

**JONAS GRALICK**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ALIMENTAÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS NO DESEMPENHO DE MOTOR AGRÍCOLA**

**CASCVEL  
PARANÁ - BRASIL  
MARÇO – 2018**

**JONAS GRALICK**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ALIMENTAÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS NO DESEMPENHO DE MOTOR AGRÍCOLA**

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Flavio Gurgacz  
COORIENTADOR: Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos.

**CASCVEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2018**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Sistema de Bibliotecas - UNIOESTE)

G77i Gralick, Jonas.  
Influência da temperatura de alimentação de biocombustíveis no desempenho de motor agrícola / Jonas Gralick. --- Cascavel (PR), 2018.  
xv, 59 f.:il.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Gurgacz.  
Co-orientador: Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2018, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.  
Inclui Bibliografia

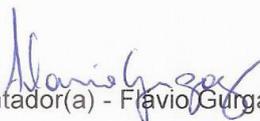
1. Ensaio Dinamometrico. 2. Índices de Desempenho. 3. Emissões Atmosféricas. I. Gurgacz, Flavio. II. Santos, Reginaldo Ferreira. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 621.43

JONAS GRALICK

**“INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ALIMENTAÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS NO DESEMPENHO DE MOTOR AGRÍCOLA”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biocombustíveis, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



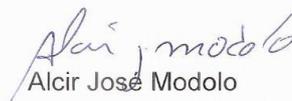
Orientador(a) - Flavio Gurgacz

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Samuel Nelson Melegari de Souza

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Alcir José Modolo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Pato Branco (UTFPR)

Cascavel, 16 de março de 2018

*Dedico este trabalho aos meus pais  
que nunca mediram esforços para  
formar e educar seus filhos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de vida e sabedoria nas escolhas.

Aos meus pais Elio Gralick e Vanda Picagevicz Gralick, e minha irmã Andréia Gralick, pelo apoio, suporte e carinho nos momentos difíceis.

Ao meu professor orientador Flavio Gurgacz, pela confiança em realizar esse trabalho, pela disposição e paciência nos momentos de orientação e pelos conhecimentos repassados.

Ao meu professor coorientador Reginaldo Ferreira Santos, que me recepcionou na universidade e me mostrou os caminhos a serem seguidos.

Ao meu grande amigo Paulo Henrique Paiva, que juntos realizamos nossas pesquisas, pela paciência e pelo conhecimento repassado.

Ao meu amigo Felipe Fernandes Klajn, que mesmo já terminado seu trabalho, voltou a universidade para me auxiliar nos ensaios físico-químicos.

Aos demais professores e funcionários da Unioeste, que de alguma forma contribuíram e participaram do aprendizado, a secretária Vanderléia Schimidt, por todas as dúvidas sanadas, pelos importantes lembretes em todo o período do metrado e pela paciência.

Aos demais amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para minha formação e aprendizado.

“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário” (Albert Einstein).

“O senhor é meu pastor e nada me faltará”  
(Salmo 23:1 Bíblia Sagrada)

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  
bar – Pressão barométrica  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CRDI - Common Rail Direct Injection  
CRS - Common Rail System  
EDC - Eletronic Diesel Control  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
HC – Hidrocarbonetos  
IE – Índice de Elasticidade  
kW – Quilo-Watts  
LAMA – Laboratório de Máquinas Agrícolas  
MP – Material particulado  
NO<sub>x</sub> – Óxidos de Nitrogênio  
O<sub>2</sub> – Gás Oxigênio  
PCI – Poder calorífico inferior  
PCS – Poder calorífico superior  
PMI – Ponto Morto Inferior  
PMS – Ponto Morto Superior  
PNMC - Política Nacional sobre Mudança do Clima  
PPM – Partes por milhão  
PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores  
TDP – Tomada de Potência  
UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change  
UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
UIS - Unit Injector System  
% - Porcentagem

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> - Os 4 tempos de um motor de combustão interna. ....  | 5  |
| <b>Figura 2</b> - Câmara de combustão sistema de injeção indireta.....  | 6  |
| <b>Figura 3</b> - Câmara de combustão sistema de injeção direta.....  | 7  |
| <b>Figura 4</b> - Porta injetor e bico injetor.....   | 8  |
| <b>Figura 5</b> - Curva de viscosidade dos blends de diesel/ biodiesel de dendê. ....   | 11 |
| <b>Figura 6</b> - Parâmetros físicos de um spray diesel.....  | 13 |
| <b>Figura 7</b> - Princípio de funcionamento de um freio dinamométrico.....   | 14 |
| <b>Figura 8</b> - Curvas características da avaliação de desempenho. ....   | 15 |
| <b>Figura 9</b> - Esquema demonstrativo do experimento. ....  | 18 |
| <b>Figura 10</b> – Trator MF 265 acoplado no dinamômetro via eixo cardã numa ocasião de ensaio.....   | 18 |
| <b>Figura 11</b> – Trator Massey Ferguson modelo 265 utilizado para os ensaios.....   | 19 |
| <b>Figura 12</b> - Dinamômetro EGGERS, modelo PT170. ....   | 20 |
| <b>Figura 13</b> – Tela de visualização de dados do Software <i>EGGERS PowerControl®</i> v2.1. ....   | 21 |
| <b>Figura 14</b> - Fluxômetro EGGERS modelo FM3-100.....  | 22 |
| <b>Figura 15</b> - Fluxograma do sistema de medição.....  | 23 |
| <b>Figura 16</b> - Esquema representativo do sistema de aquecimento dos biocombustíveis. ....   | 24 |
| <b>Figura 17</b> – Recipiente de metal com a serpentina em aquecimento, utilizado no sistema de aquecimento dos biocombustíveis. ....       | 25 |
| <b>Figura 18</b> – (A) Calorímetro e2K para medição do poder calorífico superior (PCS);   | 28 |
| <b>Figura 19</b> - Viscosímetro Cannon-Fenske utilizado para medição da viscosidade das amostras, em banho maria.....                       | 29 |
| <b>Figura 20</b> - Viscosidade das misturas ilustrando os limites máximos e mínimos estabelecidos pela ANP. ....                            | 38 |
| <b>Figura 21</b> – Influência da temperatura nas misturas de biodiesel e biodiesel etanol para os valores de consumo específico mínimo..... | 43 |
| <b>Figura 22</b> - Influência da temperatura nas misturas para os valores de consumo horário. ....  | 44 |
| <b>Figura 23</b> - Influência da temperatura nas misturas para os valores de toque na potência máxima. ....                                 | 46 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 24</b> – Influência da temperatura nas misturas para os valores de toque na potência máxima. ....     | 49 |
| <b>Figura 25</b> - Influência da temperatura nas misturas para os valores reserva de rotação. ....              | 52 |
| <b>Figura 26</b> - Variação de emissão de gás O <sub>2</sub> na combustão das misturas.....                     | 53 |
| <b>Figura 27</b> - Eficiência de combustão das misturas. ....   | 54 |
| <b>Figura 28</b> - Temperaturas de combustão das misturas. ....   | 54 |
| <b>Figura 29</b> - Variação de emissão de gás dióxido de carbono CO <sub>2</sub> na combustão das misturas..... | 55 |
| <b>Figura 30</b> - Variação de emissão de NO <sub>x</sub> na combustão das misturas. ....                       | 56 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> - Comparação das características físico-químicas do diesel puro (B0) e das misturas de biodiesel e diesel. ....   | 9  |
| <b>Tabela 2</b> - Características físico químicas de alguns óleos vegetais. ....  | 10 |
| <b>Tabela 3</b> - Viscosidades de alguns óleos vegetais em função da temperatura. ....  | 10 |
| <b>Tabela 4</b> - Limites máximos de emissão para motores de máquinas agrícolas e rodoviárias (PROCONVE MAR-I).....   | 16 |
| <b>Tabela 5</b> - Dados técnicos do trator agrícola ensaiado. ....  | 19 |
| <b>Tabela 6</b> - Dados técnicos do Termo-higro-barômetro GREISINGER GFTB-100. ...  | 22 |
| <b>Tabela 7</b> - Dados técnicos do tacômetro Peaktech 2790.....  | 22 |
| <b>Tabela 8</b> - Composição das misturas de biocombustíveis ensaiadas.....   | 26 |
| <b>Tabela 9</b> – Dados técnicos do medidor de emissões Bacharach PCA3-285. ....  | 27 |
| <b>Tabela 10</b> – Variações climáticas durante os ensaios. ....  | 33 |
| <b>Tabela 11</b> – Valores das médias das temperaturas de injeção.....  | 33 |
| <b>Tabela 12</b> – Valores médios de densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ).....  | 34 |
| <b>Tabela 13</b> - Desdobramento da viscosidade de biodiesel dentro de cada nível de temperatura e etanol, medidas em centistoke (cSt). ....                            | 35 |
| <b>Tabela 14</b> - Desdobramento da viscosidade de etanol dentro de cada nível de temperatura e biodiesel, medidas em centistoke (cSt).....                             | 36 |
| <b>Tabela 15</b> - Desdobramento da viscosidade de temperatura dentro de cada nível de biodiesel e etanol, medidas em centistoke (cSt). ....                            | 36 |
| <b>Tabela 16</b> - Valores médios de PCI, dados em $\text{MJ kg}^{-1}$ . ....   | 38 |
| <b>Tabela 17</b> – Desdobramento dos valores de consumo específico ( $\text{g KW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) de biodiesel dentro de cada nível de temperatura e etanol..... | 40 |
| <b>Tabela 18</b> - Desdobramento dos valores de consumo específico ( $\text{g KW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) de etanol dentro de cada nível de biodiesel e temperatura..... | 41 |
| <b>Tabela 19</b> - Desdobramento dos valores de consumo específico ( $\text{g KW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) de temperatura dentro de cada nível de biodiesel e etanol..... | 42 |
| <b>Tabela 20</b> - Influência da interação entre temperatura e biodiesel no consumo horário de combustível ( $\text{l h}^{-1}$ ). ....                                  | 43 |
| <b>Tabela 21</b> - Influência da interação entre etanol e biodiesel no torque máximo (N m). ....  | 44 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 22</b> - Influência da interação entre etanol e temperatura no torque máximo (N m). .....                    | 45 |
| <b>Tabela 23</b> - Influência da interação entre temperatura e biodiesel no torque máximo (N m). .....                 | 45 |
| <b>Tabela 24</b> – Influência da interação entre etanol e temperatura na rotação de torque máximo (rpm). .....         | 46 |
| <b>Tabela 25</b> – Influência da temperatura do combustível na potência máxima (KW). .                                 | 47 |
| <b>Tabela 26</b> - Influência da interação entre etanol e biodiesel na potência máxima (KW). .....                     | 47 |
| <b>Tabela 27</b> – Influência do etanol no torque de potência máxima (N m). .....                                      | 48 |
| <b>Tabela 28</b> - Influência da interação entre temperatura e biodiesel no torque de potência máxima (N m). .....     | 48 |
| <b>Tabela 29</b> - Influência do etanol na rotação de potência máxima (rpm). .....                                     | 49 |
| <b>Tabela 30</b> – Influência da temperatura do combustível nos valores médios de índice de elasticidade. ....         | 50 |
| <b>Tabela 31</b> – Influência do biodiesel nos valores médios de reserva de torque (%). .                              | 50 |
| <b>Tabela 32</b> - Influência do etanol nos valores médios de reserva de torque (%). .....                             | 51 |
| <b>Tabela 33</b> - Influência da temperatura nos valores médios de reserva de torque (%). .....                        | 51 |
| <b>Tabela 34</b> - Influência da interação do etanol e temperatura nos valores médios de reserva de rotação (%). ..... | 52 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| <b>Equação 1</b> - Determinação do Poder Calorífico Inferior (PCI) a partir do Poder Calorífico Superior (PCS)..... | 28 |
| <b>Equação 2</b> – Calculo da densidade.....  | 30 |
| <b>Equação 3</b> – Equação para cálculo do índice de elasticidade (MIALHE, 1996). .....                             | 30 |
| <b>Equação 4</b> – Equação para cálculo de reserva de torque (MIALHE, 1996). .....                                  | 31 |
| <b>Equação 5</b> – Equação para cálculo de reserva de rotação (MIALHE, 1996).....                                   | 31 |

GRALICK, Jonas. Me. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Março de 2018. **Análise da Influência da Temperatura do Combustível no Desempenho de Motor Ciclo Diesel**. Professor Orientador: Dr. Flávio Gurgacz.

## RESUMO

A busca de alternativas para a redução do uso de diesel dentro da matriz energética nacional, tem sido estudada de modo gradativo com inserções parciais de biodiesel ao diesel, de modo a reduzir os gases de efeito estufa. Essa prática é decorrente da implantação da Lei 13.263/2016, que prevê a obrigatoriedade da adição do biodiesel no diesel, a qual chegará em 15% em 2019. Parâmetros como a viscosidade se alteram quando o biodiesel é adicionado no diesel, em que esse fator influencia diretamente na atomização do combustível e emissões em um motor. Assim, este trabalho buscou avaliar o comportamento de biocombustíveis renováveis em um motor agrícola de 61 cv, operando com misturas de diesel, biodiesel e etanol, o qual foi ensaiado o diesel puro e misturas nas proporções de 8, 15 e 20% de biodiesel adicionados ao diesel, com e sem etanol, aquecidas a 45, 65 e 85°C. O desempenho mecânico do motor foi medido por um dinamômetro de correntes de Foucault, e as emissões de gases foram mensuradas por um analisador de combustão. Os ensaios de desempenho foram realizados em cinco repetições, enquanto que as emissões foram coletas em uma única vez para cada tratamento. Em relação ao desempenho do motor, o menor consumo específico foi de B0E1 a 85°C, já para o consumo horário o menor valor foi para B20 a 85°C. Os maiores valores de potência máxima foram a 45°C, e as misturas com etanol também foram superiores em relação às misturas sem etanol, para os valores de torque houve um decréscimo com o aumento da temperatura sendo o menor valor para B15 a 85°C, porém essa mesma mistura teve melhor desempenho a 65°C. Para as emissões apresentou-se um aumento de O<sub>2</sub> e temperatura dos gases de exaustão, em função do aumento da temperatura do combustível, todavia para os valores de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e eficiência de combustão teve um decréscimo em função do aumento da temperatura do combustível.

**Palavras-chaves:** Ensaio dinamométrico. Índices de desempenho. Emissões atmosféricas.

GRALICK, Jonas. Me. State University of West Paraná, March 2018. **Analysis of the Influence of Fuel Temperature on the Diesel Engine Motor Performance**. Teacher Advisor: Dr. Flávio Gurgacz.

## **ABSTRACT**

A search for alternatives to reduce the use of diesel within the national energy unit has been studied in a gradual way with biodiesel inserts to diesel, in order to reduce greenhouse gases. This is the result of the implementation of Law 13.263 / 2016, which is a mandatory addition of biodiesel in diesel, which is 15% in 2019. Parameters such as viscosity change when biodiesel is added to diesel, where this factor direct influence on fuel atomization and limitation in an engine. Thus, this work sought the behavior of renewable biofuels in a 61 cv agricultural engine, operating with blends of diesel, biodiesel and ethanol, which was tested on pure diesel and the proportions of 8, 15 and 20% biodiesel diesel, with and without ethanol, heating at 45, 65 and 85 ° C. The mechanical performance of the engine was measured by a eddy current dynamometer, and as gas emission by means of a combustion analyzer. The performance tests were performed on five replicates, while the submissions were done at a single time for each treatment. Regarding the performance of the engine, the specific weight was B0E1 at 85 ° C, while for the hourly consensus the lowest value was for the B20 at 85 ° C. The maximum power values were at 45 ° C, and the mixtures with the temperature level increased to the temperature of B15 at 85 ° C, 65 ° C. Rising fuel temperature, reducing heat, fuel temperature, reducing fuel temperature, reducing fuel temperature and reducing fuel consumption.

**Key-words:** Dynamometric test. Performance indices. Atmospheric emissions.

## SUMÁRIO

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                      | <b>1</b>  |
| 1.1       | Objetivo geral .....   | 2         |
| 1.2       | Objetivos específicos .....                                  | 2         |
| <b>2.</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                           | <b>3</b>  |
| 2.1       | Motores de ignição por compressão .....                      | 3         |
| 2.2       | Sistemas de injeção diesel.....                              | 5         |
| 2.3       | Parâmetros dos combustíveis .....                            | 9         |
| 2.4       | Atomização do combustível .....                              | 11        |
| 2.5       | Ensaio dinamométrico.....                                    | 13        |
| 2.6       | Pontos de interesse na avaliação de desempenho de motor..... | 14        |
| 2.7       | Emissões atmosféricas .....                                  | 16        |
| <b>3.</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                               | <b>17</b> |
| 3.1       | Local do experimento .....                                   | 17        |
| 3.2       | Descrição geral do experimento.....                          | 17        |
| 3.3       | Avaliação de desempenho do motor agrícola .....              | 19        |
| 3.4       | Ensaio com dinamômetro .....                                 | 20        |
| 3.5       | Medições complementares .....                                | 21        |
| 3.6       | Fluxômetro .....   | 22        |
| 3.7       | Aquecimento do combustível .....                             | 23        |
| 3.8       | Combustíveis e tratamentos.....                              | 25        |
| 3.9       | Medição de emissões atmosféricas .....                       | 26        |
| 3.10      | Análise físico-químicas.....                                 | 27        |
| 3.10.1    | Poder calorífico inferior.....                               | 27        |
| 3.10.2    | Viscosidade .....  | 29        |
| 3.10.3    | Densidade .....  | 30        |
| 3.11      | Índices de desempenho do motor .....                         | 30        |
| 3.12      | Análise estatística .....                                    | 31        |
| <b>4.</b> | <b>RESULTADO E DISCUSSÃO.....</b>                            | <b>33</b> |
| 4.1       | Análises físico-químicas.....                                | 34        |
| 4.1.1     | Densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ) .....                       | 34        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.1.2     | Viscosidade (cSt).....   | 35        |
| 4.1.3     | Poder calorífico (MJ kg <sup>-1</sup> ).....                       | 38        |
| 4.2       | Desempenho do motor agrícola .....                                 | 39        |
| 4.2.1     | Desempenho do motor utilizando diesel puro.....                    | 39        |
| 4.2.2     | Consumo de combustível (g KW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ) ..... | 40        |
| 4.2.3     | Torque máximo (N m).....   | 44        |
| 4.2.4     | Potência máxima (KW) .....   | 47        |
| 4.2.5     | Índices de desempenho.....   | 50        |
| 4.3       | Emissões.....  | 53        |
| 4.3.1     | Gás oxigênio (O <sub>2</sub> %vol.) .....                          | 53        |
| 4.3.2     | Temperatura dos gases de exaustão (°C) .....                       | 54        |
| 4.3.3     | Gás dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> %vol.) .....               | 55        |
| 4.3.4     | Fração de óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ppm) .....         | 56        |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>6.</b> | <b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>                         | <b>58</b> |
| <b>7.</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                            | <b>59</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global é considerado um fenômeno climático de larga extensão, no qual, o aumento da temperatura média superficial global está associado a fatores que independe do homem, tais como: as inconstâncias na atividade solar, composição físico-química atmosférica, tectonismo e vulcanismo. Deve-se considerar também as ações antropogênicos como as emissões de gases-estufa por queima de combustíveis fósseis, principalmente o carvão, derivados do petróleo, indústrias, refinarias, motores, queimadas, entre outros, em que o CO<sub>2</sub> é considerado como o principal vilão (SILVA; PAULA, 2009). Uma atenção especial deve ser direcionada ao setor de energia, pois representa dois terços das emissões globais, nesse contexto o setor elétrico fica com (42%), transportes (23%), indústria (19%), residencial (6%), serviços (3%) e outros (7%) (IEA, 2015). Segundo Peterson (2009), no setor agrícola, os fatores que contribuem para as emissões de gases de efeito estufa, são as atividades motomecanizadas, juntamente com o desmatamento para fins agrícolas.

