



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA



Isabele Oliveira de Paula

**UTILIZAÇÃO DE ÓLEO E ÉSTER-ETÍLICO DE BOCAIÚVA  
(*ACROCOMIA ACULEATA*) EM UM GRUPO GERADOR A DIESEL**

Dourados  
2018

Isabele Oliveira de Paula

**UTILIZAÇÃO DE ÓLEO E ÉSTER-ETÍLICO DE BOCAIÚVA  
(*ACROCOMIA ACULEATA*) EM UM GRUPO GERADOR A DIESEL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade federal da Grande Dourados como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Silva

Dourados

2018

Isabele Oliveira de Paula

**UTILIZAÇÃO DE ÓLEO E ÉSTER-ETÍLICO DE BOCAIÚVA  
(ACROCOMIA ACULEATA) EM UM GRUPO GERADOR A DIESEL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade federal da Grande Dourados como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Energia.

Aprovado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ramon Eduardo Pereira Silva – UFGD – Orientador

---

Prof. Dr. Augusto Salomão Bornschlegell

---

Prof. Dr. Omar Seye - UFGD

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

P324u Paula, Isabele Oliveira De  
Utilização de óleo e éster-etílico de bocalúva (*acrocomia aculeata*)  
em um grupo motogerador a diesel / Isabele Oliveira De Paula --  
Dourados: UFGD, 2018.  
47f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Ramon Eduardo Pereira Silva

TCC (Graduação em Engenharia de Energia) - Faculdade de  
Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados.  
Inclui bibliografia

1. Motogerador. 2. Diesel. 3. Bocalúva. 4. Performance. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

*Porque, assim como o céu é mais alto do que a terra, assim são os meus caminhos mais altos que do que os vossos caminhos, e os meus pensamentos mais altos do que os vossos pensamentos. (Isaías 55,9)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelas portas abertas e a força entregue a mim durante o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ramón Silva, pela sabedoria, apoio e paciência demonstrados durante a construção desse trabalho.

A minha família, pelo apoio emocional e pelo incentivo demonstrados durante toda a minha graduação.

Aos meus amigos Natália Belizário da Silva, Yasmin Enz Ponez, Juliana Arguellode Oliveira e Thiago Voigtlander Pereira que literalmente sujaram suas mãos por esse trabalho.

A minha grande amiga Bruna dos Santos Miranda, pelo constante apoio, por ouvir todos os desabafos e deixar seu computador sempre à disposição.

Aos professores Carlos Alberto Chuba Machado e Cristiano Márcio Alves de Souza por ceder seus equipamentos e auxiliarem com tanta boa vontade em seu uso.

Ao professor Omar Seye pelo auxílio nas análises de poder calorífico. Ao professor Rogério Da Silva Santos pela atenção e incrível disposição no ensino do preparo do éster-etílico.

Aos técnicos José Carlos Venturin, Jair Paulo Costa, Sérgio Antônio Apolônio e Alexandre Zuiewskiy pelo auxílio nos experimentos e toda a dedicação demonstrada aos alunos.

As alunas Aline, Ariana Alves e todas as pesquisadoras do laboratório GEPAC por toda a paciência, auxílio e dicas dadas no manuseio das boicaiuvas.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

Diante das atuais preocupações em relação ao efeito estufa e os poluentes gerados pelo uso de combustíveis fósseis, vários estudos estão sendo conduzidos atualmente para encontrar soluções alternativas para geração de energia e para o setor de transportes. Uma alternativa encontrada é o uso do éster-etílico de origem vegetal em substituição parcial do óleo diesel mineral. O biodiesel já sendo produzido e misturado ao diesel comercial, porém a pesquisa por novas fontes de biodiesel, cada vez mais vantajosas continua. Esse trabalho investiga o uso do óleo de bociúva, fruta típica do cerrado brasileiro, como insumo energético e matéria-prima para a produção de éster-etílico. Foram realizados ensaios de teor de óleo nos frutos, massa específica e poder calorífico. Também foram feitos ensaios de desempenho e emissão de poluentes em um motogerador a diesel: foram levantados dados de potência efetiva, consumo específico, rotação e emissão de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CH<sub>4</sub>. O comportamento do óleo de bociúva se mostrou melhor que do éster-etílico. Em sua maioria, as emissões não se comportaram como esperado. Por isso, é sugerido que o experimento seja refeito para comprovar os resultados obtidos.

Palavras-Chave: Motogerador, Diesel, Bociúva, Performance.

## ABSTRACT

Faced with current concerns about the greenhouse effect and the pollutants generated by the use of fossil fuels, several studies are currently being conducted to find alternative solutions for power generation and for the transportation sector. An alternative found is the use of the ethyl ester of vegetable origin in partial replacement of the mineral diesel oil. Biodiesel is already being produced and mixed with commercial diesel, but the search for new sources of biodiesel, increasingly advantageous continues. This work investigates the use of bocaiúva oil, a typical Brazilian fruit, as an energy input and raw material for the production of ethyl ester. Tests of oil content in fruits, specific mass and high heat value were carried out. Performance and pollutant emission tests were also carried out on a diesel motor generator: data on actual power, specific consumption, rotation and emission of CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and CH<sub>4</sub> were collected. The behavior of the bocaiúva oil was better than that of the ethyl ester. For the most part, the emissions did not behave as expected. Therefore, it is suggested that the experiment be redone to prove the results obtained.

Keywords: Engine-driven generator, Diesel, bocaiúva, performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bocaiúva ou Macaúba .....	23
Figura 2. Equipamentos utilizados na extração de óleo .....	24
Figura 3. Equipamentos usados na obtenção do éster-etílico .....	25
Figura 4. Equipamentos utilizados no ensaio com o motogerador .....	26
Figura 5. Bancada Completa .....	27
Figura 6. Óleo de bocaiúva resultante do processo .....	28
Figura 7. Bomba Calorimétrica .....	29
Figura 8. Aparência dos frutos da bocaiúva em todas as etapas de manipulação ...	32
Figura 9. Aparência do óleo, glicerina e éster-etílico .....	34
Figura 10. Rotação x potência efetiva (éster-etílico) .....	35
Figura 11. Potência efetiva x potência demandada (éster-etílico) .....	36
Figura 12. Consumo específico x potência efetiva (éster-etílico) .....	36
Figura 13. CO .....	37
Figura 14. CO <sub>2</sub> .....	38
Figura 15. Temperatura do gás .....	39
Figura 16. CH <sub>4</sub> .....	39
Figura 17. NO <sub>2</sub> .....	40
Figura 18. Potência efetiva x potência demandada .....	41
Figura 19. Rotação x potência efetiva .....	42
Figura 20. Consumo específico x potência efetiva .....	42

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>1.1 Objetivo</b> .....	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	12
<b>2.1 Geração distribuída e motogeradores</b> .....	12
<b>2.2 Motor Diesel</b> .....	13
<b>2.3 Utilização de óleos vegetais em motores diesel</b> .....	13
<b>2.4 Utilização de ésteres em motores diesel</b> .....	14
<b>2.5 Processo de transesterificação</b> .....	15
<b>2.6 Características físico-químicas</b> .....	16
2.6.1 Massa específica .....	17
2.6.2 Viscosidade Cinemática .....	17
2.6.3 Poder Calorífico .....	18
2.6.4 Água e sedimentos .....	18
2.6.5 Ponto de Fulgor .....	19
<b>2.7 Caracterização de biocombustíveis</b> .....	19
2.7.1 Análise Imediata .....	19
2.7.2 Análise Elementar .....	20
<b>2.8 Combustão de biocombustíveis</b> .....	20
<b>2.9 Bocaiúva</b> .....	22
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	24
<b>3.1 Materiais</b> .....	24
3.1.1 Preparação dos frutos e extração do óleo da bocaiuva .....	24
3.1.2 Obtenção do éster-etílico .....	25
3.1.3 Ensaio com o motogerador .....	26
<b>3.2 Metodologia</b> .....	28
3.2.1 Preparação dos frutos .....	28
3.2.2 Extração do óleo .....	28
3.2.3 Produção de éster-etílico .....	29
3.2.4 Poder Calorífico Superior .....	29
3.2.5 Preparação das misturas e Massa específica .....	30
3.2.6 Ensaio no motogerador .....	30

<b>3.3 Tratamento dos dados</b> .....	31
3.3.1 Massa Específica ( $\rho$ ) .....	31
3.3.2 Consumo de Combustível (C) .....	31
3.3.3 Consumo Específico ( $C_e$ ) .....	31
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	32
<b>4.1 Manipulação dos frutos</b> .....	32
<b>4.2 Poder Calorífico</b> .....	33
<b>4.3 Massa Específica</b> .....	34
<b>4.4 Éster-etílico</b> .....	34
<b>4.5 Desempenho do éster-etílico</b> .....	35
<b>4.6 Emissão de gases das misturas B00, B50 e O50</b> .....	37
<b>4.7 Desempenho das misturas de óleo de bociúva</b> .....	41
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	43
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	43
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	44

## 1. INTRODUÇÃO

As preocupações atuais com o esgotamento dos combustíveis fósseis, com o aumento dos seus custos, somados com os prejuízos causados ao meio ambiente pelo seu uso, têm levado a busca de alternativas energéticas renováveis e menos impactantes ao meio ambiente.

O biodiesel pode ser considerado como uma dessas alternativas, pois é um combustível proveniente de biomassa de origem animal ou vegetal, ou seja, de material orgânico com origem no processo de fotossíntese e que está em contínuo ciclo na natureza, sendo considerado dessa maneira, renovável e mais limpo.

A ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) define o biodiesel como sendo um combustível para uso em motores de combustão interna com ignição por compressão, renovável e biodegradável, derivado de óleos vegetais ou gordura animal que pode ser usado na substituição parcial ou integral do óleo diesel de origem fóssil.

