel, 2013. 70p.:il.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAO statistical year book 2013**: world food and agriculture. Roma: FAO, 2013, 289 p., il.

FERNANDES JÚNIOR, V.J. et al. Caracterização de resíduo sólido formado em biodiesel de sebo bovino. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 10, p. 1901-1906, 2012.

FEROLDI, M. et al. Cultivo do crambe: potencial para produção de biodiesel. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 2, p. 11-22, 2012.

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

FERRARI, R.A.; SOUZA, W.L. Avaliação da estabilidade oxidativa de biodiesel de óleo de girassol com antioxidantes. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 106-111, 2009.

FIGLIARESE, D.A. et al. Metodologia experimental para avaliação de custos de produção e utilização de biodiesel: estudo de caso de quatro ésteres metílicos e óleo diesel comercial. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 11, p. 1921-1926, nov. 2011.

FIGLIARESE, D.A. et al. Desempenho de um motor de trator agrícola em bancada dinamométrica com biodiesel de óleo de frango e misturas binárias com óleo diesel. **Ciência Rural**, v. 42, n. 4, p.660-666, abr. 2012.

FRANCESQUETT, J.Z. et al. Determinação do poder calorífico de combustíveis por espectroscopia no infravermelho e análise multivariada. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 4., 2010, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Disponível em: < <http://oleo.ufla.br/site/trabalhos/buscar-trabalhos/#!/codigo/50109c92c529da919b237c2e7b74b6d0> >. Acesso em: 13 out. 2013.

GABRIEL FILHO, A. et al. Desempenho de trator agrícola em três superfícies de solo e quatro velocidades de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 333-339, mar. 2010.

GHESTI, G.F. et al. A educação ambiental na engenharia e a reciclagem de óleo residual coletado: projeto de extensão Biogama. **Participação**, Brasília, v. 19, p. 29-37, jun. 2011.

GODEŠA, T.; JEJČIČ, V.; POJE, T. Characteristics of a tractor engine using mineral and biodiesel fuels blended with rapeseed oil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 67, n. 5, p. 510-516, sept.-oct. 2010.

GROTTA, D.C.C. et al. Biodiesel etílico filtrado de óleo residual de soja: desempenho de um trator agrícola na operação de gradagem. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 30, n. 2, p. 135-138, 2008.

GUARIEIRO, L.L.N. et al. Metodologia analítica para quantificar o teor de biodiesel na mistura biodiesel: diesel utilizando espectroscopia na região do infravermelho. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 421-426, 2008.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2006**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 13 mar. 2013.

IEA - International Energy Agency. **Key world energy statistics**. Paris: Soregraph, 2012, 80 p., il.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (São Paulo). **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Coordenadores Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tiglea. Instituto Adolfo Lutz, São Paulo, 2008. 1020p. Disponível em: <<http://www.ial.sp.gov.br/>>. Acesso em: 24 mar. 2013.

IPARDES - Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Base de dados do Estado – BDEweb**. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/imp/index.php>>. Acesso em: 15 maio 2013.

JASPER, S.P. et al. Análise energética da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) produzida em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 395-403, maio-jun. 2010.

KRISHNAKUMAR, J.; VENKATACHALAPATHY, V.S.K.; ELANCHELIYAN, S. Technical aspects of biodiesel production from vegetable oils. **Thermal Science**, v. 12, n. 2, p. 159-169, 2008.

KOZERSKI, G.R.; HESS, S.C. Estimativas dos poluentes emitidos pelos ônibus e micro-ônibus de Campo Grande / MS, empregando como combustível diesel, biodiesel ou gás natural. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 2, p. 113-117, abr.-jun. 2006.

LINARES, L.P.F.L.; TEIXEIRA, R.N. Determinação do poder calorífico superior de amostras de biodiesel e avaliação de incerteza. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BODIESEL, 4., 2010, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://oleo.ufla.br/site/trabalhos/buscar-trabalhos/#!/codigo/b8e3ffc5e6e453a01de43a9039f5da9e>>. Acesso em: 13 out. 2013.

LÔBO, I.P.; FERREIRA, S.L.C. Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, 2009.