Ao considerar que a população global já ultrapassa a casa dos 7,4 bilhões, fica evidente que a demanda energética exige alternativas sustentáveis. Isto é, há uma necessidade de substituir os combustíveis fósseis por fontes que emitem menos CO<sub>2</sub> (HODGSON, 2008). A União Europeia tem procurado colocar em prática um plano de mitigação, que inclui 27% de energias renováveis até 2030 (UNIÃO EUROPEIA, 2017).

Como o setor mundial de transporte está entre um dos principais atores nas emissões (DOMAN; CHASE, 2015), os biocombustíveis têm sido usados como uma das alternativas mais viáveis para a substituição dos combustíveis fósseis, por reduzir a emissão de gases de efeito estufa.

A emissão de poluentes de um motor, está diretamente ligada a relação de mistura ar combustível, quanto mais homogênea for a mistura melhor será o desempenho do motor, e a eficiência da combustão. A homogeneidade da mistura ar/combustível, é afetada pela atomização do combustível na câmara de combustão (FARIA; PINTO; VALLE, 2010).

Parâmetros como viscosidade e massa específica do combustível são fatores importantes para a atomização, influenciando na eficiência da combustão, (CARVALHO *et al.* 2014). Segundo Carvalho (2015), a utilização de biodiesel puro pode alterar a qualidade na atomização.

Como obrigatoriedade, estabelecida pela Lei 13.263/2016 a adição de biodiesel ao diesel, em postos de combustíveis chega a um percentual de 9%. Levando em consideração que as propriedades do biodiesel se diferem do diesel e visando propiciar o avanço da política energética, o presente trabalho tem por intuito avaliar o comportamento de biocombustíveis renováveis em um trator agrícola de 61 cv, operando com misturas de diesel, biodiesel e etanol, os quais foram aquecidos em temperaturas de 45, 65 e 85°C.

### **1.1 Objetivo geral**

Avaliar a influência da temperatura de alimentação de misturas de biocombustíveis no desempenho de um motor agrícola.

### **1.2 Objetivos específicos**

Levantar as curvas de desempenho do motor agrícola alimentado com misturas de biocombustíveis (Etanol e Biodiesel) junto ao diesel em diferentes temperaturas de alimentação do combustível.

Avaliar os parâmetros de consumo específico e horário do combustível; torque máximo; potência máxima; torque de potência máxima; rotação de potência máxima; rotação de torque máximo; índice de elasticidade; reserva de rotação; reserva de torque, por meio de ensaios dinamométricos.

Avaliar os gases de emissão de escapamento do motor agrícola.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Motores de ignição por compressão

Segundo Silva et al. (2015), há muito tempo que o homem procura descobrir novas maneiras de se produzir energia. Já no século XVII, iniciava-se a criação de mecanismos que fornecessem força e movimento de maneira automática, sem precisar do trabalho humano ou animal. Para que se chegasse no motor diesel que se tem hoje, alguns fatos ocorreram:

- No século XVII, o físico holandês Cristian Huygens construiu um modelo do que seria um motor a combustão interna, no qual a combustão ocorria com pólvora;
- Em 1859, Jean Joseph Étienne Lenoir construiu um motor em que a combustão acontecia de ambos os lados, um motor de dupla ação;
- Em 1862, surge a patente de um motor 4 tempos, por Beau de Rochas, porém, o motor ainda não era comercial;
- Em 1867, Nicolas Otto com a ajuda de Eugen Langen, realizou algumas práticas com motor 4 tempos, que tinha baixa eficiência com cerca de 11%;
- Em 1876, utilizando o princípio da patente de Beau de Rochas, Nicolas Otto produziu o primeiro motor 4 tempos que utilizava como combustível a gasolina;
- Gottlieb Daimler e Wilhelm Maybach em 1883, criaram um motor 4 tempos mono cilindro, com uma rotação nominal de 600 RPM;
- 1879 – Karl Benz consegue um funcionamento satisfatório de motores de combustão interna a 2 tempos.
- Em 1886, Benz construiu o que foi considerado o primeiro automóvel do mundo, com motor de  $\frac{3}{4}$  cavalos, que chegava a uma velocidade de 15 km/h.
  - Em 1892, o grande desenvolvimento de Rudolf Diesel, criou o motor de autoignição, com um rendimento nunca visto antes, a combustão apenas pela compressão, fez com que a eficiência duplicasse.

- Em 1893, Rudolf Diesel realizou novas melhorias, aumentando a eficiência do motor para cerca de 26%, com ciclo padrão constante, desde então estava criado o motor ciclo diesel utilizado até hoje.

Conforme Azevedo (2011), um sistema isobárico apresenta aquecimento com pressão constante, em que parte do calor é transformado em trabalho de expansão.

Motores diesel ou motores de ignição por compressão, são considerados máquinas térmicas, as quais funcionam pela transferência de calor ao fluido de trabalho e a pressão constante, (MORAN *et al.*, 2014; BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

Quando acontece transferência de calor para o fluido de trabalho, no caso o combustível, ocorre transformação de energia química contida nele, em calor, aumentando a pressão do meio, o qual resulta em trabalho mecânico. (BOSCH, 2005).

De acordo com Bosch (2005), nos motores de combustão interna, a formação da mistura ar/combustível pode ocorrer dentro ou fora da câmara de combustão, onde no sistema de autoignição a mistura se inflama na medida em que as temperaturas se elevam com a compressão, havendo a evaporação e combustão.

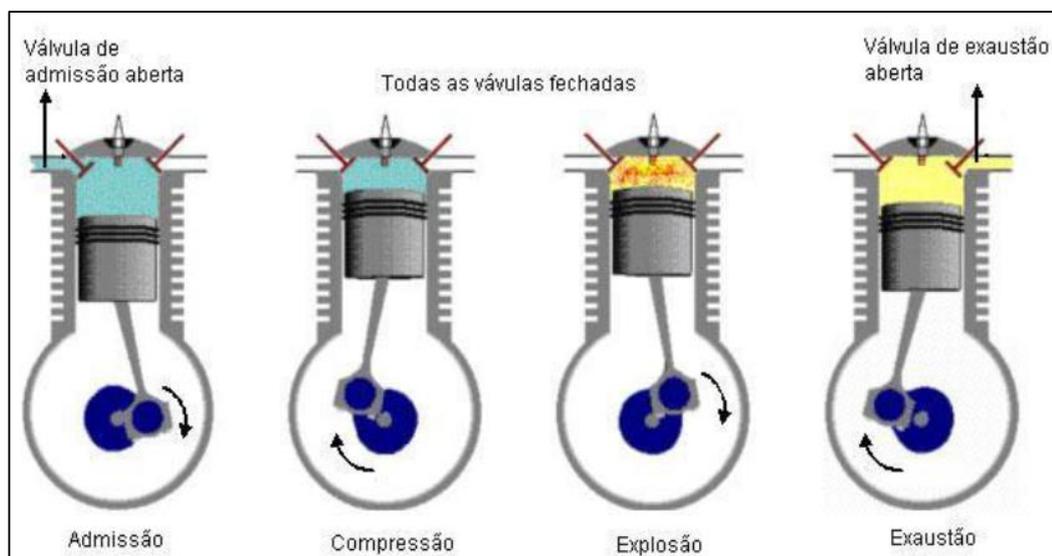
Para Varella e Santos (2010), o local onde ocorre a combustão da mistura ar/combustível, denominada câmara de combustão, é o espaço entre o cabeçote e a cabeça do pistão no ponto morto superior.

Segundo Silva et al. (2015), o motor 4 tempos é denominado assim, devido aos quatro cursos do pistão, que são denominadas as quatro fases dos motores a combustão interna, sendo elas: admissão, compressão, explosão, exaustão, definidas da seguinte maneira:

- Admissão: o pistão se movimenta do PMS (ponto morto superior), para o PMI (ponto morto inferior), realizando um movimento descendente, fazendo com que a massa de ar puro seja levada para o interior da câmara de combustão;
- Compressão: nessa fase o pistão passa de PMI (ponto morto inferior), para PMS (ponto morto superior), fazendo um movimento de subida, ou seja, a compressão do ar, eleva a temperatura em função da compressão;
- Explosão: com a chegada do pistão no PMS (ponto morto superior), devido a elevada temperatura do ar e a injeção do combustível, ocorre a explosão, na qual empurra-se o pistão para baixo, nessa fase se realiza trabalho;

- Exaustão: em um movimento ascendente, o pistão passa do PMI (ponto morto inferior), para PMS (ponto morto superior), expulsando os gases resultantes da queima do combustível.

Na Figura 1 são apresentados os 4 tempos de um motor ciclo diesel.



**Figura 1** - Os 4 tempos de um motor de combustão interna.

**Fonte:** (SILVA et al., 2015).

Silva et al. (2015) ressalta que, durante a fase de compressão, nos motores diesel quando o pistão está próximo ao PMS (ponto morto superior), as temperaturas chegam acerca de 800 °C, na câmara de combustão, devido à alta taxa de compressão que varia de 16 a 24 vezes o volume de ar admitido para um do volume de ar comprimido, no qual é injetado o diesel a uma pressão de 200 bar, pelo bico injetor. Nos motores diesel, não se controla a quantidade de ar na admissão, o fornecimento e controle de diesel é fornecido pela bomba injetora, a qual controla a quantidade de diesel que chega na câmara de combustão, sendo que esta influencia diretamente nas rotações por minuto do motor.

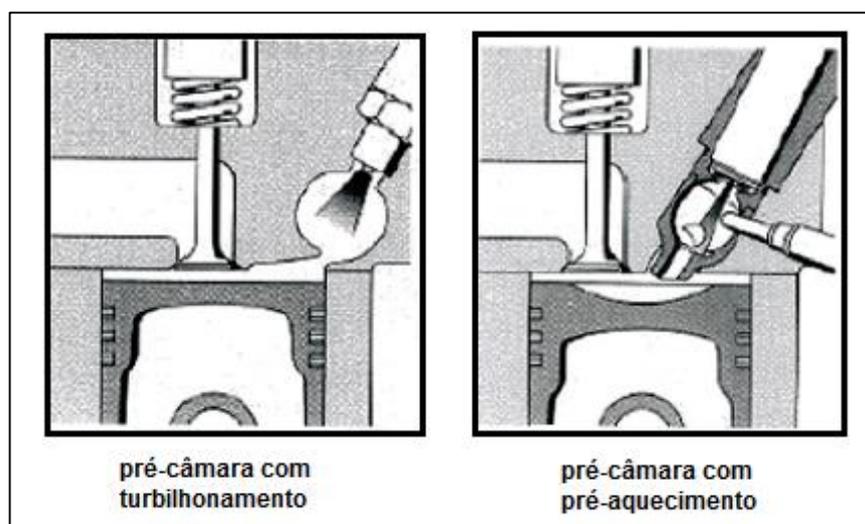
## 2.2 Sistemas de injeção diesel

Santos (2009), explica que desde a criação do motor diesel, existe um grande desafio em melhorar os motores de ignição por compressão. O principal ponto de controle está no sistema de injeção, já que o mesmo é responsável pelo desempenho do motor, buscando a combustão ideal, no qual algumas tecnologias foram desenvolvidas, conforme descrito seguir:

- Um dos principais eventos na evolução dos sistemas de injeção diesel, foi desenvolvido por Robert Bosch em 1927, com o lançamento de bombas mecânicas rotativa e em linha;
- Na década de 80, já estava surgindo os primeiros gerenciamentos eletrônicos, com o sistema EDC (*Eletronic Diesel Control*);
- Em 1994, foi lançado o sistema UIS (*Unit Injector System*), pela Bosch, utilizado em veículos industriais;
- Em 1998, foi comercializado pela primeira vez um veículo de passageiros com sistema UIS;
- Em 2002, foi criada pela Fiat o sistema de injeção Common Rail com precisão de injeção, que possui várias vantagens, como alto rendimento, baixo consumo e baixa emissão de CO<sub>2</sub>, o sistema também é conhecido como CRDI (*Common Rail Direct Injection*).

Tillmann (2013), argumenta sobre algumas variáveis importantes para a formação da mistura ar/combustível, como o ângulo, o posicionamento do bico injetor e o formato da câmara de combustão, que podem ser classificados em dois formatos que garantem o sistema de injeção, injeção direta e injeção indireta.

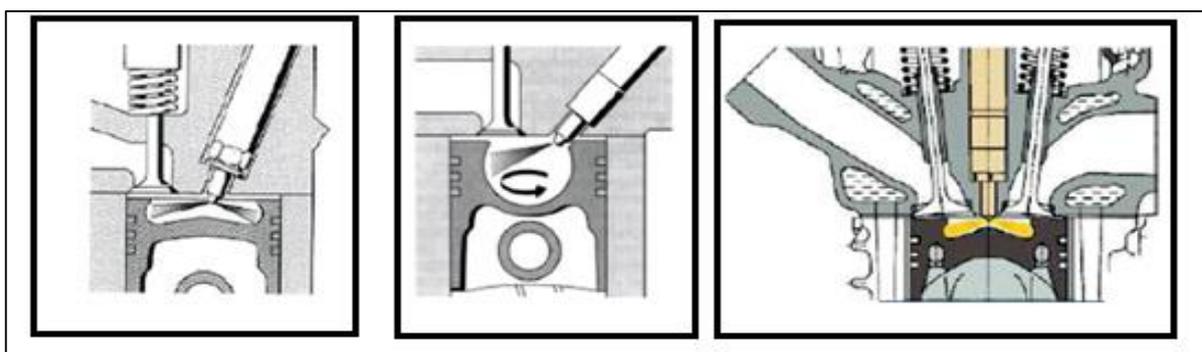
No sistema de injeção indireta, as gotas provenientes da atomização são mais grosseiras, isto é, de maior diâmetro médio. Nesse sistema utiliza-se menor pressão de alimentação nos injetores, pois a mistura é realizada pela turbulência do ar de admissão na câmara auxiliar ou também chamada de antecâmara, conforme mostra Figura 2, (RAMOS, 2009).



**Figura 2** - Câmara de combustão sistema de injeção indireta.

**Fonte:** Adaptado de Tillmann (2013).

Ramos (2009) pondera que no sistema de injeção direta, utiliza-se injetores com mais orifícios, nos quais se desenvolvem maiores pressões de injeção, apesar da grande turbulência na câmara de combustão gerada pelo ar de admissão, e se faz necessário elevadas pressões de injeção, sendo assim a atomização do combustível é formada com características ideais para uma combustão, ou seja, com gotas uniformes, conforme mostra Figura 3.



**Figura 3** - Câmara de combustão sistema de injeção direta.  
**Fonte:** Adaptado de Tillmann (2013).

Varella e Santos (2010) apontam os principais componentes de um sistema de alimentação de combustível de motores ciclo diesel que são: o reservatório de combustível, as tubulações de condução do combustível, a bomba injetora de combustível e os bicos injetores, podendo ser esse conjunto de componentes controlados mecanicamente ou eletronicamente.

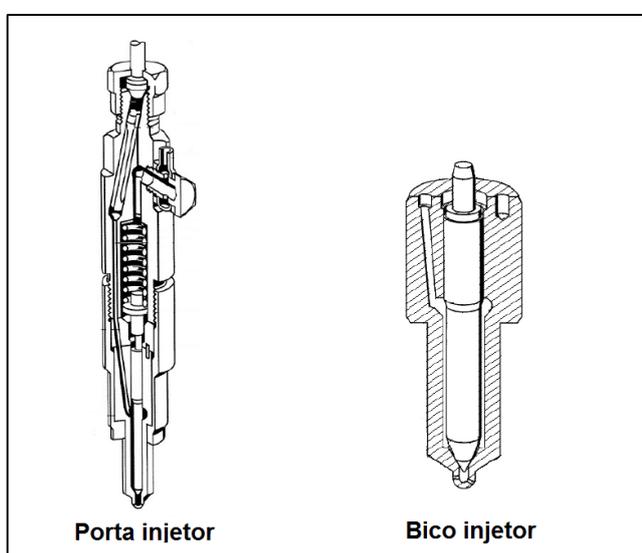
Os sistemas mecânicos consistem em uma bomba injetora de acionamento e controle mecânico complexo, que tem como função injetar o combustível no momento e no volume necessário para funcionamento do motor, independente da sua carga e rotação (BOSCH, 2005).

Segundo Ramos (2009), no sistema de injeção diesel de motores de ignição por compressão, o componente responsável por gerar pressão, denomina-se bomba injetora. Os dois principais tipos de bombas injetoras são: bomba injetora em linha e bomba injetora rotativa.

Uma bomba injetora em linha, possui o número de injetores conforme o número de pistões do motor. Os injetores são agrupados e dispostos em linha, e possui um movimento de descida e subida, para a pressurização do diesel, no qual o movimento é gerado por uma árvore de cames. A quantidade de óleo diesel injetado é feita por um rasgo lateral no injetor (MARTINS, 2006).

Na bomba rotativa, a árvore de cames é substituída por um prato ondulado, que possui a função de abertura do injetor no interior da bomba injetora. A pressurização do diesel na bomba injetora rotativa é gerada por apenas um elemento, podendo ser conjunto de engrenagens ou palhetas, a quantidade de injetor também segue a quantidade de pistões do motor (RAMOS, 2009).

Perera (2015), explica que a pressão gerada pela bomba injetora é transportada pela tubulação até o porta injetor, instalado na parte superior da câmara de combustão. O porta injetor, é basicamente constituído de duas partes, o corpo, denominado porta injetor e o bico injetor propriamente dito, conforme ilustrado na Figura 4.



**Figura 4** - Porta injetor e bico injetor.  
**Fonte:** Adaptado de Perera (2015).

Para otimizar o consumo de combustível, surgiu na década de 80, a injeção eletrônica a diesel, conforme relatos de Varella e Santos (2010). O sistema como *Common Rail*, permite melhor controle no processo de combustão se comparado com os sistemas mecânicos, resultando em melhor queima do combustível e consequentemente atuando na redução de poluentes.

O sistema de injeção *Common Rail System* (CRS), caracteriza-se por possuir um controle de pressão padrão para todos os injetores, fornecida por um tubo comum chamado *Rail*, a geração da pressão de combustível pode ser produzida e acumulada independente da rotação do motor e a quantidade de combustível a ser injetado também é independente da rotação do motor (PODORODECZKI, 2016).

O controle de abertura e fechamento do bico injetor é feito eletronicamente pela central de controle de injeção, que conforme a solicitação que o motor está sendo submetido, pode abrir e fechar várias vezes o bico injetor no momento da injeção, com isso promove melhor combustão, com maior rendimento e menor poluição, sendo essa razão a principal vantagem do *Common Rail*, (TILLMANN, 2013).