O diesel é derivado do petróleo e composto por hidrocarbonetos, nitrogênio, enxofre e oxigênio. Ele é usado principalmente em veículos rodoviários, ferroviários, marítimos e em geradores de energia elétrica (ANP, 2017)

Segundo relatórios do BEN (Balanço Energético Nacional) em 2015 o setor de transportes utilizou o diesel em 44,4% de suas atividades, enquanto o biodiesel foi utilizado em somente 2,3% das suas atividades. Apesar dos números de consumo de diesel ainda serem relativamente altos, esses números vêm diminuindo, tendo uma queda de 4,3% do ano de 2014 para o ano de 2015.

Os veículos a diesel podem emitir centenas de poluentes a atmosfera, sendo o NOx um dos emitidos em maiores concentrações, cerca de cinco vezes mais que os motores a gasolina. Devido a forma de ignição dos motores a diesel, o combustível não se mistura totalmente com o ar antes da ignição e isso causa alta emissão também de material carbonáceo (Guarierio, L. L. N. et al, 2011).

A utilização de biodiesel pode contribuir para a redução da emissão de diversos poluentes para a atmosfera. Esse combustível é geralmente produzido em reações de transesterificação, em que óleos de origem vegetal ou animal reagem com um álcool na presença de catalisador e geram biodiesel e glicerina. A utilização do

biodiesel causa principalmente uma diminuição das emissões de CO, gás tóxico ao ser humano (Guarieiro, L. L. N. et al, 2011).

O Brasil já está entre um dos maiores produtores de biodiesel do mundo, junto aos Estados Unidos. Nos últimos anos a produção chegou a 7,2 bilhões de litros. O uso desse combustível contribui na diminuição das importações de diesel e favorece por meio do incentivo à produção, a agricultura familiar e o agronegócio brasileiro (PORTAL BRASIL, 2017).

### **1.1 Objetivo**

O objetivo desse estudo é comparar o desempenho e as emissões de um motor diesel quando alimentado com misturas de diferentes proporções de diesel e éster-etílico feito a partir de Bocaiúva.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Geração distribuída e motogeradores**

Geração distribuída é a geração de energia que é realizada junto ou próxima do consumidor, qualquer que seja a potência, a fonte de energia ou a tecnologia utilizada. Exemplos desse tipo de geração são: cogeneradores, geradores que usam resíduos como combustíveis, geradores de emergência ou de operação no horário de ponta, painéis fotovoltaicos e pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) (INEE, s/d).

A geração distribuída nada mais é quando o consumidor gera a sua própria energia elétrica. Essa prática é possível desde 2012 e pode ser aliada com o fornecimento do excedente para a rede de distribuição. Dentre as vantagens da geração distribuída estão o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2017).

Em regiões isoladas ou remotas como áreas rurais, por exemplo, o fornecimento de energia elétrica se dá por meio de motogeradores a diesel, que é uma forma de geração com altos custos de operação e manutenção e logística de combustível (BRENNEISEN, 2013)

Os motogeradores são geradores acionados por motores de combustão interna semelhantes aqueles utilizados em veículos, possuindo emissões de gases semelhantes à de ônibus e caminhões. Porém, esses veículos trabalham na maior parte do tempo em regime permanente, o que traz uma vantagem ambiental causada pelo fato das acelerações desacelerações típicas de um veículo resultarem em fatores médios de emissão de poluentes (BARROS, 2007).

Um Grupo Motor Gerador (GMG) a diesel é um equipamento que possui um motor a diesel acoplado a um gerador e montado sobre uma base metálica, com acionamento manual e automático. Grupos motor geradores podem formar usinas de até 30 MVA. Sua característica principal é transformar energia mecânica em energia elétrica (GALDINO, 2011).

## **2.2 Motor Diesel**

Em um motor ciclo diesel, o pistão comprime somente ar, até que o mesmo atinja uma temperatura elevada. O combustível é injetado quando o pistão se aproxima do ponto morto superior e este reage com o oxigênio sem a necessidade de faísca, diferentemente dos motores a ciclo otto. Nesse motor é difícil obter rotações elevadas, pois é improvável que ocorra a combustão completa do combustível ao se aumentar o ritmo do pistão. De forma semelhante ao motor ciclo otto, o ciclo diesel ocorre em quatro tempos: Admissão, compressão, combustão e escape (Brunetti, 2012).

## **2.3 Utilização de óleos vegetais em motores diesel**

O óleo vegetal bruto, que pode ser obtido pelo esmagamento dos grãos das mais diversas plantas oleaginosas é uma alternativa ao diesel tradicional, tendo como maior vantagem em relação a este, o fato de ser regenerativo, neutro quanto à emissão de CO<sub>2</sub> e praticamente livre de enxofre, metais pesados e radioatividade, além de ser abundante e renovável. O óleo vegetal pode ser obtido em todos os países e sob as mais variáveis condições climáticas, pois pode ser retirado de diversas fontes. Entre outras vantagens está o fato de que esse combustível não é volátil, inflamável, nem explosivo, podendo ser armazenado sem riscos por longos períodos de tempo (CPT, 2017).

A utilização do óleo vegetal tornou-se uma opção reconhecida principalmente na Europa. Na União Europeia os óleos são biocombustíveis reconhecidos e regulamentados, onde são utilizados em caminhões, ônibus, picapes, tratores, carros de passeio, barcos e geradores desde 2003. O Brasil possui uma grande capacidade de produção desses óleos, que podem ser de diversas fontes, como dendê, macaúba, babaçu, tucum, coco, buriti, castanha, macadâmia, pinhão, amendoim, soja e canola (GUERRA et al, 2010).

O óleo vegetal é energia solar acumulada bioquimicamente em densidade máxima e é, portanto, uma forma mais densa de energia da fotossíntese quando comparada a matérias biológicas sólidas e com o biogás. Sua densidade energética é de cerca de 9,2 kWh por litro, situando-se entre a gasolina (8,6 kWh/l) e o diesel (9,8 kWh/l). Sua constituição é basicamente de carbono, hidrogênio e um pouco de oxigênio (IICA, 2009).

Muitos estudos propõem os óleos vegetais como alternativa ao diesel mineral, porém a alta viscosidade e a massa molecular dos óleos geram problemas ligados a baixa volatilidade e atomização. Essas propriedades do combustível geram uma combustão incompleta e forma depósitos no motor (Guarieiro, L. L. N. et al, 2011). Uma solução para reduzir a alta viscosidade dos óleos vegetais, é instalar um sistema de preaquecimento posicionado antes da bomba injetora (GUERRA et al, 2010).

MAZIERO et al. (2007) substituiu o diesel mineral pelo óleo bruto de girassol, o que gerou uma redução acentuada no desempenho mecânico do motor, assim como alterações no mesmo, como contaminação do óleo lubrificante e formação de incrustações no motor.

## **2.4 Utilização de ésteres em motores diesel**

A substituição de forma abrupta do biodiesel pelo diesel não é a melhor forma de introduzir o uso do combustível pelos consumidores, por isso ele é geralmente misturado com o diesel comum, formando misturas. No Brasil, atualmente, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) determina que até março de 2018 o teor de biodiesel no diesel comercial vendido nos postos será de 9%, enquanto nos testes com fim de pesquisa, são utilizadas diversas misturas, com diferentes proporções diesel-biodiesel e diferentes origens de biodiesel.

O biodiesel tem menor poder calorífico e maior viscosidade quando comparado com o diesel de origem fóssil. Isso causa uma diminuição da performance do motor, com menores valores de torque. Porém as emissões de CO e fumaça das misturas contendo parcelas de biodiesel foram menores, enquanto as de CO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> foram maiores que as de diesel puro. Apesar da importância da economia de combustível, o uso combinado do biodiesel em motores traz grandes vantagens ambientais e não necessita nenhuma modificação nos mesmos. Algumas desvantagens como a alta viscosidade podem ser compensadas com o uso de aditivos ou se modificando a injeção de combustível (Çelikten *et al.*, 2012).

Segundo Rahman *et al.* (2014) o biodiesel é um dos melhores combustíveis alternativos com potencial para substituir o diesel fóssil, diminuindo assim a dependência do combustível e a poluição do meio-ambiente. Os biodieseis produzidos pelo autor foram misturados na proporção de 10% com o diesel fóssil e testados em um motor diesel. Eles reduziram a emissão de CO de 11 a 14% e de HC de 12 a 16%. Porém eles aumentaram a emissão de NO de 7 a 9% e a de CO<sub>2</sub> de 5 a 7% em relação ao diesel fóssil. Esses resultados podem ser atribuídos aos altos níveis de oxigênio e cetano presentes na mistura.

Entre as desvantagens do biodiesel está o fato de que ele age como um solvente, causando problemas com mangueiras e juntas do motor, além de ser bastante higroscópico (absorve água e dilui óleos do motor, o que leva à necessidade maior de trocas de óleo e filtros que nos motores a diesel ou óleo vegetal) (GUERRA et al, 2010).

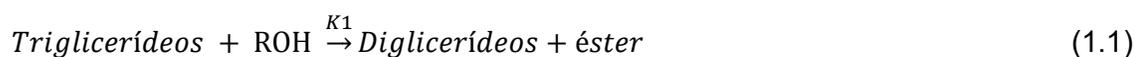
Salvador (s/d) substituiu o óleo diesel por misturas de diferentes composições de éster metílico e óleo diesel e concluiu que quando usado misturas com até 67% de biodiesel no óleo diesel, não há variação na potência efetiva do motor. Além disso as misturas não alteraram significativamente o consumo específico, a eficiência térmica ou a eficiência volumétrica. Também não foram encontrados acúmulos anormais de resíduos no interior do motor.