MACÊDO, L.S. et al. Produção de biodiesel a partir de misturas de óleo de mamona e óleo de babaçu com metanol via catálise alcalina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, VIII, 2009, Uberlândia. **Anais eletrônicos...** Uberlândia: UFU, 2009. Disponível em: <<http://www.cobeqic2009.feq.ufu.br/uploads/media/87022291.pdf>>. Acesso em 16 out. 2013.

MASIERO, G.; LOPES, H. Etanol e biodiesel como recursos energéticos alternativos: perspectivas da América Latina e da Ásia. **Revista Brasileira de Política Internacional**, Brasília, v. 51, n. 2, p. 60-79, dez. 2008.

MAZIERO, J.V.G. et al. Avaliação de emissão de poluentes de um motor utilizando biodiesel de girassol como combustível. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 14, n. 4, p. 287-292, out.-dez. 2006.

McCORMICK, R.L.; WESTBROOK, S.R. **Empirical study of the stability of biodiesel and biodiesel blends**. Milestone Report. may 2007. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

MENEGHETTI, S.M.P.; MENEGHETTI, M.R.; BRITO, Y.C. A reação de transesterificação, algumas aplicações e obtenção de biodiesel. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 1, p. 63-73, 2013.

MESSINEO, A.; VOLPE, R.; ASDRUBALI, F. Evaluation of net energy obtainable from combustion of stabilised olive mill by-products. **Energies**, v. 5, n. 5, p. 1384-1397, 2012.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1996, 722 p.

MOFIJUR, M. et al. Comparative evaluation of performance and emission characteristics of Moringa oleifera and Palm oil based biodiesel in a diesel engine. **Industrial Crops and Products**, v. 53, p. 78– 84, feb. 2014.

MORAIS, V.S. et al. Cor ASTM: um método simples e rápido para determinar a qualidade do biodiesel produzido a partir de óleos residuais de fritura. **Química Nova**, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 587-592, 2013.

NIETIEDT, G.H. et al. Desempenho de motor de injeção direta sob misturas de biodiesel metílico de soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 7, p. 1177-1182, jul. 2011a.

NIETIEDT, G.H. et al. Performance evaluation of a direct injection engine using different blends of soybean (*Glycine max*) methyl biodiesel. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, p. 916-922, sept.-oct. 2011b.

PARENTE, E.J.S. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza, Tecbio, 2003, 66 p.

PEIXOTO, R.C.D. A rede paraense de agricultura familiar e biodiesel. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Humanas**, Belém, v. 3, n. 3, p. 375-384, set.-dez. 2008.

PERES, J.R.R.; BELTRÃO, N.E.M. Oleaginosas para biodiesel: situação e potencial. In: O FUTURO DA INDÚSTRIA: BODIESEL, 2006, Brasília. **Coletânea de Artigos**, coordenação de José Rincon Ferreira, Carlos Manuel Pedroso Neves Cristo, Brasília: MDIC-STI/IEL, 2006. 145p., il.

PIMENTEL, D. et al. Biofuel impacts on world food supply: use of fossil fuel, land and water resources. **Energies**, v. 1, n. 2, p. 41-78, 2008.

PINTO, A.C. et al. Biodiesel: an overview. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 16, n. 6b, nov. 2005.

QUINTELLA, C.M. et al. Cadeia do biodiesel da bancada à indústria: uma visão geral com prospecção de tarefas e oportunidades para P&D&I. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 793-808, 2009.

RABELO, I.D. et al. Estudo de desempenho de combustíveis convencionais associados a biodiesel obtido pela transesterificação de óleo usado em fritura. **Revista Educação & Tecnologia**. Periódico Técnico Científico dos Programas de Pós-Graduação em Tecnologia dos CEFETs-PR/MG/RJ, Curitiba, n. 8, 2004.

REIS, E.F. dos et al. Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 565-571, maio 2013.

RINALDI, R. et al. Síntese de biodiesel: uma proposta contextualizada de experimento para laboratório de química geral. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 5, p. 1374-1380, out. 2007.

ROCHA, D.Q. et al. Determinação da matéria-prima utilizada na produção do biodiesel adicionado ao diesel mineral através de monitoramento seletivo de íons. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 5, p. 1062-1066, 2008.

ROJAS-GONZÁLEZ, A. et al. Evaluación de mezclas biodiésel-diésel en la generación de energía eléctrica. **Ing. Univ. Bogotá**, Colombia, v. 15, n. 2, p. 319-336, jul.-dic. 2011.