### 2.3 Parâmetros dos combustíveis

Algumas características do combustível podem alterar a forma como ocorre a eficiência da transformação de energia, dentre elas estão: o número de cetano, viscosidade, ponto de fulgor, ponto de névoa, calor de combustão, faixa de destilação densidade, entre outros (MACHADO, 2008; PERIN, 2014).

Conforme Souza et al. (2009), algumas características físico-químicas das misturas de diesel e biodiesel podem ser modificadas com o aumento da quantidade de biodiesel, conforme mostra Tabela 1, os valores de massa específica, viscosidade, ponto de fulgor e índice de cetano, tiveram um acréscimo com o aumento da quantidade biodiesel na mistura.

**Tabela 1** - Comparação das características físico-químicas do diesel puro (B0) e das misturas de biodiesel e diesel.

| Propriedades  | Amostras |       |       |       |       |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|
|   | B0       | B2    | B5    | B10   | B20   |
| Massa específica a 20 °C (kg m <sup>-3</sup> )                    | 838,5    | 839,5 | 841,3 | 844,1 | 850,6 |
| Viscosidade Cinemática a 40 °C (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ) | 3,50     | 3,47  | 3,53  | 3,55  | 3,61  |
| Ponto de fulgor (°C)  | 71       | 71    | 72    | 73    | 76    |
| Índice de cetano  | 45,7     | 50,8  | 50,7  | 50,6  | 50,7  |

Fonte: Adaptado de Souza et al. (2009).

O estudo realizado por Araújo et al. (2002) mostra que os valores de densidade e viscosidade podem ser maiores para óleos vegetais, conforme apresentado na Tabela 2, para óleo de amendoim, soja, algodão, girassol, babaçu, dendê e mamona.

**Tabela 2** - Características físico químicas de alguns óleos vegetais.

| Característica                           | Óleo vegetal |       |         |          |        |       |        |
|--|--------------|-------|---------|----------|--------|-------|--------|
|  | Amendoim     | Soja  | Algodão | Girassol | Babaçu | Dendê | Mamona |
| <b>Densidade<br/>(g cm<sup>-3</sup>)</b> | 0,919        | 0,920 | 0,919   | 0,923    | 0,921  | 0,915 | 0,959  |
| <b>Viscosidade<br/>(cSt)</b>             | 38           | 36    | 40      | 37       | 32     | 39    | 297    |
| <b>Número de<br/>cetano</b>              | 33           | 36    | 40      | 39       | 38     | 42    | -      |

Fonte: Adaptado de Araújo (2002).

Guedes (2017) relata que o viscosidade e número de cetano é um determinante indicador da qualidade de ignição, em que quanto menor o número de cetano maior é o atraso da ignição. Em relação à combustíveis com maiores viscosidades, estes apresentam atrasos da ignição representativos em virtude da atomização do combustível ser desfavorecida.

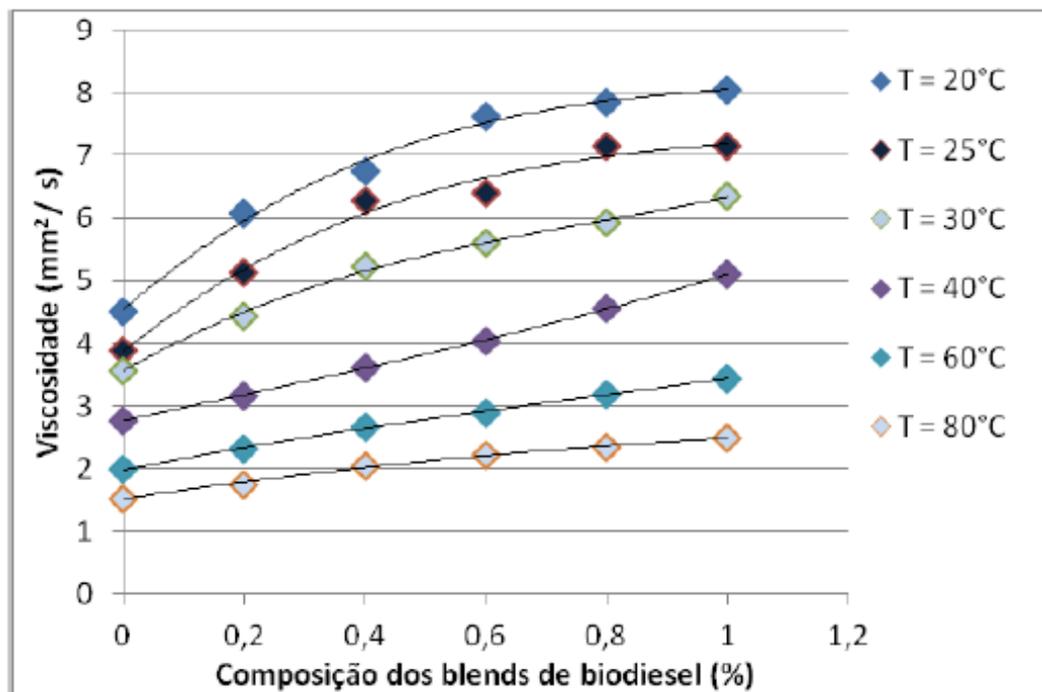
Machado (2003) observou que a viscosidade do óleo bruto de algumas culturas oleaginosas pode diminuir com o aumento da temperatura. Esses valores são descritos na Tabela 3.

**Tabela 3** - Viscosidades de alguns óleos vegetais em função da temperatura.

| Temperatura<br>°C           | Viscosidade (cSt) |         |          |       |       |
|-----------------------------|-------------------|---------|----------|-------|-------|
|                             | Amendoim          | Algodão | Girassol | Colza | Soja  |
| <b>40</b>                   | 42,0              | 38,0    | 39,5     | 35,0  | 34,0  |
| <b>60</b>                   | 23,0              | 22,5    | 23,5     | 22,3  | 19,0  |
| <b>80</b>                   | 11,5              | 10,0    | 14,0     | 11,0  | 9,7   |
| <b>100</b>                  | 8,2               | 8,4     | 9,0      | 10,4  | 6,0   |
| <b>Número de<br/>Cetano</b> | 38-42             | 35-40   | 33-37    | 37,6  | 36-39 |

Fonte: Adaptado de Machado (2003).

Gabriel et al. (2014) também trabalharam com o aquecimento de mistura de diesel e biodiesel de dendê, em temperaturas de 20, 25, 30, 40, 60 e 80°C, conforme apresentado na Figura 5, onde as viscosidades mais baixas a temperatura de 80°C, e com o acréscimo da quantidade de biodiesel, também ocorre o acréscimo da viscosidade.



**Figura 5** - Curva de viscosidade dos blends de diesel/ biodiesel de dendê.  
**Fonte:** (GABRIEL, 2014).

## 2.4 Atomização do combustível

A atomização é a formação de pequenas gotas, que podem variar de tamanho conforme sua aplicação e, que possuem área de superfície elevada, causando uma rápida reação química e transferência de calor (SCHASCHKE, 2014),

Segundo Perera (2015), a principal função de um atomizador é desintegrar um jato líquido, acarretando a dispersão de pequenas gotas, de forma a constituírem um *spray*.

Pires (2013), afirma que a desintegração de um líquido combustível, ocorre em duas partes, uma correspondente a desintegração primária e desintegração secundária, conforme descrito a seguir:

- Quando um líquido combustível desloca-se passando por um atomizador, se não houver pressão e velocidade do líquido adequada, apenas se formará uma coluna de líquido, porém com pressão e velocidade correta, o líquido sofre oscilações e perturbação, fazendo com que o mesmo se desintegre a partir do núcleo do líquido. Isso resultará na formação de gotas, no entanto, elas são instáveis, e a desintegração se dá pelas várias forças internas e externas da coluna de líquido, obtendo-se

assim desintegração primária. Algumas variáveis são levadas em consideração nesse processo tal como, número de Reynolds, (que representa a relação de forças de inércias e forças viscosas), número de Weber, (que representa a relação aerodinâmica e a tensão superficial) e o número de Ohnesorge, (que representa o índice de viscosidade).

- Após a desintegração primária, as gotas instáveis estão sujeitas a uma nova desintegração, através de forças aerodinâmicas, o que resulta na desintegração secundária. O ambiente gasoso, no qual ocorre a atomização e a velocidade relativa da gota, desempenham um papel fundamental na desintegração secundária.

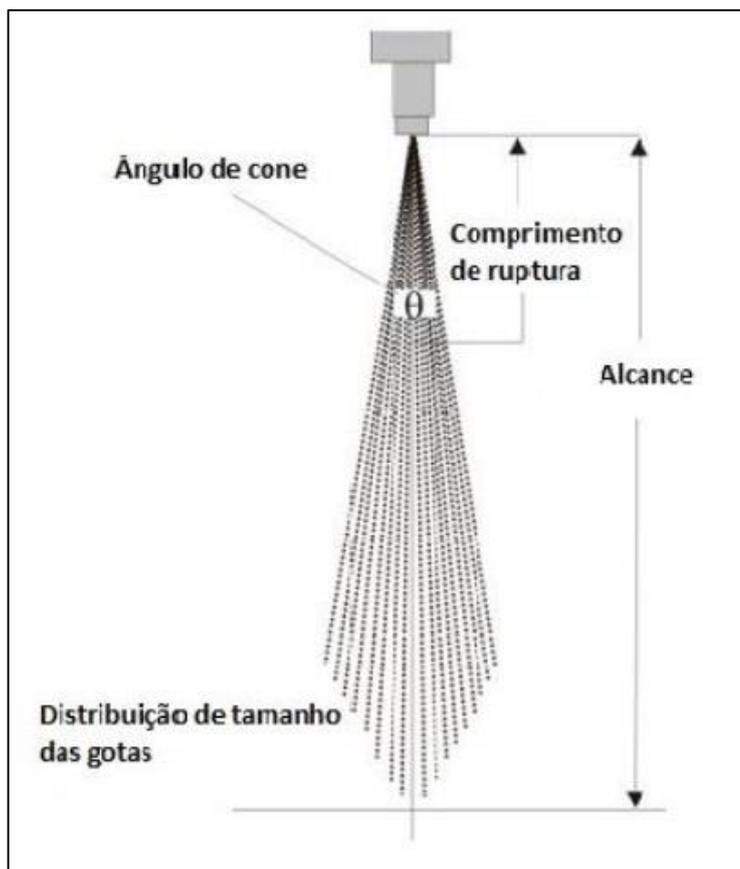
Os atomizadores são dispositivos desenvolvidos para a transformação de líquidos em nuvens de pequenas gotas, maximizando a área de contato no meio circundante (AYALA, 2016).

Segundo Ayala (2016), para que ocorra uma rápida vaporização e transferência de calor de um combustível em uma combustão, é preciso que o combustível seja desintegrado em pequenas gotas. O objetivo principal da transformação de um líquido em pequenas gotas, consiste no aumento da área superficial.

Para Siano (2010), de uma forma geral, a qualidade de uma atomização pode ser estimada com base no diâmetro médio das gotas, que torna o mecanismo de atomização responsável pela distribuição das gotas de combustível durante a injeção do combustível.

Carvalho (2015) argumenta que parâmetros como alcance do jato, tempo de ruptura, diâmetro médio das gotas e o ângulo de cone, formado na atomização do combustível, são fundamentais para predizer a qualidade e eficiência da atomização, visualizados na Figura 6, logo esses parâmetros, podem variar conforme as propriedades físico-químicas do combustível.

Em conformidade com Carvalho et al. (2014), parâmetros como viscosidade e massa específica do combustível são fatores importantes para uma boa atomização, e que também influenciam na eficiência da combustão.



**Figura 6** - Parâmetros físicos de um spray diesel.  
**Fonte:** (CARVALHO, 2015).

Para Faria, Pinto e Valle (2010), a eficiência da combustão e da emissão de poluentes está diretamente ligada a relação de mistura ar/combustível. Quanto mais homogênea for a mistura melhor será o desempenho do motor, pois a homogeneidade da mistura ar e combustível é afetada pela atomização do combustível na câmara de combustão.

## 2.5 Ensaio dinamométrico

Segundo Alves Filho e Nogueira (2015), o propósito de um ensaio com dinamômetro é avaliar o desempenho de um motor a combustão, com a coleta de dados que permitam calcular o torque e potência gerados em função da rotação. Para que se consiga um torque é necessária uma força contrária a rotação, podendo ser chamada esta de “frenagem”. Existem várias maneiras de se obter a frenagem de um motor, com mecanismos que trabalham de forma diferenciada, ou seja, existem alguns

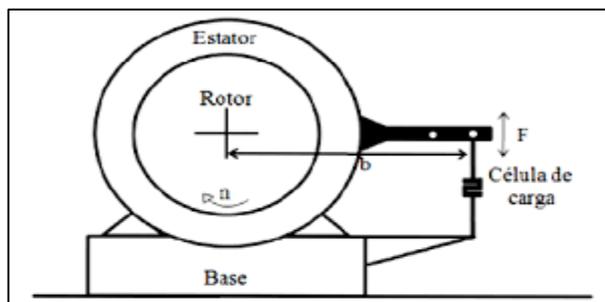
tipos de dinamômetros, os quais podemos citar, dinamômetro de Corrente de Foucault, dinamômetro elétrico, dinamômetro de inércia e dinamômetro hidráulico.

Para Tillmann (2013), as informações dos parâmetros de desempenho mecânico de motores, podem ser obtidos e validados através da aquisição de dados com ensaios de desempenho mecânico, realizado em bancada dinamométrica, que são caracterizadas pelos dinamômetros, podendo ser de frenagem elétrica ou hidráulica.

Máquinas de verificação de torque/potência conhecidas como dinamômetros são aquelas com capacidade de mensurar o valor torque e potência de um motor em suas diversas fases e escalas de trabalho ao longo de um ensaio (HAICAL, 2009).

Alguns dinamômetros utilizam para a frenagem a eletricidade, que funcionam através do princípio das Corrente de Foucault. Com a criação de correntes elétricas no rotor metálico condutor, causando um campo eletromagnético contrário ao sentido do rotor, criando o efeito de frenagem eletromagnética (SOUZA, 2005).

A variação da corrente produz torque no dinamômetro, e a medição desse torque é feita por meio da célula de carga, que está acoplada mecanicamente a uma alavanca (VIANA, 2011). A Figura 7 representa o princípio de funcionamento de um dinamômetro de corrente contínua.



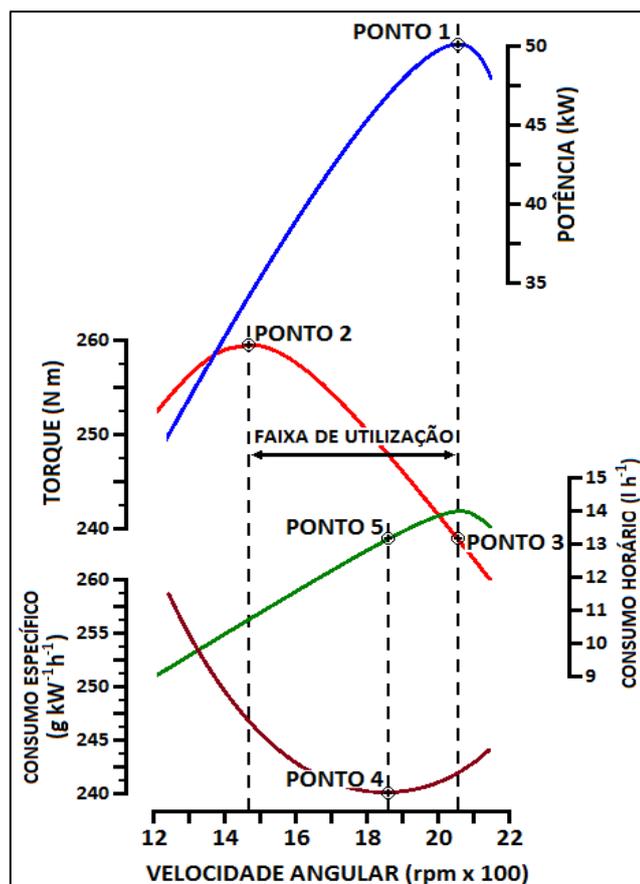
**Figura 7** - Princípio de funcionamento de um freio dinamométrico.

**Fonte:** (FIORESE et al., 2012)

## 2.6 Pontos de interesse na avaliação de desempenho de motor

Para Fernandes (2011), as variáveis que demonstram que um motor de combustão interna está desenvolvendo trabalho, com melhor eficiência e rendimento são: potência efetiva, potência indicada, potência de atrito, torque, consumo específico de combustível, rendimento volumétrico e o rendimento total.

Segundo Tillmann (2013), nos ensaios dinamométricos, são constatados a partir da leitura direta, parâmetros como, torque e velocidade angular. Com essas variáveis são calculados e corrigidos o valor de potência efetiva, podendo ser representado em forma de gráfico e ou planilha. Em forma gráfica os valores das variáveis podem ser reproduzidos em forma de curva característica do motor, com valores mínimos, máximos e suas variações, conforme demonstra Figura 8.



**Figura 8** - Curvas características da avaliação de desempenho.  
**Fonte:** (IACONO, 2017).

De acordo com Mialhe (1996), existem cinco pontos de particular interesse nas curvas que caracterizam o desempenho de motores: ponto de potência máxima (ponto 1), ponto de torque de potência efetiva máxima (ponto 3), ponto de torque máximo (ponto 2), ponto de consumo específico mínimo (ponto 4) e ponto de consumo horário ótimo (ponto 5), Figura 8.

Além dos pontos de interesse podem-se relacionar alguns índices dos motores agrícolas, como os de elasticidade, reserva de torque e a reserva de rotação, que são atributos medidos na faixa de utilização compreendido entre a rotação de

potência máxima e rotação de torque máximo, onde a faixa de utilização é útil na tomada de decisão para desenvolvimento de trabalho em campo (FARIAS, 2014).

Os parâmetros de avaliação do desempenho de motores são alcançados por intermédio do princípio da comparabilidade das curvas de torque e potência de dois tratores, cujos motores desenvolvem potência máxima semelhante. A realização dos ensaios requer o uso de bancadas dinamométricas e com a utilização de um método normatizado, o qual define as condições e os procedimentos (MIALHE, 1996).

## 2.7 Emissões atmosféricas

Durante a 15ª Conferência das Partes da UNFCCC em Copenhague (COP15), que aconteceu na Dinamarca, o Brasil assumiu a meta voluntária de reduzir até 2020, entre 36,1 e 38,9% das emissões de Gases Efeito Estufa (GEE), a partir daí foi sancionada pela presidência da República em 29 de dezembro de 2009 a Lei Nº. 12.187/09, a qual deu origem a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).