## **2.5 Processo de transesterificação**

A transformação do óleo bruto é usada para ajudar a solucionar os problemas da utilização do óleo bruto como combustível. A transesterificação, processo de transformação mais comum, reduz em um terço o peso molecular dos triglicerídeos

do óleo, o que causa uma diminuição na sua viscosidade e melhora sua volatilidade a partir da formação de ésteres alquílicos de ácidos graxos. As características físico-químicas do biodiesel obtido são muito próximas do diesel fóssil e a eficiência de combustão é praticamente a mesma (Tomazin Júnior, 2008).

O processo de obtenção de combustível a partir de óleos vegetais mais comum é o processo de transesterificação, que tem como produto um éster, conhecido por biodiesel. Nesse tipo de reação, óleo e álcool podem reagir a 220-235°C em três etapas, conforme mostrado nas equações a seguir:



(Fonte: Schneider, s/d)

Os óleos vegetais são compostos por triglicerídeos (uma molécula de glicerol ligada a três de ácido graxo) e de ácidos graxos livres. No processo de transesterificação os triglicerídeos são transformados em moléculas menores de ésteres de ácido graxo (biodiesel). As reações com maior rendimento são aquelas a partir de ácidos graxos de cadeias curtas e além do biodiesel, obtém-se um subproduto chamado glicerina ou glicerol, que tem aplicações farmacêuticas e químicas (AGEITEC, s/d).

O álcool mais utilizado na obtenção do biodiesel é o metanol, que promove melhores rendimentos e deve ser colocado em excesso na reação, para aumentar o rendimento de alquil ésteres e permitir a formação de uma fase separada de glicerol. A reação deve ser conduzida em um reator com agitação e a temperatura do processo pode ser ambiente ou até 70°C (AGEITEC, s/d).

## 2.6 Características físico-químicas

A qualidade do biodiesel varia de acordo com as estruturas moleculares dos seus ésteres constituintes ou devido à presença de contaminantes provenientes da matéria prima, da produção ou da estocagem do combustível. Diante desse fato, são estabelecidos parâmetros que permitem quantificar essa qualidade, estabelecendo

padrões, com o objetivo de não prejudicar a qualidade das emissões da queima, bem como o desempenho, a integridade do motor e a segurança no transporte e manuseio. (Lôbo et al., 2009).

A Resolução nº 07 de 2008 (RANP 07/08) estabelecida pela ANP, que substituiu a Resolução nº 42 de 2004, torna os critérios de avaliação da qualidade do biodiesel brasileiro mais restritivos. Esses padrões foram estabelecidos com base nas normas ASTM D6751 e EN 14214. Além dessas normas a resolução ANP 15/2006 apresenta as especificações para a mistura óleo diesel/biodiesel. Nessas normas, encontram-se os parâmetros provenientes da normatização do diesel mineral e os originados de análises de os óleos vegetais, comumente utilizados na indústria óleoquímica. Esses parâmetros, mesmo os originados na normatização do diesel mineral, fornecem resultados bastante esclarecedores quanto à qualidade do biodiesel. Em seguida são discutidos alguns desses parâmetros (Lôbo et al., 2009).

#### 2.6.1 Massa específica

A densidade do biodiesel está ligada com a estrutura molecular das suas moléculas e a presença de impurezas como álcool ou substâncias adulterantes. O biodiesel apresenta maior densidade que o diesel mineral, porém a ASTM não considera esse padrão relevante para a qualidade do biodiesel. Tanto a resolução europeia quanto a brasileira estabelece valores de densidade entre 860 a 900 kg/m<sup>3</sup> (Lôbo et al., 2009).

#### 2.6.2 Viscosidade Cinemática

A viscosidade de um fluido é a medida da sua resistência ao escoamento a uma determinada temperatura. É um parâmetro muito importante no estudo da intercambialidade de combustíveis líquidos, permitindo definir o diâmetro da gota quando necessário substituir por outro combustível. A viscosidade do combustível pode mudar consideravelmente com a temperatura, porém não tanto com a pressão (LORA et al, 2004).

O controle da viscosidade cinemática visa garantir um funcionamento adequado dos sistemas de injeção e bombas de combustível, assim como preservar a lubricidade do biodiesel (BIODIESELBR, 2006). A norma EN 14214 (método

analítico EN ISO 3104) estabelece um intervalo aceitável de viscosidade de 3,5 a 5,0 mm<sup>2</sup>/s. Já a norma ASTM D6751 (método analítico D 445) permite um intervalo de 1,9 a 6,0 mm<sup>2</sup>/s. A faixa de viscosidade permitida pela RAP 07/08 é de 3,0 a 6,0 mm<sup>2</sup>/s (Lôbo et al., 2009).

### 2.6.3 Poder Calorífico

Poder Calorífico do combustível é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa da unidade de massa (1 kg) ou unidade de volume (1 Nm<sup>3</sup>) do combustível, podendo ser expressa em kJ/kg (kcal/kg) ou kJ/Nm<sup>3</sup> (kcal/Nm<sup>3</sup>). Ao incluir o calor latente de vaporização do vapor de água gerado pela combustão do combustível com ar seco, refere-se ao poder calorífico superior (PCS) e quando não se considera este calor latente, está se referindo ao poder calorífico inferior (PCI). O PCI é de maior aplicação para os cálculos de viabilidade econômica, pois na maioria das vezes o calor latente não é recuperado (LORA et al, 2004).

O poder calorífico do biodiesel é próximo ao óleo diesel mineral, tendo uma diferença na ordem de 5%. Entretanto com uma combustão completa, o biodiesel possui um consumo específico equivalente ao do diesel (BIODIESELBR, 2006).

### 2.6.4 Água e sedimentos

A presença de sólidos no biodiesel pode reduzir a vida útil dos filtros dos veículos e prejudicar o funcionamento dos motores. A presença de água em excesso pode contribuir para o aumento da acidez do biocombustível, o que pode torná-lo corrosivo (BIODIESELBR, 2006).

A água está relacionada com a hidrólise do biodiesel, o que resulta em ácidos graxos livres e está associada a proliferação de microrganismos e a corrosão em tanques de estocagem com deposição de sedimentos. O teor de água deve ser monitorado devido ao armazenamento devido ao grau de hidroscopticidade do biodiesel. A norma ASTM D6751 estipula um valor máximo permitido de 0,05%<sub>volum</sub>, enquanto a norma RANP 07/08 e a norma EN fixaram a concentração máxima aceitável de água no biodiesel em 500 mg/kg (Lôbo et al., 2009).

### 2.6.5 Ponto de Fulgor

Ponto de fulgor é a menor temperatura na qual o combustível se vaporiza em quantidades suficientes para formar com o ar uma mistura capaz de inflamar-se quando há a aplicação de uma chama. É um dado de segurança, pois está relacionado a inflamabilidade do combustível (LORA et al, 2004).

A importância do ponto de fulgor é devido ao fato do mesmo ser um indicativo dos procedimentos de segurança a serem tomados durante o uso, transporte, armazenamento e manuseio do combustível. O ponto de fulgor do biodiesel, se completamente isento de metanol ou etanol, é superior a temperatura ambiente, ou seja, esse combustível não é inflamável a condições ambientes normais, não apresentando risco quando é manuseado a condições normais (BIODIESELBR, 2006).

A norma ASTM D6751 (método analítico ASTM D93) fixa um valor mínimo de ponto de fulgor de 130 °C, enquanto a norma EN 14214 (método analítico EN ISO 3679) estabelece o valor de 120 °C e a RANP 07/08 o valor de 100 °C (Lôbo et al., 2009).

## 2.7 Caracterização de biocombustíveis

### 2.7.1 Análise Imediata

A análise imediata é um quantificador dos teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo presentes no combustível. O teor de voláteis mostra a quantidade de compostos orgânicos voláteis que deixam o combustível após o aquecimento do mesmo sob determinadas condições. O teor de cinzas mede a parcela de combustível que vira cinzas após a queima do combustível devido a uma série de reações químicas e minerais que não sofrem reação com a presença da alta temperatura. Após a subtração desses teores da massa total, o que sobra é o carbono fixo (Yi *et al*, 2017).

O teor de umidade é obtido experimentalmente por meio da secagem da biomassa em uma estufa, após cálculos com os valores das massas antes e depois do procedimento. O teor de voláteis e cinzas e é obtido de maneira semelhante,

exceto que a amostra é mantida em um forno mufla a tempos e temperaturas distintas (Singh *et al*, 2017).

Özyüğüran (2017) concluiu que é possível estimar o valor do poder calorífico da biomassa por meio de correlações empíricas com a análise imediata, especialmente em biomassas com valores de poder calorífico relativamente altos (maiores que 20 MJ/kg). Diversos outros estudos sobre a relação entre análise imediata, análise elementar e poder calorífico já foram desenvolvidos.

### 2.7.2 Análise Elementar

A análise elementar inclui os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio. As composições de carbono, hidrogênio e oxigênio do combustível são proporcionais aos teores de carbono fixo, voláteis e cinzas, respectivamente (Yi *et al*, 2017).

A análise elementar pode ser obtida através de um equipamento específico, o analisador elementar, que sujeita as amostras à combustão em uma atmosfera de oxigênio puro. Os gases provenientes dessa combustão são quantificados em um detector de condutividade térmica (Central Analítica IQ-USP, 2014)

Assim como a análise imediata, segundo Setyawati *et al.* (2015), a análise elementar da turfa é correlacionada de forma significativa com o seu poder calorífico por meio de uma equação que relaciona os níveis de hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e cinzas do material. Outros autores propõem outras equações para diferentes combustíveis.