SALVADOR, N.; MION, R.L.; BENEZ, S.H. Consumo de combustível em diferentes sistemas de preparo periódico realizados antes e depois da operação de subsolagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 3, p. 870-874, jun. 2009.

SANTOS, J.I. et al. Yield response in crambe to potassium fertilizer. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 297-300, may 2013.

SILVA, P.R.F.; FREITAS, T.F.S. Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 3, p. 843-851, mai.-jun. 2008.

SILVA, S.P.R. et al. Caracterização calorimétrica dos biodieseis de origem vegetal e animal e análise econômica das misturas bx em motores diesel. . In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 4., 2010, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Disponível em: < <http://oleo.ufla.br/site/trabalhos/buscar-trabalhos/#!/codigo/93c220348c1743ec0505307cbece01d5> >. Acesso em: 13 out. 2013.

SILVA, M.J. da et al. Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 320-326, 2012a.

SILVA, M.J. da et al. Valor calorífico para composições com biodiesel da gordura de frango e óleo diesel. **Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 5, n. 1, p. 110-116, 2012b.

SORANSO, A.M. et al. Desempenho dinâmico de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado de óleo residual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 553-559, 2008.

SORATTO, R.P. et al. Effect of fertilization at sowing nutrition and yield of crambe in seond season. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 658-666, june 2013.

TABILE, R.A. et al. Biodiesel de mamona no diesel interior e metropolitano em trator agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 412-423, set. 2009.

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

VOLPATO, C.E.S. et al. Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B100). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1125-1130, ago. 2009.

VOLPATO, C.E.S. et al. Performance of cycle diesel engine using biodiesel of olive oil (B100). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 3, p. 348-353, june, 2012.

WAZILEWSKI, W.T. et al. Avaliação das propriedades físico-químicas do biodiesel metílico de óleo de Crambe Abyssínica Hochst. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 1, n. 1, p. 187-195, 2012.

WAZILEWSKI, W.T. et al. Study of the methyl crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) and soybean biodiesel oxidative stability. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 207–212, may 2013.

XUE, J. et al. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, i. 2, p. 1098–1116, feb. 2011.

YANAI, K. et al. Desempenho auxiliar de trator com e sem o acionamento da tração dianteira auxiliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 8, p. 1427-1434, ago. 1999.

ZULETA, E.C. et al. The oxidative stability of biodiesel and its impact on the deterioration of metallic and polymeric materials: a review. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 12, p. 2159-2175, dec. 2012.

## ANEXOS

## ANEXO A

Tabela 9. Potência gerada (KW) pelo conjunto motor-gerador

Potência Gerada (KW)							
	Mistura	Carga (KW)	Repetições				
			R1	R2	R3	R4	R5
<b>DIESEL</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	0,8881	0,8795	0,8655	0,8643	0,8811
		<b>2</b>	1,8162	1,8105	1,8043	1,7949	1,8029
		<b>3</b>	2,6744	2,7208	2,6853	2,6932	2,6754
		<b>4</b>	3,4435	3,4148	3,4194	3,4065	3,3926
		<b>5</b>	3,4073	3,4197	3,3928	3,4071	3,3752
<b>CRAMBE</b>	<b>B10</b>	<b>1</b>	0,8519	0,8556	0,8481	0,8390	0,8336
		<b>2</b>	1,7250	1,8117	1,7954	1,7683	1,7688
		<b>3</b>	2,4921	2,5833	2,5626	2,5550	2,5753
		<b>4</b>	3,1260	3,1817	3,1593	3,1589	3,1502
		<b>5</b>	3,4075	3,4062	3,3572	3,3776	3,3533
	<b>B20</b>	<b>1</b>	0,8278	0,8872	0,8788	0,8698	0,8664
		<b>2</b>	1,7781	1,8193	1,8095	1,7770	1,7889
		<b>3</b>	2,5115	2,6042	2,5964	2,5875	2,5884
		<b>4</b>	3,0933	3,0330	3,0301	3,0529	3,0896
		<b>5</b>	3,4804	3,4772	3,4288	3,3469	3,3220
	<b>B50</b>	<b>1</b>	0,8650	0,8634	0,8586	0,8533	0,8503
		<b>2</b>	1,7939	1,7888	1,7862	1,7682	1,7806
		<b>3</b>	2,6636	2,6608	2,6490	2,6419	2,6414
		<b>4</b>	3,2764	3,3135	3,3067	3,2997	3,3168
		<b>5</b>	3,3195	3,3100	3,3286	3,3179	3,3408
	<b>B100</b>	<b>1</b>	0,6874	0,8591	0,7199	0,8706	0,7910
		<b>2</b>	1,5304	1,4438	1,6358	1,7197	1,5544
		<b>3</b>	2,1832	2,0411	2,4226	2,2929	2,3415
		<b>4</b>	2,6617	2,6846	2,6619	2,5710	2,7445
		<b>5</b>	3,1631	3,1419	3,2467	3,2542	3,0952