Na resolução nº 433, de 13 de julho de 2011 publicada no DOU nº 134, de 14/07/2011, pág. 69, está estabelecida que a partir de 1º de janeiro de 2017, todos os motores destinados às máquinas agrícolas novas, em produção ou importados, com potência igual ou maior de 75 kW, devem atender aos limites da fase MAR-I de acordo com a resolução, também a partir de 1º de janeiro de 2019, todos os motores destinados às máquinas agrícolas novas, em produção ou importados, com potência igual ou superior a 19 kW e até 75 kW, devem atender aos limites da fase MAR-I. Os limites estão especificados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Limites máximos de emissão para motores de máquinas agrícolas e rodoviárias (PROCONVE MAR-I).

| (Potência P em<br>KW) * | CO (g/kWh) | HC + NOx (g/kWh) | MP (g/kWh) |
|-------------------------|------------|------------------|------------|
| $130 \leq P \leq 560$   | 3,5        | 4,0              | 0,2        |
| $75 \leq P < 130$       | 5,0        | 4,0              | 0,3        |
| $37 \leq P < 75$        | 5,0        | 4,7              | 0,4        |
| $19 \leq P < 37$        | 5,5        | 7,5              | 0,6        |

\*Potência máxima de acordo com a Norma ISO 14396:2002, que a critério do IBAMA poderá adotar norma ABNT equivalente.

**Fonte:** Adaptado da resolução nº 433, de 13 de julho de 2011.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Local do experimento

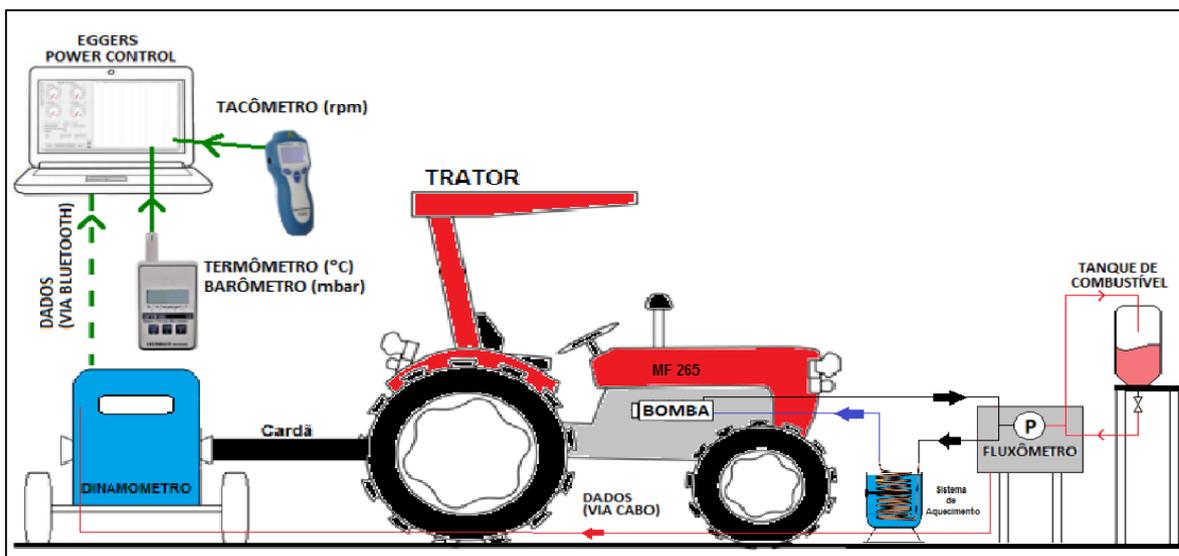
Os ensaios de desempenho do motor agrícola e emissões atmosféricas foram realizados no Laboratório de Mecanização Agrícola (LAMA). Para a determinação das propriedades físico-químicas, foi utilizado o laboratório de Biocombustíveis, ambos localizados na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), *campus* de Cascavel, Paraná, Brasil, com latitude (S) de 24°59'21.3", longitude (W) de 53°26'58.3" e altitude 755 m.

#### 3.2 Descrição geral do experimento

O trator ensaiado tinha disponível uma tomada de potência TDP com velocidade única de 540 rpm, com eixo estriado com 6 estrias e diâmetro de 35 mm, onde foi utilizado para conexão do trator com o dinamômetro via eixo cardã próprio para ensaios dinamométricos.

O tanque de combustível original do trator foi desconectado do sistema de alimentação de combustível, e substituído por um reservatório aparte, onde foram colocadas as misturas dos biocombustíveis. Do reservatório o combustível passava pelo fluxômetro, para o sistema de aquecimento, indo para a bomba injetora, onde foi ignorado o filtro original do trator antes da bomba injetora, pois o fluxômetro possui um filtro interno. Em cada ensaio nas diferentes misturas foi realizada a drenagem das mangueiras e retirada do combustível que havia sobrado no reservatório.

Na Figura 9, encontra-se um esquema representativo de como foi montado o ensaio para coleta de dados da pesquisa, em que o fluxômetro foi ligado via cabo no dinamômetro para envio de informações de consumo de combustível. O dinamômetro envia, as informações de desempenho via bluetooth para o software de aquisição de dados EGGERS PowerControl® v2.1.



**Figura 9** - Esquema demonstrativo do experimento.

Todos os dias antes de iniciar os ensaios de desempenho foi desenvolvido um procedimento para que o mesmo atingisse condições de trabalho, onde o trator era acelerado a uma rotação próxima de 2000 rpm e era aplicada uma carga manualmente no dinamômetro, durante um período de aproximadamente 20 minutos. Esse procedimento aferia as temperaturas de fluido de arrefecimento e óleo lubrificante do motor.

Foram feitas para todas as misturas cinco medições de desempenho, mas para garantir que a temperatura do combustível se mantivesse até a bomba injetora, os dois primeiros dados foram descartados considerando-se nas avaliações somente as três repetições posteriores. Na Figura 10 foi apresentado o trator ligado ao dinamômetro via eixo cardã.



**Figura 10** – Trator MF 265 acoplado no dinamômetro via eixo cardã numa ocasião de ensaio.

### 3.3 Avaliação de desempenho do motor agrícola

Para avaliação de desempenho de motor agrícola, foi utilizado um dos tratores do *campus* da UNIOESTE Cascavel, que estava em plenas condições de uso, usado nas tarefas de manutenção da universidade. Trata-se de um trator marca Massey Ferguson modelo MF 265, tração 4x2, o qual apresentava em seu horímetro 1076 horas de utilização. No início dos ensaios não se pode afirmar realmente a quantidade de horas de utilização do mesmo, pois não foi possível o conhecimento se houve troca do horímetro, todavia a data de fabricação é de 1989.

Na Tabela 5 são descritos os dados técnicos do trator agrícola segundo o fabricante, em seguida na Figura 11 tem-se uma imagem do trator ensaiado.

**Tabela 5** - Dados técnicos do trator agrícola ensaiado.

| <b>Performance</b>        |                      |
|---------------------------|----------------------|
| Fabricante                | Massey Ferguson      |
| Modelo                    | MF 265               |
| Potência                  | 61 CV a 2000 rpm     |
| Torque máximo             | 23,3 mkgf a 1300 rpm |
| <b>Motor</b>              |                      |
| Marca                     | Perkins              |
| Modelo                    | AD4.203              |
| Número de cilindros       | 4                    |
| Injeção                   | Direta               |
| Velocidade angular na TDP | 540 RPM              |

**Fonte:** Dados do fabricante.



**Figura 11** – Trator Massey Ferguson modelo 265 utilizado para os ensaios.

Antes do início dos ensaios foram realizadas operações de manutenção: troca de filtro de ar, troca de filtro de óleo lubrificante do motor, troca de filtro de combustível, troca de óleo lubrificante do motor, limpeza e regulagem dos bicos injetores. A bomba injetora também foi enviada a assistência técnica, onde realizaram a troca de reparos internos e regulagem. Foram verificados ainda o ajuste da regulagem de válvulas, ajuste conforme original, e os níveis de fluido de arrefecimento e do óleo lubrificante.

### 3.4 Ensaios com dinamômetro

Para as medições de torque e potência, foi acoplado à TDP do trator um dinamômetro móvel da marca *Eggers*, modelo PT170, apresentado na Figura 12, que tem como princípio de funcionamento o freio magnético por correntes parasitas (correntes de Foucault).



**Figura 12** - Dinamômetro EGGERS, modelo PT170.

O dinamômetro foi ligado ao trator mecanicamente via eixo cardã especial para ensaio dinamométrico, de velocidade angular 540 rpm que possui engate rápido em suas extremidades. Os ensaios foram empreendidos com operações conforme recomendação do fabricante do dinamômetro *Eggers*.

O controle e configuração do dinamômetro foi feita com auxílio do software *Eggers PowerControl®* v2.1, o mesmo foi alimentado com dados de temperatura e pressão atmosférica para correção dos valores apresentados. Valores efetivos de potência na TDP segundo a norma DIN 70020, que determina o procedimento adotado para determinação da potência líquida de motores.

O software permite a configuração dos pontos de rotação a serem medidos, e foi configurado para medições cada 100 RPM, com termino de uma rotação para todos os ensaios de 1000 rpm. As informações coletadas podem ser visualizadas em forma de tabela ou gráficos e também podem ser exportadas para softwares como Excel® para manipulação dos dados, ilustrada na Figura 13, está a tela de visualização dos dados durante os ensaios utilizando o *PowerControl®*.

The screenshot shows the software interface with a configuration panel on the left and a data table on the right. The configuration panel includes fields for date, time, atmospheric pressure, temperature, order number, client, vehicle type, ID, year, hours of use, gear ratio, motor RPM, and TDP RPM. The data table displays 16 rows of test results with columns for number, rotation (rpm), TDP torque (Nm), power (CV), and specific consumption (g/CVh).

| numero | rotação [rpm] | rotação [rpm] | TDP torque [Nm] | potência [CV] | consumo | consumo específico [g/CVh] | notas |
|--------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------|----------------------------|-------|
| 1      | 2391          | 773           | 4               | 1             | 6,3     | 4110,0                     |       |
| 2      | 2354          | 761           | 75              | 27            | 9,0     | 290,3                      |       |
| 3      | 2252          | 728           | 160             | 55            | 18,0    | 279,3                      |       |
| 4      | 2146          | 694           | 158             | 52            | 17,1    | 279,7                      |       |
| 5      | 2041          | 660           | 165             | 51            | 17,1    | 281,6                      |       |
| 6      | 1948          | 630           | 171             | 51            | 15,3    | 256,4                      |       |
| 7      | 1846          | 597           | 177             | 50            | 14,4    | 245,0                      |       |
| 8      | 1747          | 565           | 182             | 48            | 14,4    | 253,7                      |       |
| 9      | 1645          | 532           | 186             | 47            | 13,5    | 245,6                      |       |
| 10     | 1546          | 500           | 190             | 45            | 13,5    | 255,6                      |       |
| 11     | 1444          | 467           | 196             | 43            | 12,6    | 247,3                      |       |
| 12     | 1345          | 435           | 199             | 41            | 11,7    | 242,5                      |       |
| 13     | 1243          | 402           | 201             | 38            | 10,8    | 239,1                      |       |
| 14     | 1144          | 370           | 206             | 36            | 10,8    | 256,5                      |       |
| 15     | 1042          | 337           | 202             | 32            | 9,9     | 260,7                      |       |
| 16     | 996           | 322           | 202             | 31            | 9,9     | 268,5                      |       |

Figura 13 – Tela de visualização de dados do Software *EGGERS PowerControl®* v2.1.

### 3.5 Medições complementares

Para verificação da pressão atmosférica e temperatura ambiente foi utilizado um termo-higro-barômetro, marca Greisinger, modelo GFTB-100, com as especificações técnicas representadas na Tabela 6.

**Tabela 6** - Dados técnicos do Termo-higro-barômetro GREISINGER GFTB-100.

|                            | <b>Temperatura</b> | <b>Umidade</b>      | <b>Pressão</b>        |
|----------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| <b>Range</b>               | -25,0°C á +70,0°C  | 0,0 á 100,0 %UR     | 10.0 à 1100.0 mbar    |
| <b>Resolução</b>           | 0,1°C              | 0,1 %UR             | 0,1 mbar              |
| <b>Acurácia</b>            | ±0,1°C             | ±2,5 %UR            | ±1,5 mbar             |
| <b>Ponta de medição</b>    | Pt100              | Polímero capacitivo | Sensor piezoresistivo |
| <b>Temperatura nominal</b> |                    | 25,0°C              |                       |

Fonte: Dados do fabricante.

Para a medição da velocidade angular do motor, foi utilizado um tacômetro do modelo 2790 fabricado pela PeakTech. Os dados técnicos são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7** - Dados técnicos do tacômetro Peaktech 2790.

|                                |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| <b>Precisão</b>                | ± 0,05% + 1 dígito         |
| <b>Tempo de amostragem</b>     | 0,5 sec (acima de 120 RPM) |
| <b>Distância de medição</b>    | 50 mm ~ 500 mm             |
| <b>Tipo de Laser</b>           | classe 2, Saída < 1 mW     |
| <b>Temperatura de operação</b> | 0°C ~ 50°C                 |

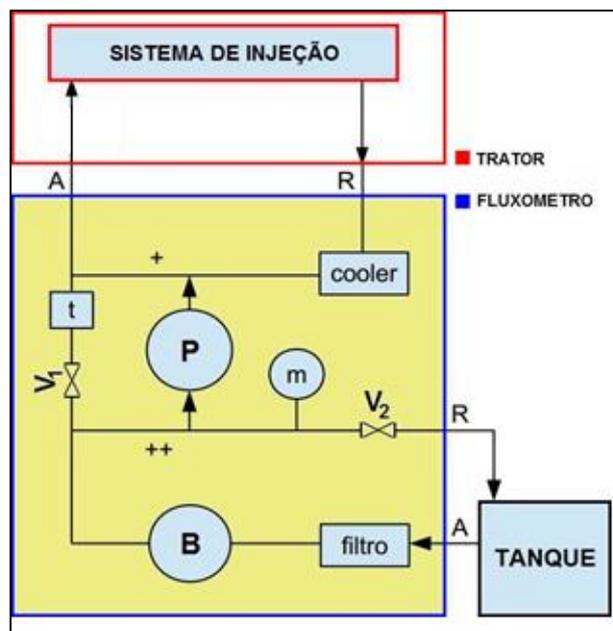
Fonte: Dados do fabricante.

### 3.6 Fluxômetro

Juntamente aos ensaios dinamométricos, foram elaboradas as medições do consumo específico ( $\text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) e consumo horário ( $\text{l h}^{-1}$ ) de combustível através de um fluxômetro, marca *Eggers*, modelo FM3-100 (Figura 14) conectado ao sistema de injeção do trator.

**Figura 14** - Fluxômetro EGGERS modelo FM3-100.

Na Figura 15 consta um fluxograma de funcionamento do fluxômetro utilizado nos ensaios, como procedimento do fabricante, é necessário abrir a válvula V1 por um período de tempo, para que seja purgado o ar do sistema, e antes de iniciar a medição essa válvula deve ser fechada.



**Figura 15** - Fluxograma do sistema de medição.

Na parte do sistema especificada como fluxômetro, o combustível flui do tanque de combustível, passando por um filtro do próprio fluxômetro, bomba de sucção de combustível (B), manômetro (m), válvula reguladora de pressão (V2) e então retorna ao tanque de combustível, podendo também entrar em funcionamento quando o trator é ligado, pois ao invés do combustível retornar ao tanque, o sistema de injeção irá fazer a sucção do combustível e ele passará pelo medidor de pulsos (P), que mensura o fluxo de combustível propriamente dito, e então entra no sistema de injeção do trator, passando pelo filtro do trator, bomba injetora, bicos injetores, e o excesso de combustível que sobra dos bicos, passa por um resfriador e vai novamente para o sistema de injeção do trator.

### 3.7 Aquecimento do combustível

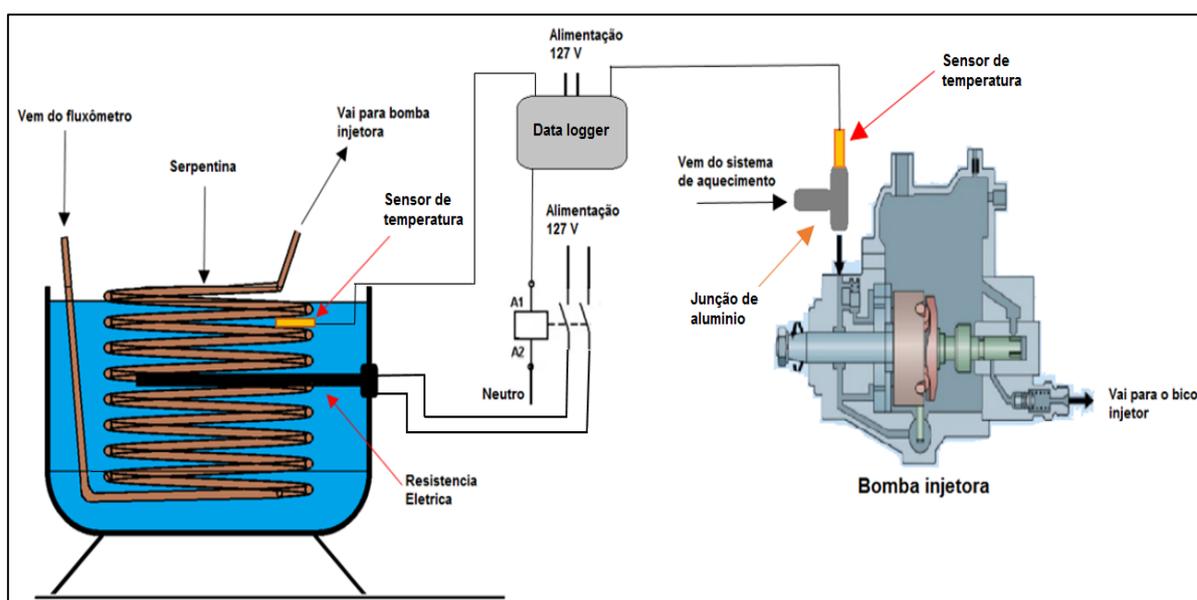
Para o aquecimento do combustível nesse trabalho, foi utilizado um dispositivo depois do fluxômetro e antes do sistema de injeção de combustível do trator agrícola. O mesmo foi fabricado com uma serpentina em forma de espiral de aproximadamente 15 centímetros de diâmetro e com 10 espiras, no qual foi colocado

um tubo de cobre de diâmetro interno aproximado 6 mm e posteriormente inserido em um recipiente de metal em forma de um cilindro de aproximadamente 25 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura, o esquema representativo é mostrado nas Figuras 16 e 17.

No cilindro de metal foi fixado uma resistência elétrica de 1500 watts de potência e uma tensão elétrica de 127 volts. O recipiente de metal foi enchido com água, onde a resistência elétrica aqueceu a água, e fez troca térmica com a serpentina, e a serpentina aqueceu o combustível. Para a condução do combustível da serpentina até a bomba injetora foi usado uma tubulação de poliuretano PU, revestida com uma manta térmica.

A medição da temperatura foi feita a partir de dois sensores de temperatura, sendo um termopar tipo J, que colocado na água para efetuar o controle, e outro sensor PT 100, tipo haste introduzido na entrada da bomba injetora, para monitoramento da temperatura dos biocombustíveis de alimentação.