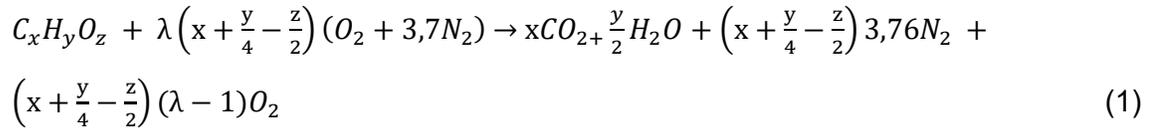
## 2.8 Combustão de biocombustíveis

A combustão é uma reação química exotérmica que ocorre entre o combustível e o comburente, sendo este o ar atmosférico, geralmente composto basicamente de oxigênio (21%) e nitrogênio (78%). Essa reação tem como produtos, além de energia, gases gerados pela combustão completa ou incompleta, que podem ser poluentes ou não (SANTANA, 2015).

Uma combustão completa ocorre quando o ar fornecido a reação contém oxigênio suficiente para combustão total do combustível e seus produtos são o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O) e nitrogênio (N<sub>2</sub>). Na combustão incompleta

são originados diversos outros componentes poluentes, como óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) (SANTANA, 2015).

A reação a seguir mostra uma reação genérica de combustão, em que  $\lambda$  representa a razão de equivalência, uma razão mássica entre a quantidade de ar e combustível real e a teórica ou estequiométrica.



$$\lambda = \frac{AC_{real}}{AC_{estequiométrico}} = \frac{\left(\frac{m_a}{m_c}\right)_{real}}{\left(\frac{m_a}{m_c}\right)_{estequiométrico}} \quad (2)$$

A seguir são mostrados como interpretar o valor de  $\lambda$  na reação de combustão, verificando se a mesma é completa, com o oxigênio presente de forma estequiométrica ou em excesso, ou se a reação ocorre com falta de oxigênio, caracterizando uma reação incompleta:

$\lambda=1$ : Mistura estequiométrica

$\lambda>1$ : Mistura com excesso de oxigênio

$\lambda<1$ : Mistura com pouco oxigênio

A máxima temperatura do gás queimado é atingida quando  $\lambda=1,1$ , em que a concentração de ar é pequena. Conforme a concentração de ar diminui e a mistura é enriquecida, a temperatura do gás diminui e não ocorre à queima total de combustível, e sim absorção de calor. A combustão completa ocorre à medida que a concentração de oxigênio aumenta e a mistura passa a ser mais pobre, o que causa diminuição na temperatura do gás e no pico de produção de óxido nítrico (NO) (LEHMANN, 2015).

## 2.9 Bocaiúva

O biodiesel nacional é feito quase que inteiramente de soja (80%), sebo animal (15%) e algodão (5%). Outras plantas estão sendo estudadas como fontes alternativas, como a mamona, o pinhão-manso, o girassol e o dendê. Porém a bocaiúva ou macaúba também se mostra uma forte candidata devido a sua proliferação natural e adaptação ao clima do país. Outras vantagens são o elevado teor de óleo, compatibilidade com todas as exigências técnicas do combustível, baixo custo e facilidade de produção. A bocaiúva é uma planta perene, que dura cerca de 60 anos, não tem registro de doenças, além de ser muito resistente (BIODIESELBR, 2010).

A bocaiúva (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.), também conhecida como macaúba, bocaiuveira, bacaiúva, coco-babão, coco-baboso, cocomacaúba, coco-de-catarro, coqueiro-de-espinho, macaúba, macaúva, macajuba, maracujá, entre outros, é um fruto do cerrado brasileiro e é encontrada em árvores que chegam a até 20 metros de altura. A bocaiúva é um fruto redondo de coloração que varia de verde oliva a amarela, parda ou amarronzada quando maduros, de casca dura, polpa amarela e viscosa. Cada fruto mede de 2 a 4 cm de comprimento por 3 a 5 cm de diâmetro e pesa de 30 a 50 g e (Brasil, 2015).

A bocaiúva possui valor comercial devido a presença de óleo ou azeite em sua polpa, porém também é consumida in natura, sendo utilizada no preparo de diversos alimentos. A semente contém uma amêndoa redonda, dura, branca e oleaginosa. A produção de frutos maduros ocorre de outubro a dezembro, em Mato Grosso do Sul; e de outubro a janeiro, em São Paulo (Brasil, 2015).

Galvani et al, 2010 observou em seu estudo do óleo da bocaiuva sul-matogrossense que o teor do mesmo em relação à massa total variou de 6,2 a 13,2% e em média foi de 8%. Se tratando do teor de óleo em relação à massa da polpa e da amêndoa os valores variaram de 14,4 a 30,7% e em média foi de 19%. Esses valores provavelmente variam de acordo com a maturação dos frutos.

Figura 1. Bocaiúva ou Macaúba



(FONTE: EMBRAPA, 2014)

A bocaiúva está presente de forma abundante no Cerrado brasileiro e é encontrada também desde o México até a Argentina, numa área de ocorrência estimada em 12 milhões de hectares. Esse fruto, que tem se mostrado uma fonte favorável de óleo para o biodiesel e bioquerosene, têm uma produtividade média geral de 114,1 kg/planta/ano, e uma produtividade esperada de pelo menos 45,6 toneladas/hectare de cachos para uma densidade de cultivo de 400 plantas/hectare. O rendimento bruto de óleo do fruto fresco pode atingir 4 toneladas de óleo/hectare/ano da polpa e 0,8 tonelada de óleo/hectare/ano da amêndoa, considerando-se uma eficiência de 70% da extração. Vários estudos estão sendo realizados para a viabilização do uso da bocaiúva para a produção de biocombustíveis em escala comercial (BIODIESELBR, 2014).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O ensaio foi realizado no laboratório de Máquinas Térmicas, Sistemas Térmicos e Combustão do curso de Engenharia de Energia da UFGD, com instrumentação disponível no local.

#### 3.1 Materiais

A seguir são mostrados os equipamentos utilizados em todos os experimentos descritos neste trabalho. Todos os equipamentos estão localizados nos laboratórios da universidade.

##### 3.1.1 Preparação dos frutos e extração do óleo da bocaiúva

Os equipamentos utilizados em todas as etapas de preparação e extração do óleo dos frutos de bocaiúva descritos na metodologia são listados a seguir:

- a) Estufa
- b) Despoldadora
- c) Mini prensa extrusora (ECIRTEC MPE-40PI)

Figura 2. Equipamentos utilizados na extração de óleo





(c)

(FONTE: PRÓPRIA (a) e SINUELOAGROPECUARIA, s/d (b)).

### 3.1.2 Obtenção do éster-etílico

A seguir são apresentados os principais equipamentos utilizados na produção do éster-etílico a partir do óleo de bociúva. Os equipamentos são:

- a) Ebulidor mergulhão IPX7 (CHERUBINO)
- b) Dispensor de solo SL 115 (SOLAB)
- c) Funil de decantação apoiado em uma garra metálica

Figura 3. Equipamentos usados na obtenção do éster-etílico



(a)



(b)



(c)

(FONTE: PRÓPRIA).

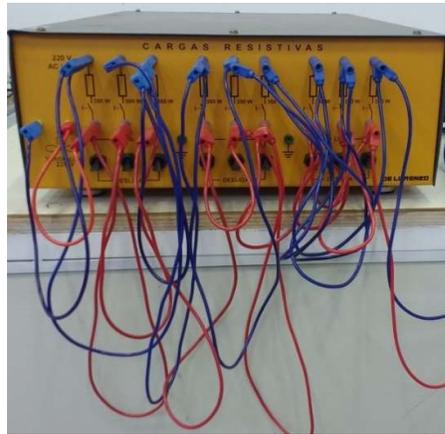
### 3.1.3 Ensaio com o motogerador

A bancada de ensaio era composta por (listadas com as imagens abaixo):

- a) Uma balança;
- b) Um cronômetro (CRONOBIO SW2018);
- c) Um tanque externo de combustível (10 l);
- d) Um multímetro (POLITERM 840);
- e) Banco de capacitores
- f) Analisador de gases (EcoLine 6000)
- g) Um motogerador (Gera Power Brasil GB 3500);
- h) Um tacômetro (Minipa MDT-2238A)

Figura 4. Equipamentos utilizados no ensaio com o motogerador





(e)



(f)



(g)



(h)

(FONTE: PRÓPRIA).

A seguir é apresentada a imagem da bancada completa do experimento de medição de desempenho e emissão de poluentes no motogerador a diesel:

Figura 5. Bancada Completa



(FONTE: PRÓPRIA).

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Preparação dos frutos

Os frutos encontravam-se previamente congelados, logo, com o objetivo de facilitar o manuseio, estes foram secos em uma estufa (Figura2(a)) por cerca de 1 hora a 50°C e depois descascados manualmente.

Depois de descascados, os frutos foram submetidos a uma segunda secagem na mesma temperatura, porém durante um período de cerca de 12 horas para diminuição da umidade. Após esse período, a Bocaiúva foi direcionada para o despulpamento.

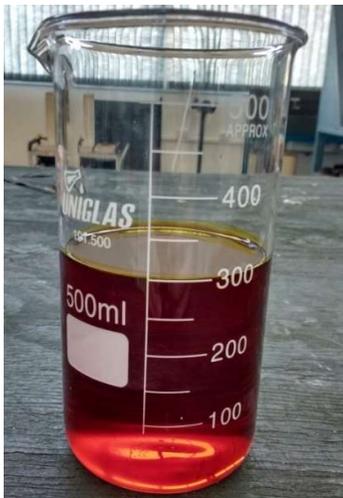
O processo de despulpamento ocorreu com o auxílio de uma despulpadora presente na universidade, mostrada na Figura 2(b).

Uma parte dos frutos foi pesada em cada uma das etapas da manipulação dos frutos para análise da composição de cada um dos seus elementos, sendo eles: casca, umidade, polpa, semente e óleo presente na polpa.