continuação da Tabela 9 ...

SOJA	B10	1	0,8792	0,8781	0,8728	0,8584	0,8828
		2	1,8297	1,8305	1,8315	1,7991	1,8553
		3	2,5020	2,5297	2,5168	2,5172	2,5130
		4	2,9963	3,0050	2,9759	2,9268	2,9645
		5	3,3912	3,3991	3,3972	3,3688	3,3959
	B20	1	0,8864	0,8843	0,8792	0,8677	0,8617
		2	1,8169	1,8593	1,8338	1,8315	1,8119
		3	2,6102	2,5837	2,6402	2,5843	2,5724
		4	3,0475	2,9923	3,0128	2,9257	2,9571
		5	3,3968	3,4261	3,3767	3,3681	3,3742
	B50	1	0,8181	0,9004	0,8960	0,8846	0,8771
		2	1,7516	1,8461	1,8230	1,8110	1,8153
		3	2,5478	2,6578	2,6701	2,6833	2,6911
		4	3,1546	3,2245	3,3071	3,3029	3,2963
		5	3,4990	3,4349	3,4083	3,4240	3,4062
	B100	1	0,9078	0,8911	0,8813	0,8852	1,5697
		2	1,8299	1,7707	1,7079	1,7624	2,2089
		3	2,3040	2,3676	2,2581	2,2368	2,4635
		4	2,6700	2,6033	2,6460	2,6765	3,0697
		5	3,1529	3,1557	3,1232	3,0776	0,9533
FRITURA	B10	1	0,8901	0,8813	0,8769	0,8721	0,8661
		2	1,9676	1,8170	1,8221	1,8193	1,8193
		3	2,7723	2,7688	2,7490	2,7458	2,7430
		4	3,1339	3,3335	3,3620	3,3493	3,2896
		5	3,4020	3,3787	3,3916	3,3933	3,3961
	B20	1	0,8609	0,8820	0,8728	0,8687	0,8702
		2	1,8332	1,8291	1,8217	1,8005	1,8061
		3	2,6879	2,7056	2,6973	2,6747	2,6815
		4	3,1267	3,1009	3,1030	3,0778	3,0652
		5	3,3443	3,3772	3,3838	3,3468	3,3290
	B50	1	0,8787	0,8775	0,8740	0,8652	0,8629
		2	1,7197	1,8060	1,8097	1,7808	1,7811
		3	2,5331	2,5859	2,5585	2,5515	2,5771
		4	2,9793	3,0183	3,0164	3,0070	2,9995
		5	3,2885	3,2487	3,2469	3,2132	3,2306
	B100	1	0,8639	0,8640	0,7517	0,8442	0,8177
		2	1,4214	1,5959	1,4928	1,3659	1,7245
		3	1,9661	2,5062	1,9543	1,7724	2,2222
		4	2,4583	2,5471	2,5219	2,5566	2,5090
		5	3,0047	3,0632	3,0475	3,0533	3,0436

## ANEXO B

Tabela 10. Consumo específico (Kg KW h<sup>-1</sup>)