O controle da temperatura foi feito com um data logger da marca Novus, modelo FieldLogger 512k, que a partir da temperatura da água foi mantido um controle on-off, monitorando os valores de temperatura antes da bomba injetora. Para acionamento da resistência, o data logger acionava um saída relé, onde estava ligada uma contadora para acionamento da resistência. O data logger também foi programado para registrar os valores de temperatura a cada segundo.



**Figura 16** - Esquema representativo do sistema de aquecimento dos biocombustíveis.



**Figura 17** – Recipiente de metal com a serpentina em aquecimento, utilizado no sistema de aquecimento dos biocombustíveis.

### **3.8 Combustíveis e tratamentos**

Nos ensaios de desempenho de motor agrícola, foram utilizados os combustíveis, diesel tipo A S500, diesel puro, e etanol anidro (99,6% de pureza), doados por uma distribuidora de materiais derivados de petróleo na região de Cascavel-PR. Já o biodiesel das misturas, foi material de doação, cedido por uma empresa do ramo de fabricação de biodiesel, localizada na região de Marialva-PR, onde o biodiesel possui uma composição de óleo de soja (68%), gordura bovina (25%), gordura de porco (5%) e óleo de aves (2%).

As misturas aplicadas nos ensaios, foram preparadas no laboratório LAMA, sendo as proporções das misturas, medidas através de proveta graduada em escala de mililitros (ml). A sequência das misturas, foi preenche a fração de diesel, depois a fração de biodiesel e ao final, a fração de etanol, sendo agitadas após o preparo, e antes da utilização por cerca de 5 minutos.

Levando em consideração o ano de fabricação do motor agrícola avaliado, que foi projetado para trabalhar com diesel puro, primeiramente foi realizado ensaio com diesel sem mistura, para contrastar os valores do fabricante com o da pesquisa. Na sequência, foram feitas misturas de 8, 15 e 20% de biodiesel, com e sem etanol, conforme apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8** - Composição das misturas de biocombustíveis ensaiadas.

| Tratamento | Diesel "A" | Biodiesel | Etanol<br>Anidro | Temperatura<br>de ensaio |
|------------|------------|-----------|------------------|--------------------------|
|            |            |           |                  |                          |
| B0E0T45    | 100        | 0         | 0                | 45°C                     |
| B8E0T45    | 92         | 8         | 0                | 45°C                     |
| B15E0T45   | 85         | 15        | 0                | 45°C                     |
| B20E0T45   | 80         | 20        | 0                | 45°C                     |
| B0E0T65    | 100        | 0         | 0                | 65°C                     |
| B8E0T65    | 92         | 8         | 0                | 65°C                     |
| B15E0T65   | 85         | 15        | 0                | 65°C                     |
| B20E0T65   | 80         | 20        | 0                | 65°C                     |
| B0E0T85    | 100        | 0         | 0                | 85°C                     |
| B8E0T85    | 92         | 8         | 0                | 85°C                     |
| B15E0T85   | 85         | 15        | 0                | 85°C                     |
| B20E0T85   | 80         | 20        | 0                | 85°C                     |
| B0E1T45    | 99         | 0         | 1                | 45°C                     |
| B8E1T45    | 91         | 8         | 1                | 45°C                     |
| B15E1T45   | 84         | 15        | 1                | 45°C                     |
| B20E1T45   | 79         | 20        | 1                | 45°C                     |
| B0E1T65    | 99         | 0         | 1                | 65°C                     |
| B8E1T65    | 91         | 8         | 1                | 65°C                     |
| B15E1T65   | 84         | 15        | 1                | 65°C                     |
| B20E1T65   | 79         | 20        | 1                | 65°C                     |
| B0E1T85    | 99         | 0         | 1                | 85°C                     |
| B8E1T85    | 91         | 8         | 1                | 85°C                     |
| B15E1T85   | 84         | 15        | 1                | 85°C                     |
| B20E1T85   | 79         | 20        | 1                | 85°C                     |

### 3.9 Medição de emissões atmosféricas

Para a medição dos níveis de gases emitidos pela combustão no motor, foi utilizado um analisador de combustão da marca Bacharach, modelo PCA3-285,

exemplificado na Tabela 9, estão os limites de medição dos sensores deste analisador, que permitiu medir as emissões de oxigênio (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e emissões de NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>), temperatura dos gases de exaustão (°C) e eficiência da combustão (%).

**Tabela 9** – Dados técnicos do medidor de emissões Bacharach PCA3-285.

| <b>Gás</b>                  | <b>Faixa de leitura</b> | <b>Precisão</b>                                      |
|-----------------------------|-------------------------|--|
| <b>O<sub>2</sub></b>        | 0,1 à 20,9 [%]          | ± 0,3%   |
| <b>CO<sub>Low</sub></b>     | 0 à 4000 [ppm]          | ±10 ppm  |
| <b>NO</b>                   | 0 à 3000 [ppm]          | ±5 ppm   |
| <b>NO<sub>2</sub></b>       | 0 à 500 [ppm]           | ±5 ppm   |
| <b>Temperatura Ambiente</b> | -20 à 537 [°C]          | ± 2°C<br>± 2°C entre 0 e 124 °C                      |
| <b>Temperatura Chaminé</b>  | -20 à 1200 [°C]         | ± 3°C entre 125 e 249 °C<br>± 4°C entre 250 e 400 °C |

Fonte: Dados do fabricante.

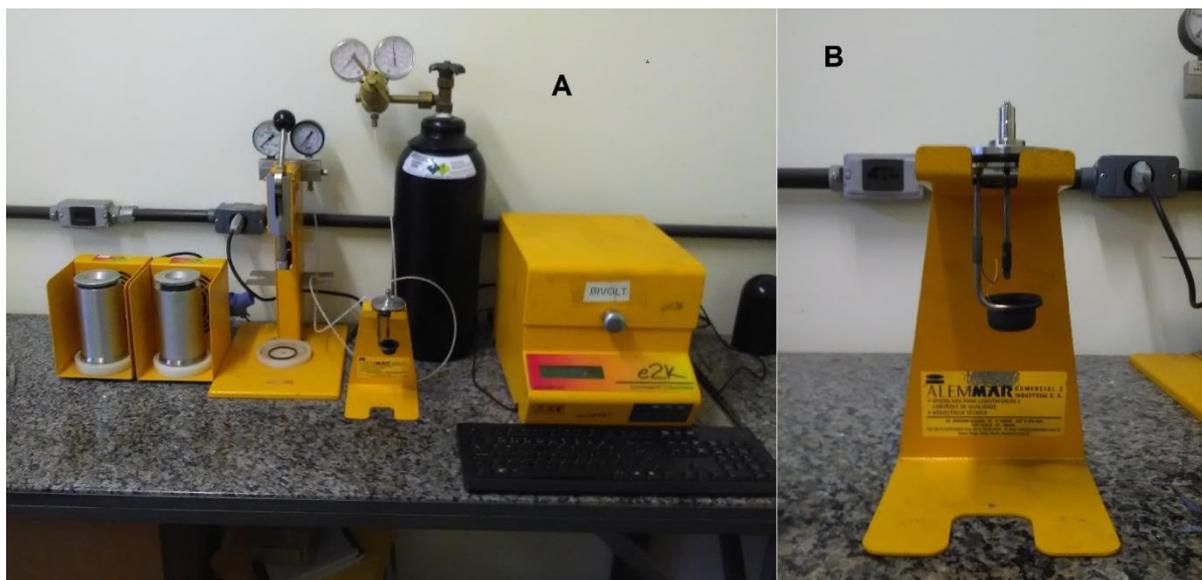
As leituras foram realizadas logo após os ensaios de desempenho, com medições apenas no ponto de potência máxima. A medição foi repetida até a estabilização dos valores das emissões.

### 3.10 Análise físico-químicas

Para melhor entendimento do desempenho do motor agrícola foram feitas análises físico-químicas das misturas de poder calorífico inferior PCI, viscosidade e a densidade, descritas a seguir.

#### 3.10.1 Poder calorífico inferior

Para a avaliação do poder calorífico inferior (PCI), previamente analisou-se o poder calorífico superior (PCS), no qual foi utilizado um calorímetro isotérmico modelo e2K, da marca DDS Calorimeters, conforme mostrado na Figura 18.



**Figura 18** – (A) Calorímetro e2K para medição do poder calorífico superior (PCS); (B) Cadinho metálico e fio de algodão (fio de ignição) preso a resistência.

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS), foram pesados cerca de 0,50 gramas da amostra em análise no cadinho metálico, que foi colocado no suporte e um fio de algodão (fio de ignição) foi amarrado a resistência e suas pontas imersas no cadinho (figura 16-B). Após esse procedimento o suporte foi acomodado dentro da bomba, tampada e pressurizada a 3 MPa com oxigênio, e então deu-se início a medição do poder calorífico. Cada medição foi realizada em quadruplicata e comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância, onde os resultados expressos em MJ Kg<sup>-1</sup>.

Ao final de todas as análises, foi realizada a medição do poder calorífico do ácido benzoico, que possui poder calorífico já determinado pelo fabricante, para fins de aferição do instrumento e correção dos valores.

A determinação do PCI foi baseada na equação 1, descrita por Volpato et al. (2009):

$$PCI = PCS - 3,052$$

**Equação 1** - Determinação do Poder Calorífico Inferior (PCI) a partir do Poder Calorífico Superior (PCS).

Na qual:

*PCI*: Poder calorífico inferior (MJ Kg<sup>-1</sup>);

*PCS*: Poder calorífico superior (MJ Kg<sup>-1</sup>);

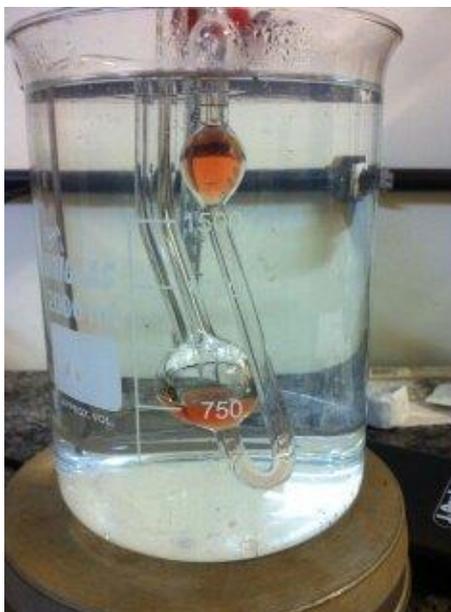
3,052: Constante.

### 3.10.2 Viscosidade

Foi utilizado um viscosímetro capilar Cannon-Fenske (Figura 19), o qual foi mergulhado em banho maria a uma temperatura regulada de 40°C, temperatura que é utilizada pela norma ASTM D 445, seguida pela ANP Para a determinação da viscosidade, também foram aplicados ensaios a 45, 65 e 85°C, temperaturas estudadas nesse trabalho.

Para determinação da viscosidade cinemática, introduz-se a amostra pelo bocal de maior tamanho e succiona pelo orifício menor através de uma pera de sucção, até atingir a marcação superior. A amostra escoo pela ação da gravidade e, com o auxílio de um cronômetro, anota-se o tempo gasto para percorrer a marcação superior até a marcação inferior, realizou-se em triplicata com cada amostra, desprezando-se a primeira medição, já que se considera que a amostra está em período de adaptação da temperatura do meio.

O cálculo é feito multiplicando o tempo de escoamento, dado em segundos, pela constante do viscosímetro, sendo o resultado dado em  $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$  ou cSt (centistoke).



**Figura 19** - Viscosímetro Cannon-Fenske utilizado para medição da viscosidade das amostras, em banho maria.

### 3.10.3 Densidade

Para a determinação da massa específica das amostras partiu-se do método do picnômetro de 25 ml. Para fins de calibragem do picnômetro, pesa-se o mesmo vazio e completamente cheio de água destilada, deixando-o em banho maria para manutenção constante da temperatura a 20 °C. Após o cálculo da densidade da água, realizou-se o mesmo procedimento, apenas substituindo a água destilada pelas amostras. O cálculo da densidade é obtido pela equação abaixo:

$$d = \frac{m}{V}$$

**Equação 2** – Cálculo da densidade.

Onde  $d$  representa a densidade a 20°C,  $m$  é a massa da amostra, em gramas, e  $V$  é o volume ocupado pela amostra, em mililitros.

### 3.11 Índices de desempenho do motor

Para os índices de desempenho foram calculados: índice de elasticidade, reserva de torque e reserva de rotação. No qual foram obtidos a partir dos valores medidos nos ensaios, as equações estão apresentadas logo a seguir. Esses parâmetros combinados são importantes nas tomadas de decisão dos trabalhos do campo, para que se possa tirar maior proveito da máquina que se tem disponível (IACONO, 2017).

Índice de elasticidade (IE).

$$IE = \left( \frac{T_{max}}{T_{pmax}} \right) - \left( \frac{RPM_{pmax}}{RPM_{tmax}} \right)$$

**Equação 3** – Equação para cálculo do índice de elasticidade (MIALHE, 1996).

Onde:

$T_{max}$  - Torque máximo observado (N m);

$T_{pmax}$  - Torque de potência máxima observada (N m);

$RPM_{pmax}$  - Rotação de potência máxima (RPM – Rotações por minuto);

$RPM_{tmax}$  - Rotação no torque máximo (RPM – Rotações por minuto);

Reserva de torque [%].

$$RT = \left( \frac{T_{max}}{T_{pmax}} - 1 \right) * 100$$

**Equação 4** – Equação para cálculo de reserva de torque (MIALHE, 1996).

Onde:

Tmax - Torque máximo observado (N m);

Tpmax - Torque de potência máxima observada (N m).

Reserva de rotação [%].

$$RR = \left( \frac{RPM_{pmax}}{RPM_{tmax}} - 1 \right) * 100$$

**Equação 5** – Equação para cálculo de reserva de rotação (MIALHE, 1996).

Onde:

RPMpmax - Rotação de potência máxima (RPM – Rotações por minuto);

RPMtmax - Rotação no torque máximo (RPM – Rotações por minuto).

### 3.12 Análise estatística

A análise estatística foi desenvolvida com um software livre, Sisvar, versão 5.6, criado pela Universidade Federal de Lavras – UFLA. Nos ensaios de desempenho de motor e análises físico-químicas, foi observada a análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey com 5 % de probabilidade de erro.

Para a realização dos cálculos estatísticos, foi montado um esquema fatorial com três fatores, sendo eles: (% de biodiesel, com 4 níveis, 0, 8, 15, 20%), (% de etanol, em dois níveis, 0 e 1%), e (temperatura do combustível, em três níveis, 45°C, 65°C e 85°C), totalizando 24 tratamentos para análise, no qual a análise de variância foi realizada a partir de um delineamento de parcelas subdivididas, devido dificuldade de aleatorização da temperatura do combustível. Os ensaios foram realizados na sequência crescente de adição de biodiesel, iniciando com misturas sem etanol e posteriormente misturas com etanol.

As variáveis analisadas foram: potência máxima (KW), torque máximo (N m), torque na potência máxima (N m), consumo específico de combustível (g KW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) e consumo horário de combustível (l h<sup>-1</sup>), ademais da reserva de torque (%), reserva de

rotação (%), índice de elasticidade do motor, poder calorífico ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ), viscosidade (cSt) e densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

Nas medições de gases poluentes do motor agrícola, foram consideradas as variáveis medidas gases de oxigênio ( $\text{O}_2$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e emissões de NOX ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ). Além desses elementos, também foi realizada a medição de temperatura dos gases de exaustão ( $^{\circ}\text{C}$ ) e eficiência da combustão (%), sendo essas medições feitas uma única vez ao final dos ensaios de desempenho para cada combustível e temperatura avaliados, sem repetição, no qual não havendo análise estatística dessas variáveis.

Para os ensaios físico-químicos, foram coletadas amostras de combustíveis do tanque utilizado nos ensaios, onde foram armazenadas em frascos de vidro, e levadas ao laboratório de biocombustíveis, local onde as análises do poder calorífico superior, viscosidade e densidade foram feitos, ambos em triplicata.

#### 4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os ensaios de desempenho foram executados em três dias diferentes, em função do tempo necessário para cada um dos testes. As variáveis climáticas, como temperatura ambiente e pressão atmosférica, que foram utilizadas para correção de potência, são apresentadas na Tabela 10.

**Tabela 10** – Variações climáticas durante os ensaios.

| Data       | Temperatura<br>(°C) |        | Variação<br>(°C) | Pressão<br>Atmosférica (mbar) |        | Variação<br>(mbar) |
|------------|---------------------|--------|------------------|-------------------------------|--------|--------------------|
|            | Mínima              | Máxima |                  | Mínima                        | Máxima |                    |
| 09/10/2017 | 19,7                | 20,6   | 0,9              | 928,6                         | 929,3  | 0,7                |
| 10/10/2017 | 25,6                | 28,1   | 2,5              | 928,9                         | 929,8  | 0,9                |
| 11/10/2017 | 28,9                | 31,2   | 2,3              | 928,6                         | 929,3  | 0,7                |

Os dados de temperatura de combustível estão separados conforme o período de cada ensaio, mistura e temperatura de injeção. A partir da média de cada ensaio foi realizado o teste de médias e os resultados são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11** – Valores das médias das temperaturas de injeção.

| Tratamento       | Média das temperaturas de injeção (°C) |
|------------------|--|
| 1 (45)           | 44,5 C                                 |
| 2 (65)           | 64,8 B                                 |
| 3 (85)           | 86,1 A                                 |
| <b>DMS: 0,31</b> | <b>CV: 0,70%</b>                       |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Em função da variação da temperatura ambiente e do sistema de controle para aquecimento do combustível, as temperaturas sofreram uma variação em seu valor, logo os valores de 45°C, 65°C e 85°C, apresentados em tabelas e gráficos a seguir, a título de nomenclatura. Os resultados do teste de médias, mostram que os valores da temperatura do combustível durante os ensaios foram significativamente diferentes entre si (Tabela 11).

## 4.1 Análises físico-químicas

Segundo Klajn (2016) e Mofijur et al. (2016), os parâmetros de massa específica, viscosidade e poder calorífico são as propriedades que mais influenciam no desempenho de um motor e em suas emissões gasosas. Com isso nesse trabalho realizou-se a análise desses parâmetros apresentados a seguir.

### 4.1.1 Densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ )

Os valores de densidade para as misturas ensaiadas nesse trabalho estão apresentados na Tabela 12 com os respectivos valores em  $\text{g cm}^{-3}$ . Para B0E0 o valor encontrado foi de  $0,8350 \text{ g cm}^{-3}$ , que está dentro do parâmetro contido na Resolução ANP nº 50/2013, cujo valor situa-se entre  $0,8150$  a  $0,8650 \text{ g cm}^{-3}$ , assim como todas as densidades das misturas se mantiveram dentro do parâmetro. As misturas foram comparadas entre si pelo teste de Tukey, em que a análise de variância mostrou significância ( $p < 0,05$ ) para interação dupla entre biodiesel e etanol.