### 3.2.2 Extração do óleo

A polpa resultante do processo anterior foi conduzida a prensa mostrada na Figura 2(c) e o óleo resultante foi coletado, filtrado com o uso de um filtro de papel e é mostrado na figura a seguir:

Figura 6. Óleo de bocaiúva resultante do processo



(FONTE: PRÓPRIA).

### 3.2.3 Produção de éster-etílico

Para o preparo do éster-etílico, foram utilizados óleo de bocaiúva e etanol 95% como reagentes e hidróxido de potássio como catalisador. Inicialmente, o óleo foi aquecido por cerca de 30 minutos com o auxílio de um ebulidor mergulhão (Fig. 3(a)) para que ocorresse a evaporação de parte da umidade. Ao mesmo tempo, foi preparada uma solução de 150 ml de etanol e 1% de KOH (cerca de 1,5g) com o auxílio do dispersor de solo (Fig. 3(b)). Em seguida, 500 ml do óleo, já resfriado a temperatura ambiente foi misturada a solução de etóxi de potássio formada. A mistura foi agitada durante 30 minutos e em seguida transferida para um funil de decantação (Fig. 3(c)), onde permaneceu até que as duas fases (éster e glicerina) fossem formadas.

Depois de separadas as fases, o éster foi misturado com 50 ml de ácido clorídrico 0,1M, procedimento que possibilita que as impurezas presentes no éster-etílico se separem e formem outra fase juntamente com o ácido. As fases são separadas e o procedimento repetido.

### 3.2.4 Poder Calorífico Superior

O poder calorífico superior (PCS) foi realizado com o auxílio de uma bomba calorimétrica da IKA (C200). O método utilizado pelo equipamento constitui-se em pressurizar uma amostra conectada a um fio de algodão que entra em ignição.

Figura 7. Bomba Calorimétrica



(FONTE: PRÓPRIA).

### 3.2.5 Preparação das misturas e Massa específica

As misturas de combustíveis foram preparadas em proporção de volume. Para a preparação das misturas foram utilizados: uma balança Bell Engineering (Mark S3102) com capacidade para 3,1 kg e precisão de 0,01 kg e uma proveta graduada. As misturas com óleo de bociúva foram chamadas de OXX onde XX representa a quantidade de óleo contida na mistura. As misturas feitas a partir do éster etílico foram chamadas de BXX, onde XX, de forma semelhante ao óleo, representa a quantidade em porcentagem de éster-etílico. Foram preparadas duas misturas com óleo: uma na proporção de 50% óleo de bociúva e 50% de diesel (O50) e outra 70% óleo de bociúva e 30% de diesel (O70). Com o éster etílico, foi preparada somente uma mistura com 50% de éster-etílico e 50% de diesel (B50). A partir dos valores de massa e volume coletados na preparação da mistura, foi calculada a massa específica do óleo puro, do éster-etílico e das misturas.

### 3.2.6 Ensaio no motogerador

Os ensaios foram realizados utilizando um motogerador a diesel monocilíndrico (Figura 4(g)). Para variar a carga demandada, foi utilizado um banco de resistências (Figura 4(e)). A tabela 1 mostra as especificações do motogerador utilizado.

Tabela 1. Especificações do Motogerador

	Valor	Unidade
Potência Nominal	3,80	kVA
Motor	ATMA 178F	-
Cilindros	1	-
Deslocamento	0,418	cm <sup>3</sup>
Taxa de Compressão	20:1	-
Ciclo	Diesel/Injeção Direta	-
Rotação Constante	3600	-
Fator de Potência	1.0	-
Voltagem	220/127	V

(FONTE: PRÓPRIA)

Todos os ensaios foram realizados com o motor aquecido e em estado estacionário. Foram realizados quatro ciclos de cargas 350, 700, 1050 e 1400 W, respectivamente. A potência efetiva foi medida utilizando um multímetro mostrado na figura 4(d). A rotação foi medida a partir de um tacômetro (figura 4(h)). O consumo de combustível foi calculado com base nos dados fornecidos pela balança mostrada na figura 4(a) e com base no consumo do motogerador em 180 s enquanto 40 amostras de gases de escape foram coletadas por minuto pelo analisador de gases (figura 4(f)). Os valores médios de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> e da temperatura do gás foram plotados para posterior discussão.

### 3.3 Tratamento dos dados

#### 3.3.1 Massa Específica ( $\rho$ )

Para o cálculo da massa específica, foi utilizada a equação a seguir:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Em que  $\rho$  representa a massa específica (kg/m<sup>3</sup>),  $m$  a massa em quilogramas e  $V$  o volume em metros cúbicos.

#### 3.3.2 Consumo de Combustível ( $C$ )

Para calcular o consumo de combustível foi utilizado o método gravimétrico descrito pela equação 4.

$$C = \frac{m_f - m_i}{t} \quad (4)$$

Em que  $C$  representa o consumo (kg/s),  $m_f$  e  $m_i$  a massa final e a massa inicial, ambas em gramas (kg) e  $t$  o tempo de ensaio, em segundos (s).

#### 3.3.3 Consumo Específico ( $C_e$ )

O consumo específico é a relação entre o consumo de combustível e a potência efetiva. Ele pode ser definido também como a quantidade de combustível necessária para produzir uma unidade de potência. Logo, quanto menor for o consumo específico maior será a eficiência da máquina. Segundo BRUNETTI (2012)

ele é dado segundo a equação 2, em que  $C$  é o consumo de combustível do motor e  $N_e$  a potência efetiva, medida em kW.

$$C_e = \frac{C}{N_e} \quad (5)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Manipulação dos frutos

A Figura 8 mostra a aparência dos frutos durante as etapas de manipulação do fruto da bocaiúva, que teve como finalidade a extração do óleo. Primeiramente são mostrados os frutos com casca e congelados (a), descascados (b), após a segunda secagem (c) e a polpa pronta para extrusão (d).

Figura 8. Aparência dos frutos da bocaiúva em todas as etapas de manipulação



(FONTE: PRÓPRIA).

A tabela 2 apresenta os resultados da análise da composição do fruto da bocaiúva, sendo ele dividido em casca, umidade do fruto, polpa e semente.

Tabela 2 – Porcentagem de cada um dos componentes da bocaiúva em relação a massa total dos frutos

Componente	Composição (%)
Casca	19,46
Umidade	33,94
Polpa	20,60
Semente	24,80
Total	98,79

(FONTE: PRÓPRIA).

As composições não somaram 100% devido as inevitáveis perdas em todas as etapas do processo. A seguir são apresentados os valores do teor de óleo em relação a massa de polpa e o volume de óleo obtido por quilograma de polpa:

Tabela 3 – Proporção de óleo em massa e volume

	Proporção de óleo
Massa	5,66%
Volume	62,95 ml/kg

(FONTE: PRÓPRIA).

Em relação à massa total do fruto, o óleo representou 1,17%.

#### 4.2 Poder Calorífico

O resultado do poder calorífico superior para o óleo de bocaiúva foi de 39,47 MJ/kg. Valor 12% menor que o encontrado por Silva (2012) para o diesel, que foi de 44,35 MJ/kg. Já para o éster-etílico, o valor foi de 38,84 MJ/kg.

### 4.3 Massa Específica

A tabela 4 mostra os valores de massa específica obtidos para o óleo de bociuíva, éster-etílico e para o diesel.

Tabela 4. Massa específica dos combustíveis

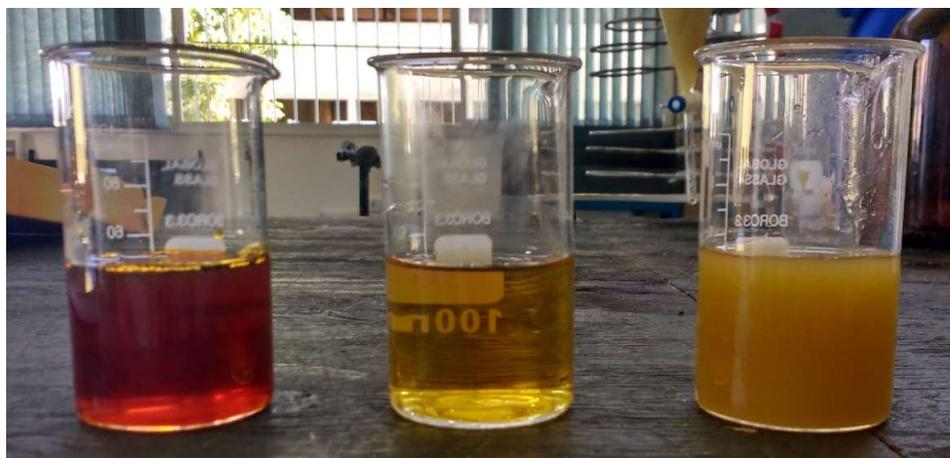
Combustível	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
Óleo de bociuíva	899,1
Éster-etílico	900,1
Diesel	822,2

(FONTE: PRÓPRIA).

### 4.4 Éster-etílico

Foram usados 500 ml de óleo de bociuíva e 150 ml de álcool etílico para a produção do éster-etílico. Na primeira decantação, foi obtido aproximadamente 100 ml de glicerina, e após as lavagens e seguintes decantações, foi obtido um volume final de éster-etílico de 300 ml. Possivelmente, o volume que não se transformou em glicerina ou biodiesel se tratava de impurezas, compostos que não reagiram ou perdas. A Figura 9 apresenta respectivamente, da esquerda para a direita, a aparência do óleo de bociuíva bruto, da glicerina e do éster-etílico obtido.