Consumo Específico (Kg KW h <sup>-1</sup> )							
	Mistura	Carga (KW)	Repetições				
			R1	R2	R3	R4	R5
DIESEL	0	1	0,8603	0,8687	0,8827	0,9428	0,8671
		2	0,5048	0,5064	0,5081	0,5108	0,5085
		3	0,4190	0,4118	0,4173	0,4161	0,4379
		4	0,3846	0,3878	0,3724	0,3738	0,3753
		5	0,3588	0,3426	0,3453	0,3588	0,3400
GRAMBE	B10	1	0,9932	0,9800	0,9856	0,9842	0,9936
		2	0,5688	0,5486	0,5465	0,5592	0,5475
		3	0,4582	0,4391	0,4386	0,4399	0,4355
		4	0,3906	0,3934	0,3937	0,3938	0,3941
		5	0,3695	0,3682	0,3728	0,3615	0,3641
	B20	1	0,9680	0,9460	0,9750	0,9810	0,9530
		2	0,5189	0,5204	0,5140	0,5420	0,5228
		3	0,4270	0,4275	0,4290	0,4305	0,4230
		4	0,3945	0,3740	0,3909	0,3820	0,3750
		5	0,3660	0,3748	0,3572	0,3740	0,3714
	B50	1	0,9830	0,9850	0,9860	0,9790	0,9680
		2	0,5189	0,5204	0,5501	0,5264	0,5228
		3	0,4270	0,4275	0,4489	0,4305	0,4306
		4	0,3945	0,3901	0,3909	0,3917	0,3897
		5	0,3893	0,3748	0,3572	0,3740	0,3714
	B100	1	0,9840	0,9658	0,9790	0,9922	1,0258
		2	0,5643	0,5340	0,5410	0,5463	0,5660
		3	0,4603	0,4350	0,4530	0,4380	0,4616
		4	0,4080	0,4113	0,4109	0,3950	0,3976
		5	0,3770	0,3845	0,4020	0,3704	0,3912

continuação da Tabela 10 ...

SOJA	B10	1	1,0240	0,9890	1,0131	1,0301	1,0047
		2	0,5877	0,5819	0,5591	0,5635	0,5450
		3	0,4597	0,4608	0,4601	0,4488	0,4485
		4	0,4191	0,4025	0,3952	0,3983	0,4280
		5	0,3760	0,3897	0,3920	0,3920	0,3860
	B20	1	0,9798	0,9850	0,9848	0,9919	1,0108
		2	0,5858	0,5586	0,5509	0,5572	0,5604
		3	0,4601	0,4658	0,4500	0,4518	0,4518
		4	0,4249	0,4026	0,3965	0,4065	0,3979
		5	0,3940	0,3820	0,3860	0,3870	0,3650
	B50	1	1,0488	0,9870	0,9896	0,9817	0,9760
		2	0,5570	0,5420	0,5730	0,5746	0,5690
		3	0,4310	0,4520	0,4899	0,4874	0,4600
		4	0,4250	0,4185	0,4073	0,4055	0,4078
		5	0,3940	0,3985	0,3790	0,3930	0,3870
	B100	1	1,0340	1,0140	1,0160	0,9920	0,9970
		2	0,5828	0,5963	0,5918	0,5931	0,5530
		3	0,4732	0,4661	0,4652	0,4898	0,4458
		4	0,4294	0,4343	0,4363	0,4313	0,4115
		5	0,4039	0,3985	0,4010	0,4035	0,3840
FRITURA	B10	1	0,9453	0,9577	0,9712	0,9796	0,9774
		2	0,5510	0,5720	0,5640	0,5590	0,5379
		3	0,4679	0,4537	0,4458	0,4417	0,4458
		4	0,4037	0,3979	0,3953	0,3991	0,3978
		5	0,3640	0,3887	0,3766	0,3690	0,3859
	B20	1	0,9713	0,9452	0,9523	0,9597	0,9493
		2	0,5493	0,5477	0,5429	0,5521	0,5462
		3	0,4393	0,4440	0,4368	0,4405	0,4346
		4	0,3896	0,3920	0,3992	0,3975	0,3958
		5	0,3805	0,3684	0,3707	0,3771	0,3692
	B50	1	0,9686	0,9788	0,9591	0,9628	0,9654
		2	0,5896	0,5628	0,5560	0,5650	0,5649
		3	0,4534	0,4561	0,4559	0,4623	0,4557
		4	0,4141	0,4053	0,4073	0,4085	0,4096
		5	0,3822	0,3949	0,3839	0,3863	0,3835
	B100	1	0,9907	0,9784	0,9860	0,9983	1,0274
		2	0,6389	0,6019	0,6277	0,6264	0,5966
		3	0,5055	0,4666	0,4857	0,5297	0,4779
		4	0,4362	0,4292	0,4283	0,4286	0,4368
		5	0,4055	0,4012	0,4024	0,4059	0,4046