**Tabela 12** – Valores médios de densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

| % Etanol | % Biodiesel |            |            |            |
|----------|-------------|------------|------------|------------|
|          | 0           | 8          | 15         | 20         |
| 0        | 0,8350 B c  | 0,8414 A b | 0,8444 A a | 0,8454 A a |
| 1        | 0,8398 A a  | 0,8366 B b | 0,8375 B b | 0,8378 B b |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O comportamento da densidade das misturas se manteve conforme o esperado, pois com o incremento de biodiesel ocorre o aumento da densidade, devido ao fato do biodiesel possuir uma densidade maior do que o diesel. No caso do incremento do etanol ocorreu uma diminuição da densidade, devido ao etanol possuir uma densidade menor do que o diesel (KWANCHAREON et al., 2007), conforme observado nas colunas, com exceção da mistura B0E1 que teve uma densidade maior do que a mistura B0E0, o que difere dos valores encontrados na literatura.

Analisando os resultados dos valores de densidade, é possível afirmar que estes foram próximos aos valores encontrado por Klajn (2016) em seu trabalho, pois conforme o aumento do biodiesel também ocorreu o aumento da densidade e com a

adição de etanol verificou-se uma diminuição da densidade, comparando os valores numericamente para as misturas B15E0 e B20E0 o autor encontrou uma diferença de 0,07% na densidade, diferença essa semelhante ao observada no presente trabalho, em que nas misturas B15E0 e B20E0 tiveram uma diferença de 0,11%.

#### 4.1.2 Viscosidade (cSt)

Verificou-se a viscosidade com diferentes temperaturas, posteriormente comparadas entre si pelo teste de Tukey, a análise de variância mostrou significância ( $p < 0,05$ ) para a interação tripla entre temperatura-biodiesel-etanol, apresentados os desdobramentos nas Tabelas 13, 14, 15 e na Figura 20, estando os dados na unidade  $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$  ou centistoke (cSt).

**Tabela 13** - Desdobramento da viscosidade de biodiesel dentro de cada nível de temperatura e etanol, medidas em centistoke (cSt).

| % Biodiesel      | Temperatura (°C)    |        |        |         |
|------------------|---------------------|--------|--------|---------|
|                  | ( <sup>1</sup> ) 40 | 45     | 65     | 85      |
| <b>0% Etanol</b> |                     |        |        |         |
| 0                | 2,39 D              | 2,01 C | 1,47 D | 1,08 C  |
| 8                | 2,43 C              | 2,15 B | 1,54 C | 1,17 B  |
| 15               | 2,47 B              | 2,18 B | 1,57 B | 1,19 B  |
| 20               | 2,53 A              | 2,20 A | 1,63 A | 1,22 A  |
| <b>1% Etanol</b> |                     |        |        |         |
| 0                | 2,29 A              | 2,09 A | 1,52 A | 1,18 A  |
| 8                | 2,19 D              | 2,04 B | 1,44 C | 1,10 C  |
| 15               | 2,22 C              | 2,04 B | 1,44 C | 1,15 B  |
| 20               | 2,25 B              | 2,11 A | 1,48 B | 1,18 AB |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Analisando o desdobramento da viscosidade de biodiesel dentro de cada nível de temperatura e etanol, para as misturas sem etanol, observa-se claramente o aumento da viscosidade, conforme o aumento da porção de biodiesel (nas colunas), para todas as temperaturas, fato do aumento da viscosidade, a medida em que houve

<sup>1</sup> Temperatura que é utilizada pela norma ASTM D 445, seguida pela ANP.

o aumento de biodiesel também indicado por Souza et al. (2009). Para as misturas com etanol, o aumento se manteve com exceção da mistura B0E1 em todas as faixas de temperatura que foi maior do que a mistura B8E1 (Tabela 13).

**Tabela 14** - Desdobramento da viscosidade de etanol dentro de cada nível de temperatura e biodiesel, medidas em centistoke (cSt).

| % Etanol                 | % Biodiesel |        |        |        |
|--------------------------|-------------|--------|--------|--------|
|                          | 0           | 8      | 15     | 20     |
| <b>Temperatura 40 °C</b> |             |        |        |        |
| 0                        | 2,39 A      | 2,43 A | 2,47 A | 2,53 A |
| 1                        | 2,29 B      | 2,19 B | 2,22 B | 2,25 B |
| <b>Temperatura 45 °C</b> |             |        |        |        |
| 0                        | 2,01 B      | 2,15 A | 2,18 A | 2,20 A |
| 1                        | 2,09 A      | 2,04 B | 2,04 B | 2,11 B |
| <b>Temperatura 65 °C</b> |             |        |        |        |
| 0                        | 1,47 B      | 1,54 A | 1,57 A | 1,63 A |
| 1                        | 1,52 A      | 1,44 B | 1,44 B | 1,48 B |
| <b>Temperatura 85 °C</b> |             |        |        |        |
| 0                        | 1,08 B      | 1,17 A | 1,19 A | 1,22 A |
| 1                        | 1,18 A      | 1,10 B | 1,15 B | 1,16 B |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Na Tabela 14 constata-se o desdobramento da viscosidade de etanol dentro de cada nível de temperatura e biodiesel, com a adição de etanol na mistura diminui-se a viscosidade isso acontece porque o etanol possui uma menor viscosidade, como observou Kwanchareon et al., (2007), porém a mistura B0E1 não teve o mesmo comportamento.

**Tabela 15** - Desdobramento da viscosidade de temperatura dentro de cada nível de biodiesel e etanol, medidas em centistoke (cSt).

| Temperatura<br>(°C) | % Biodiesel |        |        |        |
|---------------------|-------------|--------|--------|--------|
|                     | 0           | 8      | 15     | 20     |
| <b>0% Etanol</b>    |             |        |        |        |
| 40                  | 2,39 A      | 2,43 A | 2,47 A | 2,53 A |

| <b>Continuação.</b> |        |        |        |        |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| 45                  | 2,02 B | 2,15 B | 2,18 B | 2,20 B |
| 65                  | 1,47 C | 1,54 C | 1,57 C | 1,63 C |
| 85                  | 1,08 D | 1,17 D | 1,19 D | 1,22 D |
| <b>1% Etanol</b>    |        |        |        |        |
| 40                  | 2,29 A | 2,19 A | 2,22 A | 2,25 A |
| 45                  | 2,09 B | 2,04 B | 2,04 B | 2,11 B |
| 65                  | 1,52 C | 1,44 C | 1,44 C | 1,48 C |
| 85                  | 1,18 D | 1,10 D | 1,15 D | 1,16 D |

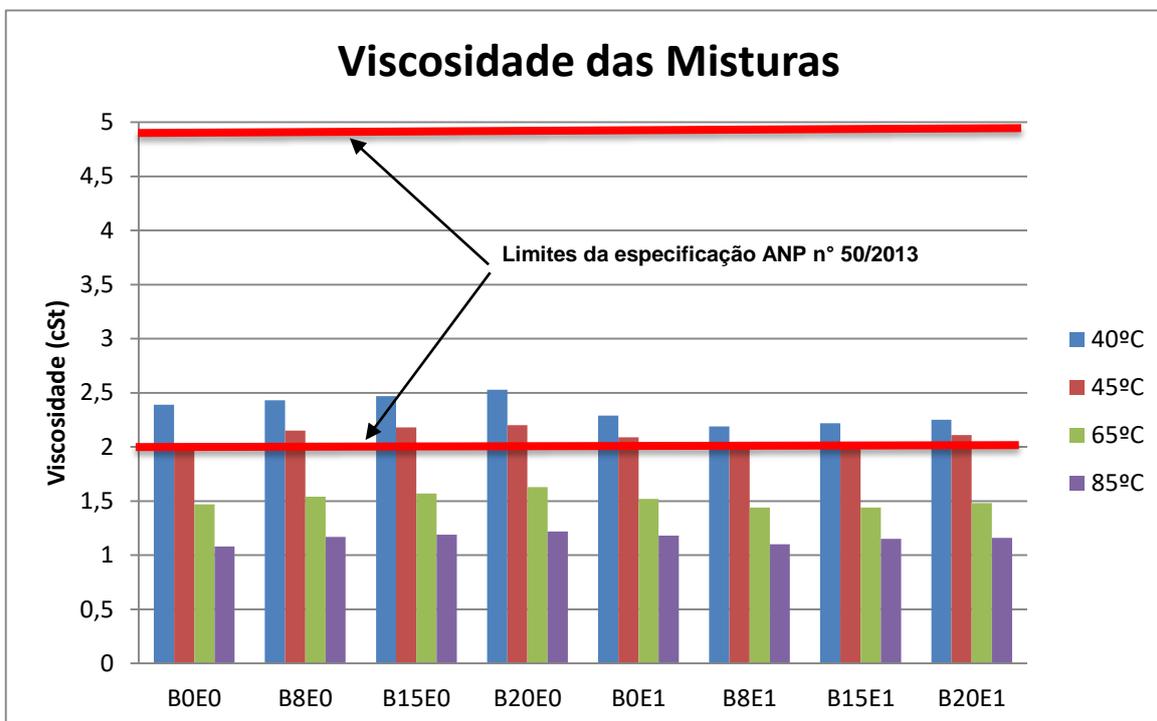
Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

No desdobramento da viscosidade de temperatura dentro de cada nível de biodiesel e etanol, apresentado na Tabela 15, observa-se o decréscimo da viscosidade com o aumento da temperatura. Para os valores de 65 e 85°C ficaram abaixo do especificado pela ANP conforme Figura 20. Visualiza-se os valores numericamente, para a mistura B0E0 a 40°C (2,39 cSt), para o valor da mesma mistura a 85°C (1,08 cSt), um decréscimo de 54,8% na viscosidade, para a mistura B20E0 essa diferença foi de 51,7%, esse decréscimo da viscosidade com o aumento da temperatura também foi observada por Gabriel (2014), que trabalhou com misturas de diesel e biodiesel de coco, o qual para a mistura B0, a diferença de viscosidade entre 40°C e 80°C foi de 45,5% e para a mistura B20 com biodiesel de coco, a diferença de viscosidade entre 40°C e 80°C foi de 43,6%.

Segundo Shahir et al. (2014) e Barabás et al. (2010), a viscosidade possui uma influência inversamente proporcional a temperatura e possui uma relação direta a densidade, podendo a viscosidade afetar a qualidade de atomização, tamanho da gota do combustível e qualidade de ignição.

Para os valores das temperaturas de 65 e 85°C todas as misturas ficaram abaixo do valor de viscosidade estabelecida pela Resolução nº 50/2013 da ANP para o diesel tipo "A", que é de 2,0 a 5,0 cSt. Segundo Shahir et al. (2014), no caso de viscosidades muito baixas, podem-se provocar vazamentos no sistema de combustível e formação de gotículas muito pequenas na atomização, o que pode influenciar diretamente no desempenho do motor. A viscosidade também faz parte da

vedação interna da bomba injetora, com a diminuição da viscosidade, pode haver perda de pressão.



**Figura 20** - Viscosidade das misturas ilustrando os limites máximos e mínimos estabelecidos pela ANP.

#### 4.1.3 Poder calorífico ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )

Os valores do poder calorífico inferior (PCI), são apresentados na Tabela 16, na qual a unidade de  $\text{MJ kg}^{-1}$ , os valores de PCI das misturas foram submetidos ao teste de Tukey, e a análise de variância se mostrou significância ( $p < 0,05$ ) para interação dupla entre biodiesel e etanol.

**Tabela 16** - Valores médios de PCI, dados em  $\text{MJ kg}^{-1}$ .

| % Etanol | % Biodiesel |          |          |          |
|----------|-------------|----------|----------|----------|
|          | 0           | 8        | 15       | 20       |
| 0        | 48,2 A a    | 44,3 A b | 42,5 B c | 42,1 B d |
| 1        | 44,2 B a    | 44,0 B b | 43,6 A c | 42,4 A d |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O PCI das misturas pode ser visualizado na Tabela 16, conforme foram ocorrendo acréscimos de biodiesel ao diesel (na linha), pode-se perceber uma diminuição no poder calorífico de, em função do biodiesel possuir um PCI menor em relação ao diesel, o que segundo Bunce et al. (2011) é 12% menor do que o do diesel puro, dados semelhantes foram encontrados por Hussan et al. (2013). Comparando os dados com a literatura, numericamente houve uma diferença de 12,6% entre B0E0 e B20E0, Klajn (2016) constatou uma diferença de 5,3%, o valor do PCI de B0 do autor foi de 43,422 MJ kg<sup>-1</sup>.

Para o incremento do etanol, as misturas B0E1 e B8E1 tiveram um decréscimo no valor do poder calorífico pelo fato do etanol ter o PCI em torno de 35% menor do que o diesel puro (RAHIMI et al., 2009), porém para as misturas B15E1 e B20E1 o mesmo teve um aumento no PCI, com a adição de etanol, ficando os valores abaixo do diesel tipo "A".

## **4.2 Desempenho do motor agrícola**

Para avaliação de desempenho do motor foram considerados alguns fatores, como: potência máxima, rotação na potência máxima, torque na potência máxima, torque máximo, rotação no torque máximo, consumo específico mínimo, consumo horário ótimo, índice de elasticidade, reserva de torque e reserva de rotação, todos em triplicata submetidos a teste de Tukey.

### **4.2.1 Desempenho do motor utilizando diesel puro**

Para efeitos de comparação foram realizados ensaios em triplicata com diesel puro tipo "A", ou seja, sem adição de biodiesel e etanol, descrito como B0E0, levando em consideração que o motor foi projetado para trabalhar com esse combustível, o propósito de verificação da condição comparando o mesmo como novo.

O fabricante informa como potência máxima o valor de 61 cv a 2000 rotações por minuto, já o valor encontrado foi de 55 cv a 2250 rotações por minuto, cerca de 9,8% a menos do que o mencionado pelo fabricante. Para o valor de torque o fabricante informa um valor de 228 Nm a 1300 rotações, já o valor encontrado foi de 209 Nm a 1230 rotações por minuto, 8,3% a menos do que o mencionado pelo fabricante.

Os valores encontrados para potência máxima e torque máximo foram abaixo do especificado pelo fabricante, porém deve-se levar em consideração que o trator tem um período de 29 anos de fabricação e 1076 horas de utilização. Estes fatores podem ter sido as causas das diferenças encontradas devido aos desgastes mecânicos, o que conseqüentemente ocasiona uma diminuição significativa em seu desempenho.

#### 4.2.2 Consumo de combustível (g KW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)

Segundo Mialhe (1996), o ponto de consumo específico, mostra o maior rendimento mecânico do motor, em que a maior quantidade de energia gerada pela combustão é transformada em trabalho mecânico, com menor consumo energético.

Os dados de consumo específico foram comparados entre si, a interação tripla entre temperatura, etanol e biodiesel, se mostraram significante ( $p < 0,05$ ), os desdobramentos estão apresentados nas Tabelas 17, 18 e 19, indicados também na Figura 21.

**Tabela 17** – Desdobramento dos valores de consumo específico (g KW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) de biodiesel dentro de cada nível de temperatura e etanol.

| % Biodiesel      | Temperatura (°C) |          |         |
|------------------|------------------|----------|---------|
|                  | 45               | 65       | 85      |
| <b>0% Etanol</b> |                  |          |         |
| 0                | 232,9 A          | 232,1 A  | 225,8 A |
| 8                | 233,6 A          | 232,9 A  | 225,2 A |
| 15               | 241,0 A          | 229,3 A  | 229,6 A |
| 20               | 241,6 A          | 233,7 A  | 221,3 A |
| <b>1% Etanol</b> |                  |          |         |
| 0                | 225,9 A          | 230,1 AB | 219,3 A |
| 8                | 234,0 A          | 226,9 B  | 227,0 A |
| 15               | 228,6 A          | 231,3 AB | 227,8 A |
| 20               | 229,1 A          | 241,8 A  | 224,9 A |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Examinando o desdobramento dos valores de consumo específico de biodiesel dentro de cada nível de temperatura e etanol, Tabela 17, nota-se que não houve diferença estatística, exceto nas misturas a 65°C com 1% de etanol, na qual a mistura B8E1 teve o menor valor em relação a B15E1 e B20E1, o que pode ser justificado pelo poder calorífico maior da mistura, sinalizado anteriormente na Tabela 16.

Para as misturas a 45°C sem etanol verifica-se uma, que conforme o aumento de biodiesel também ocorre o aumento do consumo específico, isso ocorre devido ao valor do poder calorífico diminuir conforme o aumento de biodiesel, fato também observado por Shahir et al. (2015) e Yasin et al. (2014).

**Tabela 18** - Desdobramento dos valores de consumo específico ( $\text{g KW}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) de etanol dentro de cada nível de biodiesel e temperatura.

| % Etanol                 | % Biodiesel |         |         |         |
|--------------------------|-------------|---------|---------|---------|
|                          | 0           | 8       | 15      | 20      |
| <b>Temperatura 45 °C</b> |             |         |         |         |
| 0                        | 232,9 A     | 233,6 A | 241,6 A | 241,0 A |
| 1                        | 225,9 A     | 234,0 A | 228,6 B | 229,1 B |
| <b>Temperatura 65 °C</b> |             |         |         |         |
| 0                        | 230,1 A     | 232,9 A | 229,3 A | 233,7 A |
| 1                        | 232,2 A     | 226,9 A | 234,3 A | 241,8 A |
| <b>Temperatura 85 °C</b> |             |         |         |         |
| 0                        | 225,8 A     | 225,2 A | 229,6 A | 221,3 A |
| 1                        | 219,3 A     | 227,0 A | 227,8 A | 224,9 A |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Analisando o desdobramento dos valores de consumo específico de etanol dentro de cada nível de biodiesel e temperatura, Tabela 18, estatisticamente o que diferenciou foram as misturas B15E1 e B20E1 a 45°C, que tiveram um menor consumo específico em relação às mesmas proporções de biodiesel sem etanol, logo observa-se um valor de PCI diferente nas misturas B15E1 e B20E1 em relação as misturas B15E0 e B20E0 (Tabela 16).