Figura 9. Aparência do óleo, glicerina e éster-etílico



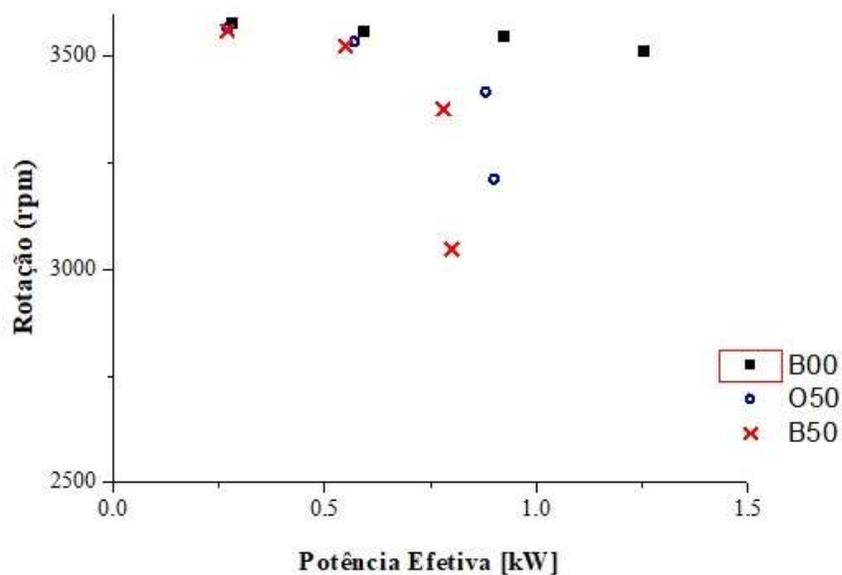
(FONTE: PRÓPRIA).

#### 4.5 Desempenho do motor operando a misturas de éster-etílico

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios com éster-etílico. Em todos os gráficos foram feitas comparações com o diesel comercial e a mistura de óleo de bociáúva bruto na mesma proporção, de 50%.

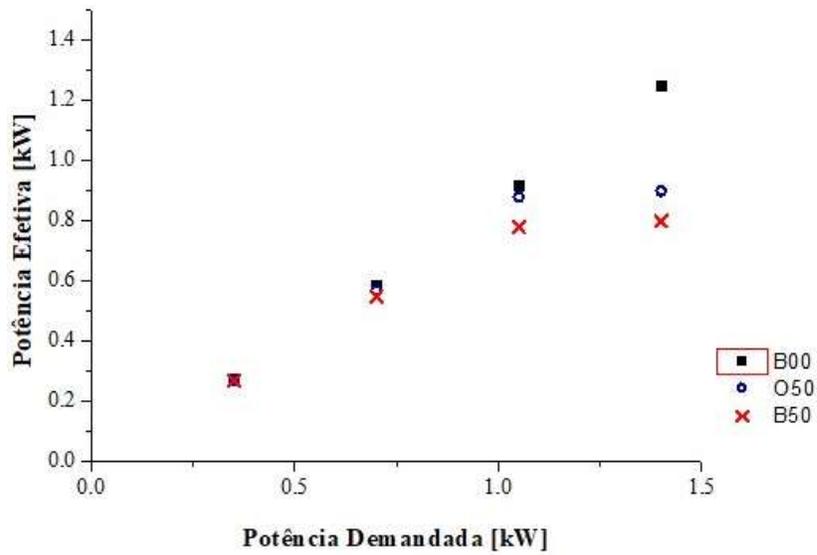
A Figura 10 mostra a rotação do motor em relação a potência efetiva. É possível observar uma queda na rotação do motor quando operado com a mistura de óleo de bociáúva e uma ainda maior com a mistura de éster-etílico. Isso representa uma queda na eficiência no motor, devido ao mesmo não conseguir entregar o que é demandado. Esse fato pode ser justificado pelo fato de o óleo ter um poder calorífico menor que o do diesel. Isso também pode ser usado como justificativa para o comportamento observado na Figura 11, que mostra potência efetiva medida em relação à potência demandada.

Figura 10. Rotação x potência efetiva (éster-etílico)



(FONTE: PRÓPRIA).

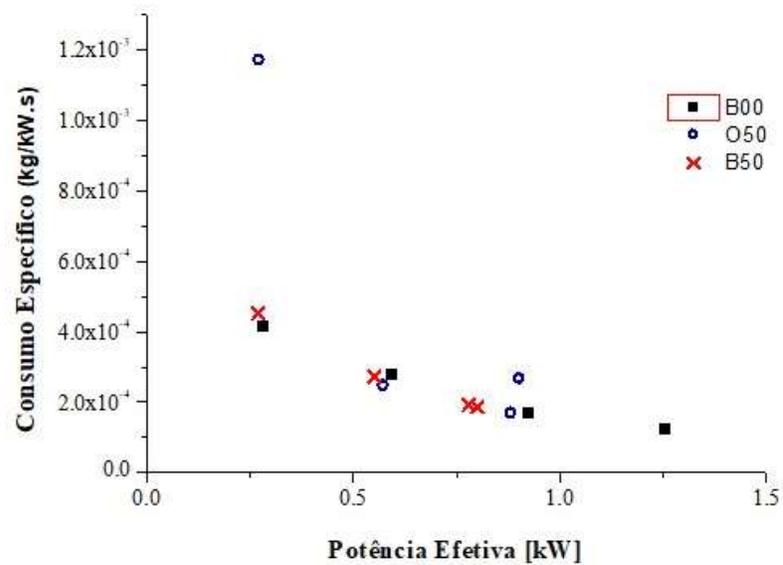
Figura 11. Potência efetiva x potência demandada (éster-etílico)



(FONTE: PRÓPRIA).

A Figura 12 mostra o consumo específico em relação à potência efetiva das misturas de óleo bruto e éster-etílico comparadas com o diesel comercial puro. É possível observar uma grande semelhança entre as misturas, assim como ocorreu no caso anterior.

Figura 12. Consumo específico x potência efetiva (éster-etílico)



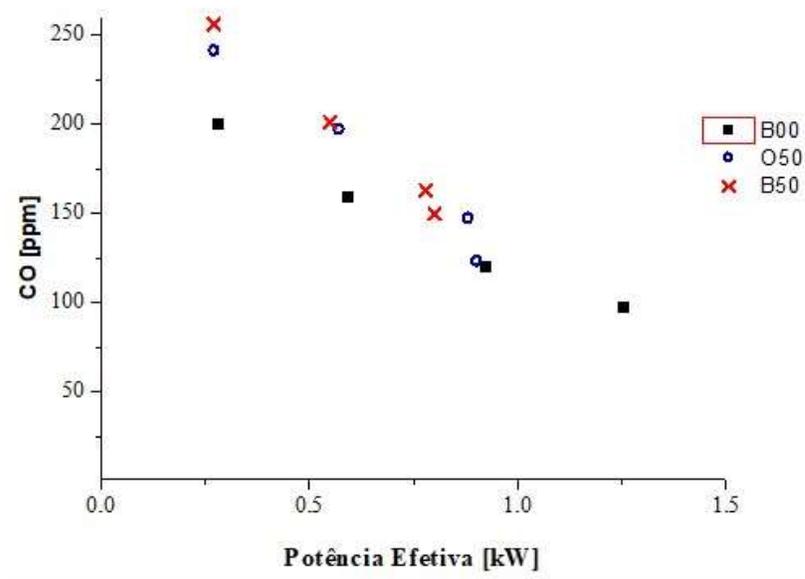
(FONTE: PRÓPRIA).

#### 4.6 Emissão de gases das misturas B00, B50 E O50

As figuras a seguir mostram os teores de CO, CH<sub>4</sub> e NO<sub>2</sub> nos gases de escape (emissões) quando o motor é operado pelas misturas B00, B50 E O50.

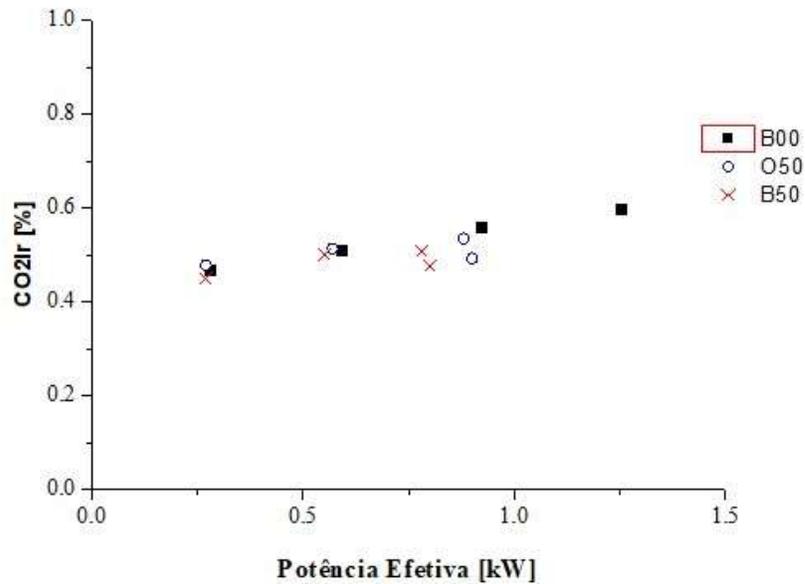
As Figuras 13 e 14 mostram as emissões de CO e CO<sub>2</sub> em função da potência efetiva. Uma menor produção gás carbônico e uma maior de monóxido de carbono significa uma combustão menos completa. As misturas B50 e B70 produziram mais CO que o diesel puro conforme a carga aumentava. Já se tratando do CO<sub>2</sub>, a emissão foi muito semelhante para todas as misturas nos dois primeiros pontos, porém a partir do momento em que a potência efetiva deixou de corresponder à demandada, essa emissão diminuiu em relação a do ensaio com o diesel. Esse resultado se distanciou do esperado, que era que o óleo e o éster-etílico produzissem mais CO<sub>2</sub> em todos os pontos, devido a sua fórmula química conter mais moléculas de oxigênio que o diesel.

Figura 13.CO



(FONTE: PRÓPRIA).

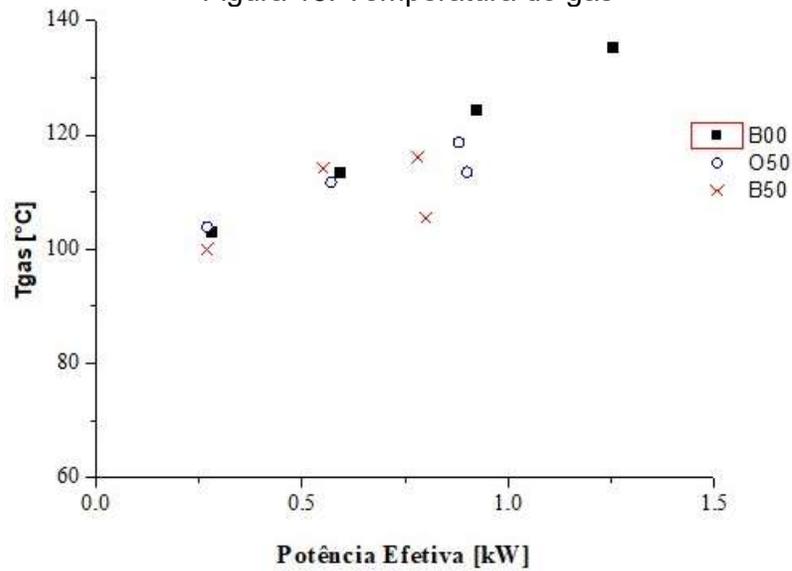
Figura 14. CO2



(FONTE: PRÓPRIA).

Apesar desses resultados, o comportamento geral das curvas foi o esperado. Conforme a potência aumenta, as condições se aproximam do ponto de projeto do motor, o que causa uma melhora na eficiência. Essa melhora é refletida em um aumento na produção de CO<sub>2</sub> e uma diminuição na produção de CO. O ponto de projeto do motor se aproxima também a partir do momento em que existe aquecimento da câmara de combustão, que é acompanhado de um aumento da pressão média efetiva e da potência efetiva. O comportamento da temperatura do gás de exaustão é mostrado na Figura 15.

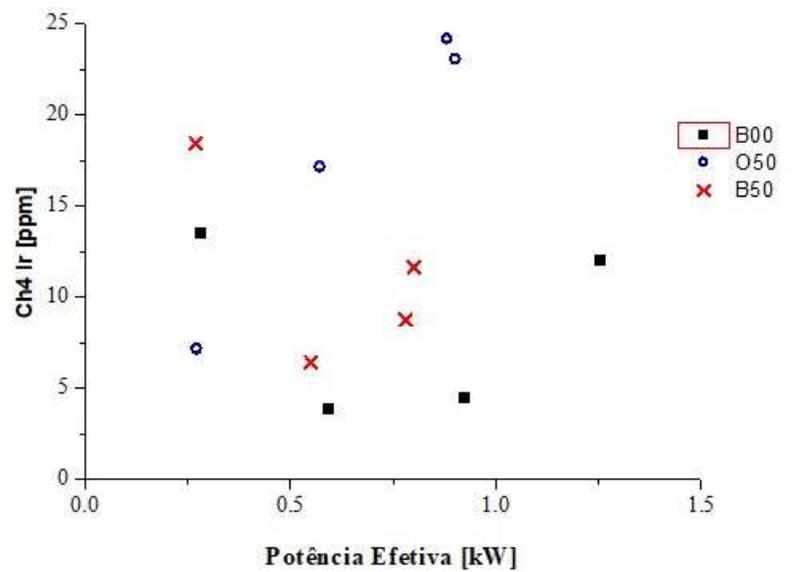
Figura 15. Temperatura do gás



(FONTE: PRÓPRIA).

A temperatura do gás se comporta como o esperado até o momento em que o combustível não consegue entregar energia o suficiente para o motor entregar a potência demandada, o que ocorre a partir do terceiro ponto. A Figura 16 apresenta as emissões de CH<sub>4</sub> para as mesmas misturas.

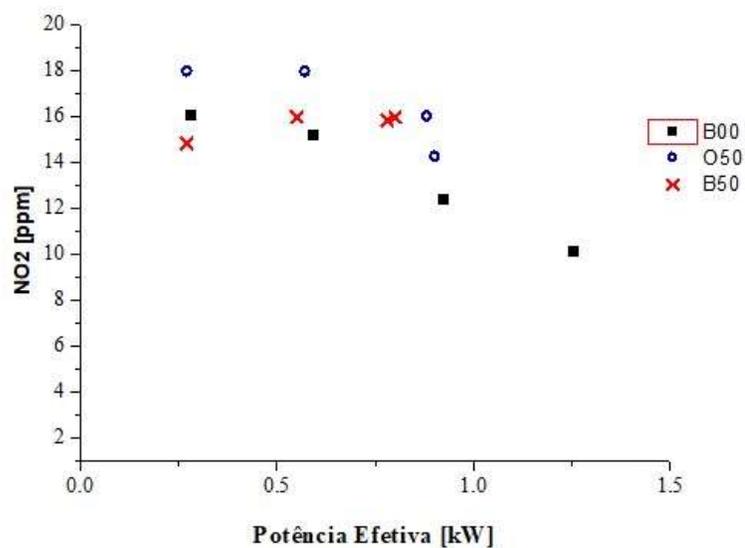
Figura 16. CH<sub>4</sub>



(FONTE: PRÓPRIA).

O CH<sub>4</sub> é produto da combustão incompleta. Ele se trata de um hidrocarboneto não queimado ou produto de uma etapa de reação incompleta. A emissão de CH<sub>4</sub> significa uma menor eficiência na combustão, portanto as combustões com as misturas com óleo de bociáúva e éster-etílico foram menos eficientes que a com diesel puro. Assim como o CO, a emissão de CH<sub>4</sub> costuma diminuir conforme a temperatura do gás aumenta devido a esse aumento resultar em um aumento na energia de ativação das reações de combustão. Portanto, a mistura de éster-etílico e o diesel puro não se comportaram como esperado.

Figura 17. NO<sub>2</sub>



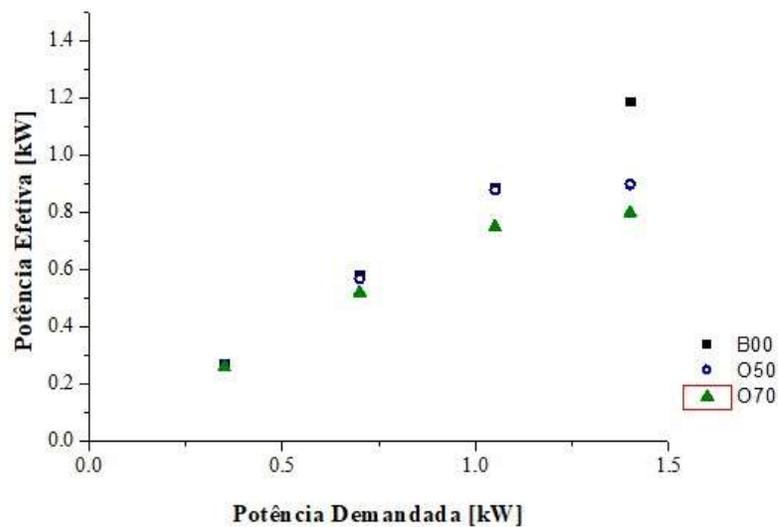
(FONTE: PRÓPRIA).

A Figura 17 apresenta as emissões de NO<sub>2</sub>. Uma maior emissão de NO<sub>2</sub> é gerada na queima de combustíveis com altos valores de poder calorífico inferior e, portanto, maiores temperaturas de chama. Outro fator que influencia na produção de NO<sub>2</sub> é a mistura ar-combustível, que quando se aproxima do valor estequiométrico provoca um aumento na produção do gás. Conforme essa mistura se enriquece em oxigênio, a produção diminui. Como o poder calorífico superior do diesel é maior e a quantidade de oxigênio é menor que no óleo de bociáúva, é esperado que o primeiro apresente uma maior emissão do que este. Tal fato estranhamente não é comprovado pela Figura 17.

#### 4.7 Desempenho do motor operando com as misturas de óleo de bociáúva

A seguir são mostrados os resultados de desempenho do motor operando com as misturas de óleo de bociáúva e diesel, assim como os resultados para o motor funcionando somente a diesel. A Figura 18 mostra a potência efetiva medida em relação a potência demandada.

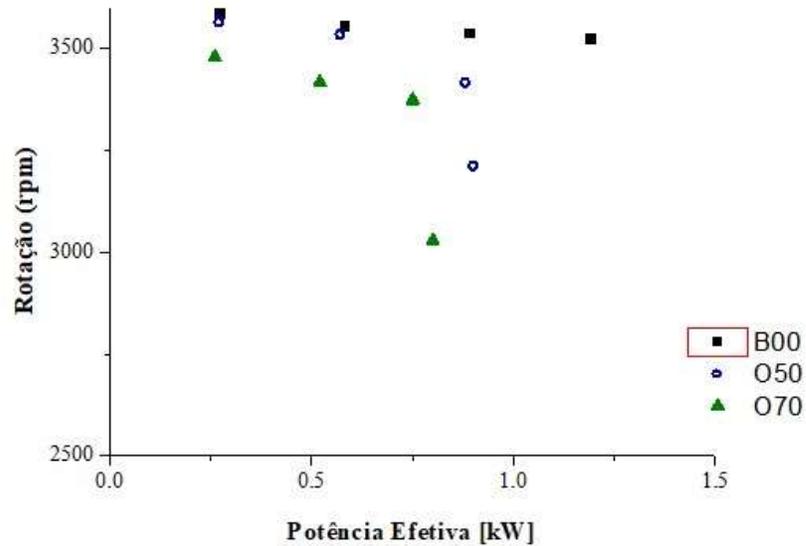
Figura 18. Potência efetiva x potência demandada



(FONTE: PRÓPRIA).