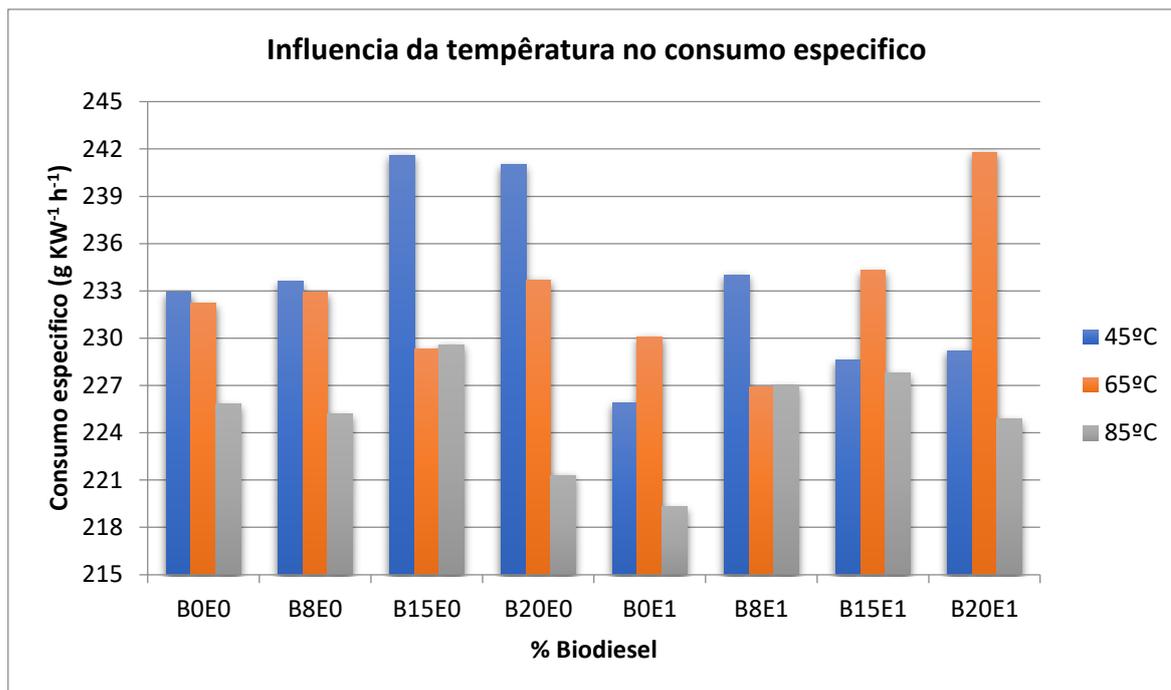
**Tabela 19** - Desdobramento dos valores de consumo específico ( $\text{g KW}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) de temperatura dentro de cada nível de biodiesel e etanol.

| Temperatura<br>(°C) | % Biodiesel |         |         |         |
|---------------------|-------------|---------|---------|---------|
|                     | 0           | 8       | 15      | 20      |
| <b>0% Etanol</b>    |             |         |         |         |
| 45                  | 232,9 A     | 233,6 A | 241,6 A | 241,0 A |
| 65                  | 232,2 A     | 232,9 A | 229,3 B | 233,7 A |
| 85                  | 225,8 A     | 225,2 A | 229,6 B | 221,3 B |
| <b>1% Etanol</b>    |             |         |         |         |
| 45                  | 225,9 A     | 234,0 A | 228,6 A | 229,2 B |
| 65                  | 230,1 A     | 226,9 A | 234,3 A | 241,8 A |
| 85                  | 219,3 A     | 227,0 A | 227,8 A | 224,9 B |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Na Tabela 19 visualiza-se o desdobramento dos valores de consumo específico de temperatura dentro de cada nível de biodiesel e etanol. O consumo específico de combustível, teve um decréscimo dos valores com o aumento da temperatura, fato também observado por Machado (2008), que constatou que com o aumento da temperatura dos biocombustíveis há uma diminuição da viscosidade e densidade, porém também uma diminuição do consumo específico, o autor relata que com a diminuição da viscosidade do combustível ocorreu perdas internas na bomba injetora, fazendo com que chegasse menos combustível a câmara de combustão.

Na Figura 21 para o incremento de biodiesel, nas misturas sem etanol a 45°C nota-se um aumento no consumo específico, e para o aumento da temperatura observa-se uma redução do consumo específico, fato que está diretamente relacionado a alteração da viscosidade. Segundo Shahir et al. (2014), para viscosidade de combustível muito baixa, pode ocorrer vazamentos internos no sistema de injeção, pelo fato dessa propriedade do combustível também ter com função a lubrificação interna do sistema de injeção.



**Figura 21** – Influência da temperatura nas misturas de biodiesel e biodiesel etanol para os valores de consumo específico mínimo.

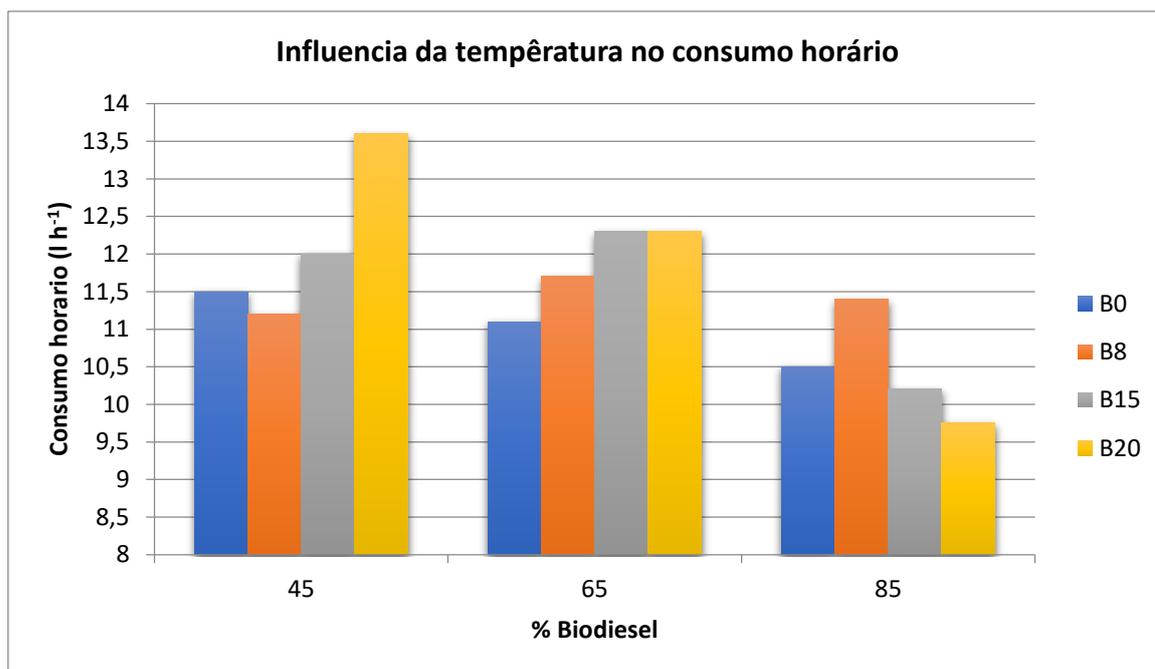
Os dados de consumo horário foram comparados entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, no qual a análise de variância mostrou significância ( $p < 0,05$ ) para a interação dupla entre temperatura e biodiesel, resultando nos desdobramentos apresentados na Tabela 20 e ilustrados na Figura 22.

**Tabela 20** - Influência da interação entre temperatura e biodiesel no consumo horário de combustível (l h<sup>-1</sup>).

| Temperatura<br>(°C) | % Biodiesel |          |           |          |
|---------------------|-------------|----------|-----------|----------|
|                     | 0           | 8        | 15        | 20       |
| 45                  | 11,5 A a    | 11,2 A a | 12,0 A ab | 13,6 A b |
| 65                  | 11,1 A a    | 11,7 A a | 12,3 A a  | 12,3 A a |
| 85                  | 10,5 A a    | 11,4 A a | 10,2 B a  | 9,75 B a |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Em função do consumo específico, o consumo horário, também aumentou mediante o aumento das porcentagens de biodiesel, observado nas linhas, e conforme o aumento da temperatura houve uma diminuição do consumo horário, observado nas colunas.



**Figura 22** - Influência da temperatura nas misturas para os valores de consumo horário.

Observando a Figura 22 tem-se um aumento do consumo horário em função do aumento da quantidade de biodiesel, para as temperaturas a 45°C e 65°C, também se verifica o decréscimo do consumo horário em função do aumento de temperatura, para as misturas B0 e B20.

#### 4.2.3 Torque máximo (N m)

Os dados de torque máximo foram comparados entre si pelo teste de Tukey, no qual a análise de variância mostrou significância ( $p < 0,05$ ) para as interações duplas entre biodiesel e etanol, temperatura e etanol, biodiesel e temperatura, descrito nas Tabelas 21, 22 e 23, respectivamente, também apresentado na Figura 23.

**Tabela 21** - Influência da interação entre etanol e biodiesel no torque máximo (N m).

| % Etanol | % Biodiesel |            |           |            |
|----------|-------------|------------|-----------|------------|
|          | 0           | 8          | 15        | 20         |
| 0        | 205,4 A a   | 205,1 A ab | 204,0 A b | 204,8 A ab |
| 1        | 204,2 B a   | 203,2 B a  | 203,3 A a | 204,3 A a  |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Conforme dados da Tabela 21 o desdobramento do etanol e biodiesel para o torque máximo, é possível reparar que o maior valor de torque é da mistura sem etanol B0E0 (205,4 N m). Houve uma diminuição do torque para as misturas B0E1 e B8E1, devido a adição de etanol, sendo o PCI do etanol menor em relação ao diesel.

**Tabela 22** - Influência da interação entre etanol e temperatura no torque máximo (N m).

| % Etanol | Temperaturas (°C) |           |           |
|----------|-------------------|-----------|-----------|
|          | 45                | 65        | 85        |
| 0        | 208,2 A a         | 203,8 A b | 202,5 A c |
| 1        | 208,7 A a         | 202,7 B b | 200,0 B c |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

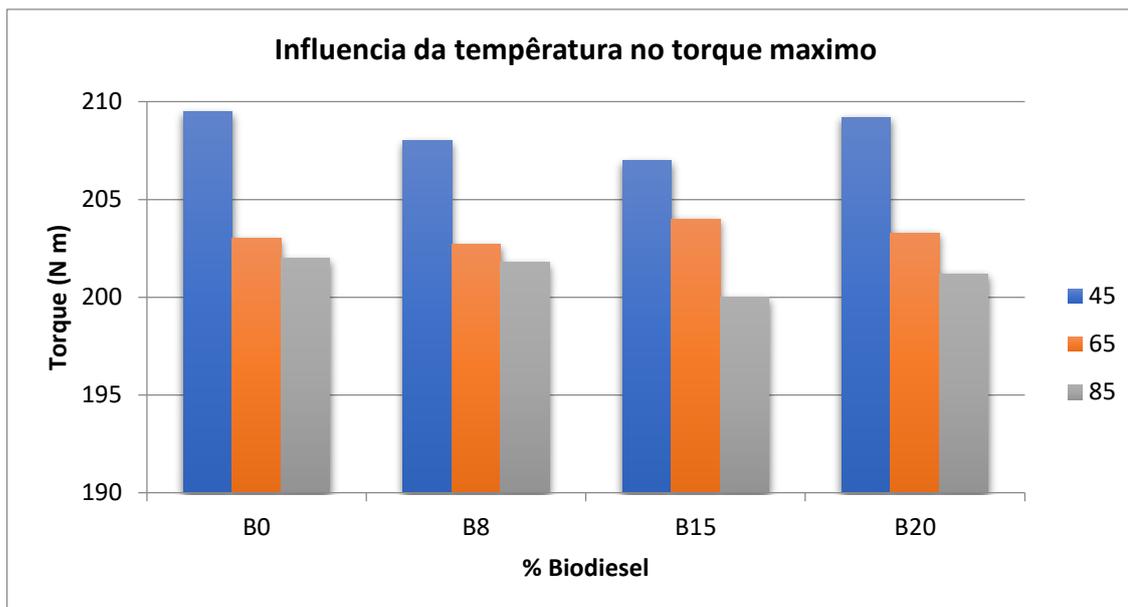
Analisando o desdobramento do etanol e temperatura, apresentado na Tabela 22, percebe-se que com o aumento da temperatura houve um decréscimo no valor do torque (linhas). Com a adição de etanol, nas temperaturas de 65°C e 85°C, houve um decréscimo no valor de torque máximo, sendo o menor valor para as misturas com etanol, entretanto para a temperatura a 45°C, o maior valor de torque foi para a mistura com etanol.

**Tabela 23** - Influência da interação entre temperatura e biodiesel no torque máximo (N m).

| Temperatura (°C) | % Biodiesel |            |           |            |
|------------------|-------------|------------|-----------|------------|
|                  | 0           | 8          | 15        | 20         |
| 45               | 209,5 A a   | 208,0 A bc | 207,0 A c | 209,2 A ab |
| 65               | 203,0 B a   | 202,7 B a  | 204,0 B a | 203,3 B a  |
| 85               | 202,0 B a   | 201,8 B a  | 200,0 C b | 201,2 C ab |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Observando a Tabela 23 no desdobramento da temperatura e biodiesel, o maior valor foi de B0 a 45°C, analisando as misturas a 45°C e a 85°C de B0 para B15 houve um decréscimo no valor de torque, porém B20 foi maior que B15, para os valores de 65°C de B0 para B8 também houve um decréscimo no valor, porém B15 foi maior que B8, B20 e B0.



**Figura 23** - Influência da temperatura nas misturas para os valores de torque na potência máxima.

De uma forma geral pode-se observar na Figura 23, que em todas as misturas houve diminuição do torque em função do aumento da temperatura e, essa mesma tendência foi observada por Machado (2008). O autor trabalhou com o aquecimento combinado com misturas 50% de biodiesel de girassol e 50% de biodiesel de sebo bovino ao diesel, nas temperaturas ambiente, 55°C e 75°C, cujo resultados mostraram decréscimo de consumo específico, pois com menor quantidade de energia disponível pela mistura de combustível, menor será o torque desenvolvido.

**Tabela 24** – Influência da interação entre etanol e temperatura na rotação de torque máximo (rpm).

| % Etanol | Temperatura (°C) |           |          |
|----------|------------------|-----------|----------|
|          | 45               | 65        | 85       |
| 0        | 1246 A a         | 1212 A a  | 1066 B b |
| 1        | 1233 A a         | 1179 A ab | 1150 A b |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Para os valores de rotação no torque máximo, houve influência significativa ( $p < 0,05$ ) para a interação entre etanol e temperatura, apresentado na Tabela 24, para um aumento de temperatura houve um decréscimo na rotação, e para a adição de etanol, nas temperaturas de 45°C e 65°C também houve um decréscimo na rotação, porém na temperatura a 85°C houve uma diferença significativa para a adição de

etanol houve uma aumento de rotação em relação a mistura sem etanol, onde a diferença foi de 84 rpm.

#### 4.2.4 Potência máxima (KW)

Os dados de potência foram comparados entre si pelo teste de Tukey, porém interações entre temperatura, etanol e biodiesel não mostraram significância ( $p < 0,05$ ), apenas houve interação simples onde o fator temperatura se mostrou influente, descrito na Tabela 25, e houve uma interação dupla entre etanol e biodiesel, apresentado na Tabela 26.

**Tabela 25** – Influência da temperatura do combustível na potência máxima (KW).

| Temperatura (°C) | Potência Máxima (KW) |
|------------------|----------------------|
| 45               | 55,3 A               |
| 65               | 54,2 B               |
| 85               | 53,5 B               |
| <b>DMS: 1,00</b> | <b>CV: 2,09%</b>     |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Analisando a influência da temperatura na potência máxima, observa-se um decréscimo nos valores de potência máxima em função do aumento da temperatura (Tabela 25). Uma possível explicação desse fato considera o decréscimo do torque em função da temperatura do combustível (Figura 23), também pode ser levado em consideração o consumo específico de combustível que também apresentou uma tendência de decréscimo em função do aumento da temperatura (Figura 21).

**Tabela 26** - Influência da interação entre etanol e biodiesel na potência máxima (KW).

| % Etanol | % Biodiesel |          |           |          |
|----------|-------------|----------|-----------|----------|
|          | 0           | 8        | 15        | 20       |
| 0        | 54,4 A a    | 54,6 A a | 54,0 A a  | 54,4 A a |
| 1        | 54,7 A a    | 53,6 B b | 54,2 A ab | 54,7 A a |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Para a interação dupla entre etanol e biodiesel nos valores de potência máxima, estatisticamente a mistura que se diferenciou do restante foi B8E1 tendo seu menor valor em comparação a todas as misturas apresentado na Tabela 26.

Os dados de torque de potência máxima foram comparados entre si pelo teste de Tukey, no qual a análise de variância mostrou significância ( $p < 0,05$ ) para a interação simples, em que o fator etanol se mostrou influente, visualizado na Tabela 27, e ainda houve uma interação dupla entre temperatura e biodiesel, apresentado na Tabela 28.

**Tabela 27** – Influência do etanol no torque de potência máxima (N m).

| % Etanol         | Medida dos valores |
|------------------|--------------------|
| 0                | 161,5 A            |
| 1                | 159,3 B            |
| <b>DMS: 1,45</b> | <b>CV: 1,61%</b>   |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Para os valores de torque de potência máxima, apresentou-se uma influência do etanol no parâmetro, onde estatisticamente as misturas sem etanol tiveram maior torque, 1,3% a mais em relação as misturas com etanol (Tabela 27).

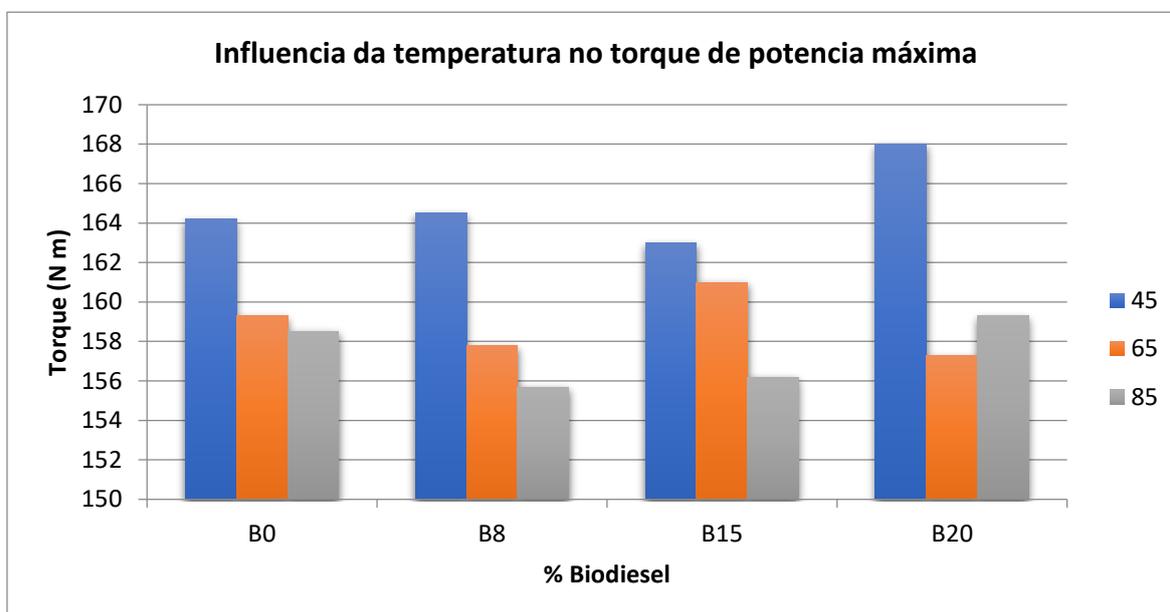
**Tabela 28** - Influência da interação entre temperatura e biodiesel no torque de potência máxima (N m).

| Temperatura<br>(°C) | % Biodiesel |            |           |           |
|---------------------|-------------|------------|-----------|-----------|
|                     | 0           | 8          | 15        | 20        |
| 45                  | 164,2 A ab  | 164,5 A ab | 163,0 A b | 168,0 A a |
| 65                  | 159,3 B a   | 157,8 B a  | 161,0 A a | 157,3 B a |
| 85                  | 158,5 B a   | 155,7 B a  | 156,2 B a | 159,3 B a |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Para a interação da temperatura e biodiesel, nos valores de torque de potência máxima apresentado na Tabela 28, para o incremento de biodiesel apresentado na linha, para os valores a 45°C estatisticamente a mistura B20 se mostrou maior em relação as demais misturas, sendo essa 2,2% maior que B0, para os valores de 65°C, estatisticamente os valores foram todos iguais, porém numericamente o maior valor

foi de B15 (156,2 N m), para os valores de 85°C, os valores também foram todos iguais estatisticamente, porém numericamente o maior valor foi de B20.