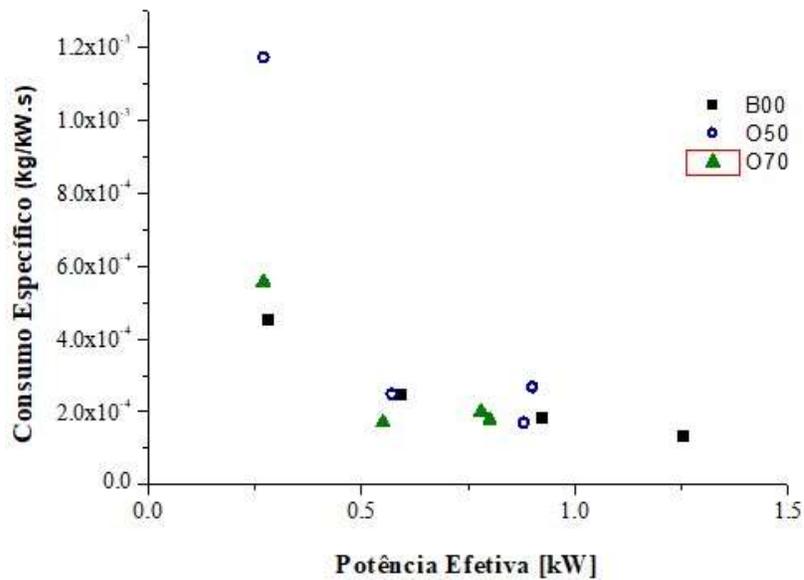
É possível observar que conforme a potência demandada aumenta mais a potência efetiva das misturas B50 e B70, ou seja, a potência realmente entregue pelo motor se distancia desse valor. Esse fato ocorre devido ao óleo de bociáúva provavelmente ser mais viscoso e ter um poder calorífico menor que do diesel, fazendo com que o motor demande mais combustível. Portanto quanto maior a quantidade de óleo de bociáúva presente na mistura, menor a potência efetiva. Esse fato também pode ser usado como justificativa para a queda na rotação do motor mostrado na Figura 19.

Figura 19. Rotação x potência efetiva



(FONTE: PRÓPRIA).

Figura 20. Consumo específico x potência efetiva



(FONTE: PRÓPRIA).

As Figuras 19 e 20 mostram, respectivamente, o comportamento da rotação do motogerador e do consumo específico do combustível pela potência efetiva. O consumo específico diminui conforme mais potência é entregue, comportamento

esperado para tal análise. Os valores apresentados pelas misturas foram semelhantes ao do diesel puro, especialmente na análise de consumo específico. O óleo de bociúva mostrou um melhor rendimento em relação ao éster-etílico em todos os ensaios, provavelmente devido ao seu maior poder calorífico.

## **5. CONCLUSÃO**

Foi possível concluir que o óleo e o éster etílico apresentaram resultados de poder calorífico superior menores do que do diesel, fato que justifica a pequena queda de desempenho do motor quando alimentado com as misturas de óleo e éster etílico a partir de um certo ponto dos ensaios. O óleo apresentou um poder calorífico maior que o do éster-etílico, assim como resultados mais satisfatórios para misturas de mesma proporção, fato considerado inesperado, pois a transesterificação tem como objetivo melhorar o desempenho do combustível. Muitas das emissões também não se comportaram como esperado, fato que pode ser explicado pelo analisador de gases estar possivelmente descalibrado.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Devido ao fato dos resultados terem diferido do esperado, é recomendado que os ensaios sejam refeitos, de preferência após uma calibração do equipamento de análise de gases. Como o éster-etílico não apresentou os resultados de desempenho esperado, é sugerida uma análise do processo de transesterificação, além do desenvolvimento de um processo para o mesmo, com análise da umidade do produto final. Além disso, a obtenção da viscosidade do óleo e do éster é recomendada para melhor análise dos resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEITEC – Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fj0847od02wyiv802hvm3juldruvi.html>> Acesso em 28 de agosto de 2017.

ANP. Biodiesel. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/bkiocombustiveis/biodiesel>> Acesso em 11 de julho de 2017.

ANP. Óleo Diesel. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel>> Acesso em 10 de julho de 2017.

ANP. Resolução ANP nº 7, de 19.3.2008 – DOU 20.3.2008. 2008.

BARROS, M. A. T. M. **Emissões atmosféricas de grupos motogeradores na Região Metropolitana de São Paulo**. Dissertação (Mestre em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2007.

BEN – Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro, 2016. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2016\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf)> Acesso em 10 de julho de 2017.

BRASIL. **Alimentos Regionais Brasileiros**. Brasília – Ministério da Saúde. Secretária de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica – 2. Ed, 2015.

BRENNEISEN, P. J. **Desempenho de motogerador de ciclo diesel operando com gás de gaseificação/diesel ou biogás/diesel**. 2013. 54 p. Dissertação (Mestre do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR, 2013.

ÇELIKTEN, I; MUTLU, E; SOLMAZ H. **Variation of performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel, rapeseed oil and hazelnut oil methyl ester blends**. Renewable Energy, Vol. 48, 122-126, 2012.

Central Analítica IQ-USP. Análise elementar – CHN. Disponível em <[http://ca.iq.usp.br/novo/paginas\\_view.php?idPagina=7](http://ca.iq.usp.br/novo/paginas_view.php?idPagina=7)> Acesso em 27 de julho de 2017.

CPT. Disponível em <<https://www.cpt.com.br/cursos-agroindustria-biocombustivel/artigos/oleo-vegetal-combustivel-mais-seguro-que-o-diesel-e-de-baixo-custo-para-o-produtor>> Acesso em 24 de agosto de 2017.

GALDINO, J. C. S. **Curso: Manutenção de ferrovia – Eletrotécnica II**. Instituto Federal – Rio Grande do Norte. 2011.

GALVANI, F.; COLNAGO, L. A.; MARCONCINI, L. V.; SANTOS, J. F. **Estudos dos Frutos e da Polpa da Bocaiúva Extraída Mecanicamente para a Produção de**

**Biodiesel.** 5º Simpósio sobre recursos naturais e socioeconômicos do pantanal. Corumbá – MS. 2010.

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. **Poluentes Atmosféricos Proveniente da Queima de Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis: Uma Breve Revisão.** Revista Virtual de Química, Vol. 3, nº 5, 2011.

GUERRA, E. P.; FUCHS, W. **Biocombustível renovável: uso de óleo vegetal em motores.** Ciências Agrárias Ambientais, Vol. 8, nº 1, 103-112, 2010.

IICA. **Biocombustíveis em FOCO.** Ano I, nº 8, 2009.

INEE. Instituto Nacional de Eficiência Energética. Disponível em <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)> Acesso em 18 de agosto de 2017.

LEHMANN, F. G; **Análise da Combustão e Emissões em Motores a Biodiesel.** 2015. 193 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2015.

LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C; CRUZ, R. S. **Biodiesel: Parâmetros de qualidade e métodos analíticos.** Química Nova, Vol. 32, nº 6, 1596-1608, 2009.

LORA. E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **GERAÇÃO TERMELETRICA - Planejamento, Projeto e Operação.** Vol. 1. Editora Interciência. 1296 p. 2004.

MAZIERO, J. V. G.; CORRÊA, I. M.; ÚNGARO, M. R. BERNARDI J. A.; STORINO M. **Desempenho de um motor diesel com óleo bruto de girassol.** R. Bras. Agrociência, Vol. 13, nº 12, 249-255, 2007.

PORTAL BRASIL. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/03/percentual-obrigatorio-de-biodiesel-no-oleo-diesel-passa-para-8>> Acesso em 10 de julho de 2017.

RAHMAN, M. M.; HASSAN, M. H.; KALAM, M. A; ATABANI, A. E.; MEMON, L. A.; RAHMAN S.M A. **Performance and emission analysis of *Jatropha Curcas* and *Moringa oleifera* methyl ester fuel blends in a multi-cylinder diesel engine.** Journal of Cleaner Production, Vol. 65, 304-310, 2014.

SALVADOR, N. BIODIESEL: **Desempenho de um motor usando o éster metílico de *Joannesia Princeps*, Vell. Como combustível.** S/d.

SANTANA, S. S. M. **Emissões Gasosas de Combustão Diesel e de Biodiesel Utilizando Motor Euro V e Sistema de Pós-tratamento SCR em Dinamômetro de Bancada.** 2015. 112 p. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná – Curitiba – PR, 2015.

SCHNEIDER, R. C. S. **Extração, caracterização e transformação do óleo de rícino.** Tese (Doutor em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, s/d.

SETYAWATI, W.; DAMANHURI, E.; LESTARI, P.; DEWI, K. **Correlation Equation to Predict HHV of Tropical Peat Based on its Ultimate Analyses**. Procedia Engineering, Vol. 125, 298-303, 2015.

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

SINGH, Y. D.; MAHANTA, P.; BORA, U. **Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass through proximate, ultimate and compositional analysis for bioenergy production**. Renewable Energy. Vol. 103, 490-500, 2017.

SINUELOAGROPECUÁRIA. S/D. Disponível em <<http://sinueloagropecuaria.com.br/wp-content/uploads/2016/08/extracao-e-filtragem-de-oleos.pdf>> Acesso em 22 de fevereiro de 2018.

TOMAZIN JÚNIOR, C. **Extração de óleo de soja com etanol e transesterificação etílica na miscela**. Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2008.

ÖZYUĞURAN, A. YAMAN, S. **Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis**. Energy Procedia, Vol. 107, 130-136, 2017.

YI, L.; FENG, J.; QIN, Y.; LI, W. **Prediction of elemental composition of coal using proximate analysis**. Fuel, Vol. 193, 315-321, 2017.