**Figura 24** – Influência da temperatura nas misturas para os valores de toque na potência máxima.

Na Figura 24 apresenta a influência da temperatura nos valores de torque de potência máxima, onde observa-se um decremento dos valores de torque de potência máxima, com o aumento da temperatura, para as misturas B0, B8 e B15.

Para os valores de rotação de potência máxima análise de variância mostrou significância ( $p < 0,05$ ) para a interação simples onde o fator etanol se mostrou influente, (Tabela 29), no qual o maior valor foi para as misturas com etanol sendo esse 1,1% maior do que as misturas sem etanol.

**Tabela 29** - Influência do etanol na rotação de potência máxima (rpm).

| % Etanol         | Potência Máxima  |
|------------------|------------------|
| 0                | 2187 B           |
| 1                | 2212 A           |
| <b>DMS: 24,9</b> | <b>CV: 2,66%</b> |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

#### 4.2.5 Índices de desempenho

Os índices de desempenho avaliados nesse trabalho foram: índice de elasticidade, reserva de torque e reserva de rotação, nos quais os valores são obtidos a partir dos valores dos parâmetros de desempenho e são apresentados a seguir.

Para os valores de índice de elasticidade o fator simples temperatura se mostrou significativo ( $p < 0,05$ ), (Tabela 30).

**Tabela 30** – Influência da temperatura do combustível nos valores médios de índice de elasticidade.

| Temperatura (°C) | Índice de Elasticidade |
|------------------|------------------------|
| 45               | 2,25 C                 |
| 65               | 2,37 B                 |
| 85               | 2,54 A                 |
| <b>DMS: 0,10</b> | <b>CV: 5,07%</b>       |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Com o aumento da temperatura ocorreu também um aumento no valor de índice de elasticidade, sendo o valor a 85°C 11,4% maior que o valor a 45°C, uma possível explicação para o fenômeno, está na equação 3 apresentada nesse trabalho, em que se considera os quatro fatores de desempenho. Os valores de torque máximo, torque de potência máxima e rotação de torque máximo diminuíram com o aumento da temperatura, porém o valor de rotação na potência máxima não sofreu influência da temperatura.

Para os valores de reserva de torque, nenhum dos fatores se mostraram significativo ( $p < 0,05$ ), logo os fatores individuais foram descritos nas tabelas 31,32 e 33.

**Tabela 31** – Influência do biodiesel nos valores médios de reserva de torque (%).

| % Biodiesel      | Reserva de Torque |
|------------------|-------------------|
| 0                | 27,5 A            |
| 8                | 28,2 A            |
| 15               | 27,3 A            |
| 20               | 26,7 A            |
| <b>DMS: 2,15</b> | <b>CV: 8,51%</b>  |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O fator biodiesel não apresentou influência na reserva de torque, contudo numericamente o maior valor foi B8, e o menor valor foi B20, sendo B8 5,3% maior que B20, apresentado na Tabela 31.

**Tabela 32** - Influência do etanol nos valores médios de reserva de torque (%).

| <b>% Etanol</b>  | <b>Reserva de Torque</b> |
|------------------|--------------------------|
| 0                | 26,9 A                   |
| 1                | 27,9 A                   |
| <b>DMS: 1,14</b> | <b>CV: 8,51%</b>         |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O fator etanol também não apresentou influência na reserva de torque, porém numericamente o maior foram parar as misturas com etanol, sendo esta 3,6% maior que as misturas sem etanol, apresentado na Tabela 32.

**Tabela 33** - Influência da temperatura nos valores médios de reserva de torque (%).

| <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Reserva de Torque</b> |
|-------------------------|--------------------------|
| 45                      | 26,5 A                   |
| 65                      | 27,9 A                   |
| 85                      | 27,8 A                   |
| <b>DMS: 2,06</b>        | <b>CV: 8,51%</b>         |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O fator temperatura também não apresentou influência significativa na reserva de torque, todavia numericamente o maior valor foi a 65°C, e o menor valor foi a 45°C, apresentado na Tabela 33.

Segundo Mialhe (1996), a reserva de torque também conhecida como a capacitação de sustentação de conjugado, pode ser classificada como boa, regular ou ruim, em que o valor da reserva de torque acima de 15% é considerado boa, entre 10 e 15% regular e abaixo de 10% ruim.

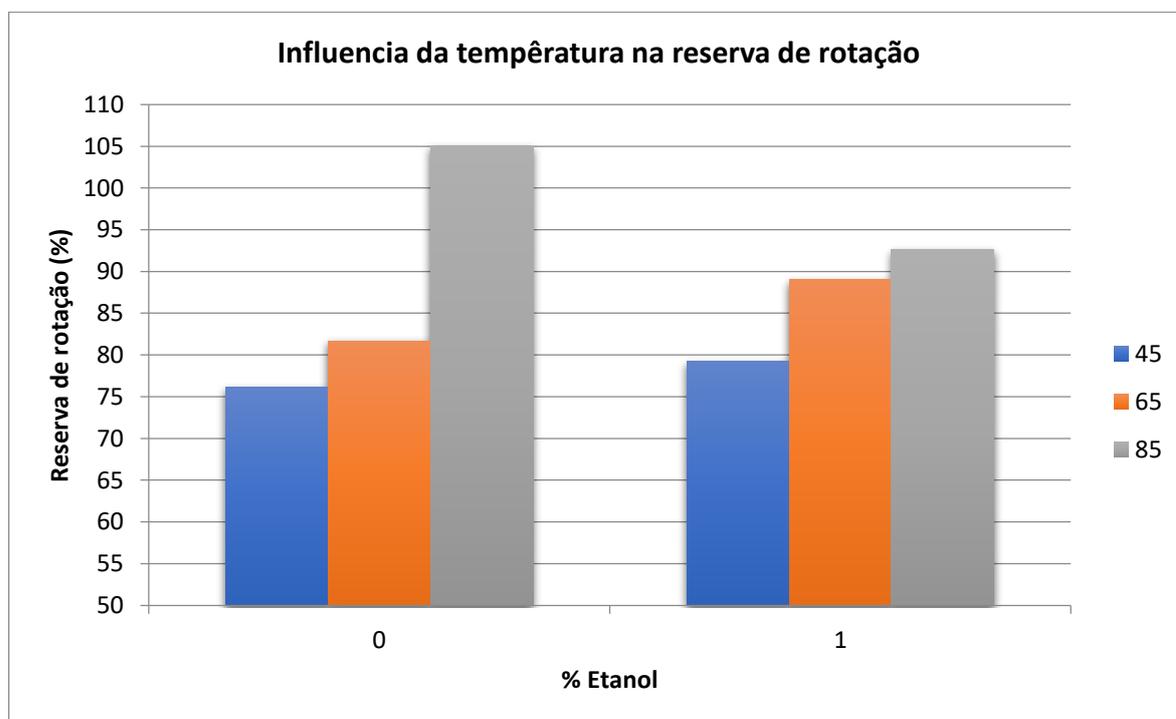
Para os valores de reserva de rotação a interação entre temperatura e etanol se mostrou significativa ( $p < 0,05$ ), (Tabela 34).

**Tabela 34** - Influência da interação do etanol e temperatura nos valores médios de reserva de rotação (%).

| % Etanol | Temperatura (°C) |           |          |
|----------|------------------|-----------|----------|
|          | 45               | 65        | 85       |
| 0        | 76,1 A b         | 81,7 A b  | 105 A a  |
| 1        | 79,2 A b         | 89,0 A ab | 92,6 B a |

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Analisado a Tabela 34 pode-se observar que o maior valor de reserva de rotação foi a temperatura de 85°C, para a mistura sem etanol (coluna). As misturas com e sem etanol a 45 e 65°C foram menores comparadas as misturas a 85°C (linha).



**Figura 25** - Influência da temperatura nas misturas para os valores reserva de rotação.

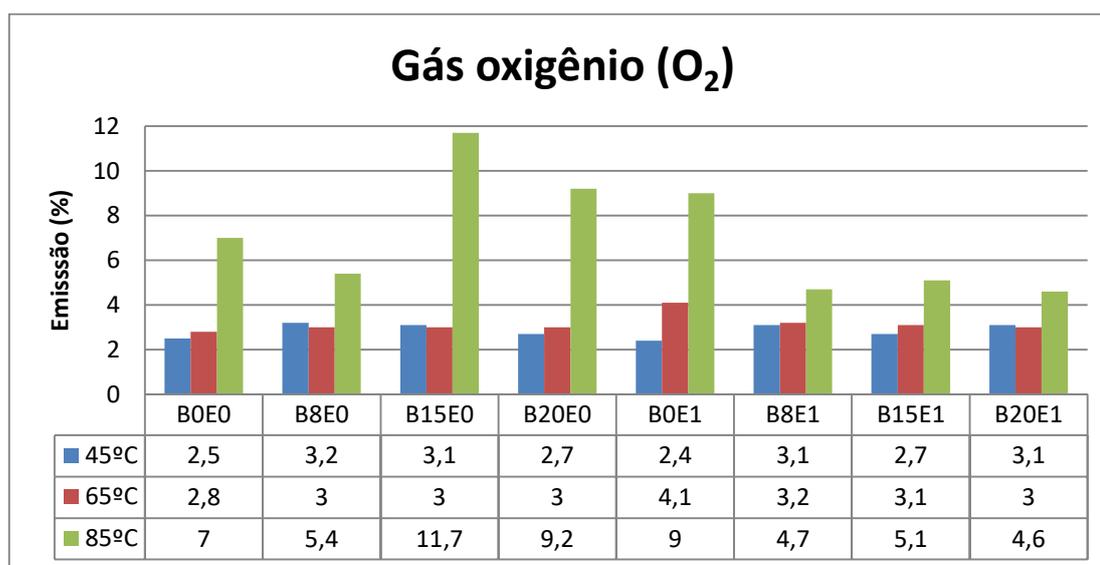
Na Figura 25, percebe-se um aumento da reserva de rotação em função do aumento da temperatura, tanto para as misturas sem etanol e com etanol. Para o cálculo da reserva de rotação levou-se em consideração rotação de potência máxima e rotação de torque máximo, de acordo com a equação 4, na qual os valores de rotação e torque máximo sofreram influência da temperatura.

### 4.3 Emissões

Para melhor compreensão do processo de combustão que ocorreu nos ensaios foi feita a medição dos gases de exaustão, realizada apenas no ponto de potência máxima, na qual foram medidos os gases de oxigênio ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e emissões de  $NO_x$  ( $NO + NO_2$ ). Também foi realizada a medição de temperatura dos gases de exaustão ( $^{\circ}C$ ) e eficiência da combustão (%), conforme apresentações nas figuras a seguir.

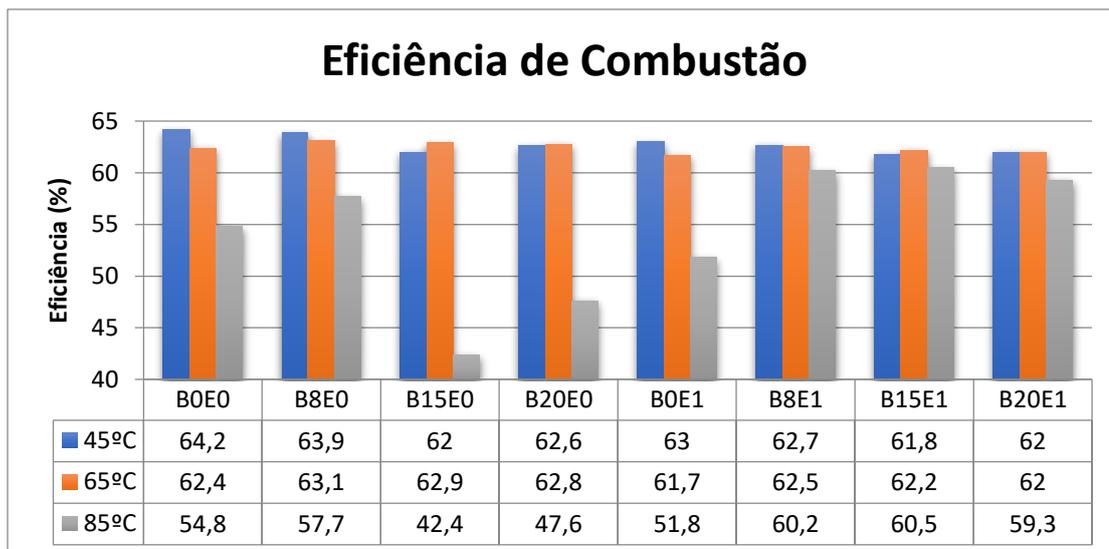
#### 4.3.1 Gás oxigênio ( $O_2$ %vol.)

São apresentados os valores medidos de  $O_2$ , para cada mistura em função das temperaturas de ensaio, na Figura 26.



**Figura 26** - Variação de emissão de gás  $O_2$  na combustão das misturas.

De maneira geral ocorreu um aumento dos valores de  $O_2$  conforme o aumento da temperatura do combustível, isso complementa o entendimento relacionado ao desempenho do motor. Para o consumo específico houve decréscimo em função do aumento da temperatura do combustível, e um baixo desempenho do motor para as mesmas temperaturas, como consequência houve o aumento de  $O_2$ , ou seja houve uma falta de combustível para combustão, sobrando oxigênio verificado também pela medição da eficiência de combustão apresentado na Figura 27.

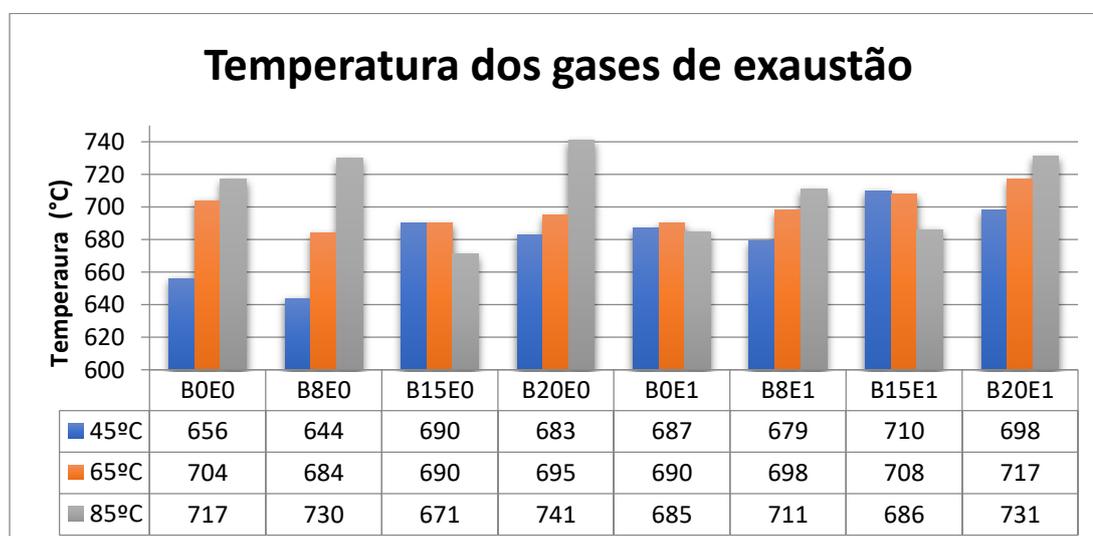


**Figura 27** - Eficiência de combustão das misturas.

Ocorreu uma queda de eficiência, conforme o aumento da temperatura do combustível, esta apresentada na Figura 27. Isso ocorreu pelo fato de ter faltado combustível no processo de combustão, apresentado com consumo específico nesse trabalho, também pode ser relacionado com outros fatos que ocorreram, como por exemplo, decréscimo do desempenho, valores de torque e potência.

#### 4.3.2 Temperatura dos gases de exaustão (°C)

Na Figura 28 são apresentados os valores medidos de temperatura dos gases de exaustão, para cada mistura em função das temperaturas do combustível de ensaio.

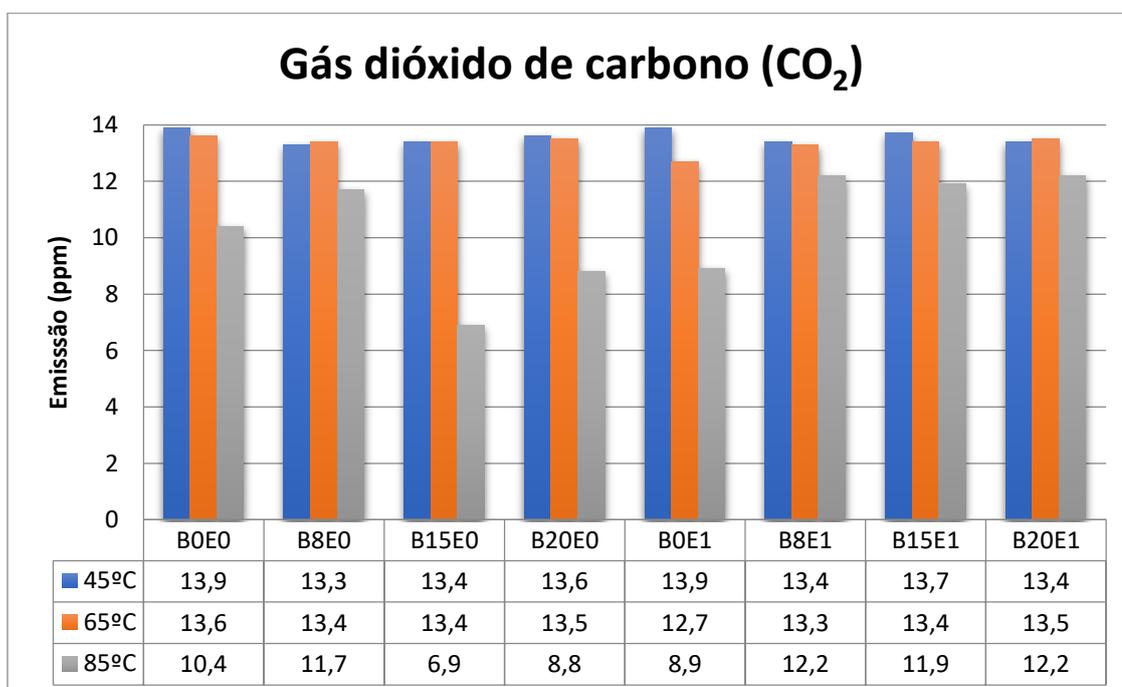


**Figura 28** - Temperaturas de combustão das misturas.

Para o aumento da temperatura do combustível, também houve um aumento na temperatura dos gases de escape resultante da combustão, uma possível explicação para o fato, no qual o combustível foi inserido muito tardiamente na câmara de combustão, Machado (2008) relata que em função do combustível ser injetado tardiamente o aproveitamento energético do combustível, na câmara de combustão também diminui, fato observado no decréscimo dos valores de torque nesse trabalho.

#### 4.3.3 Gás dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> %vol.)

Os valores medidos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), para cada mistura em função das temperaturas de ensaio, são apresentados na Figura 29.

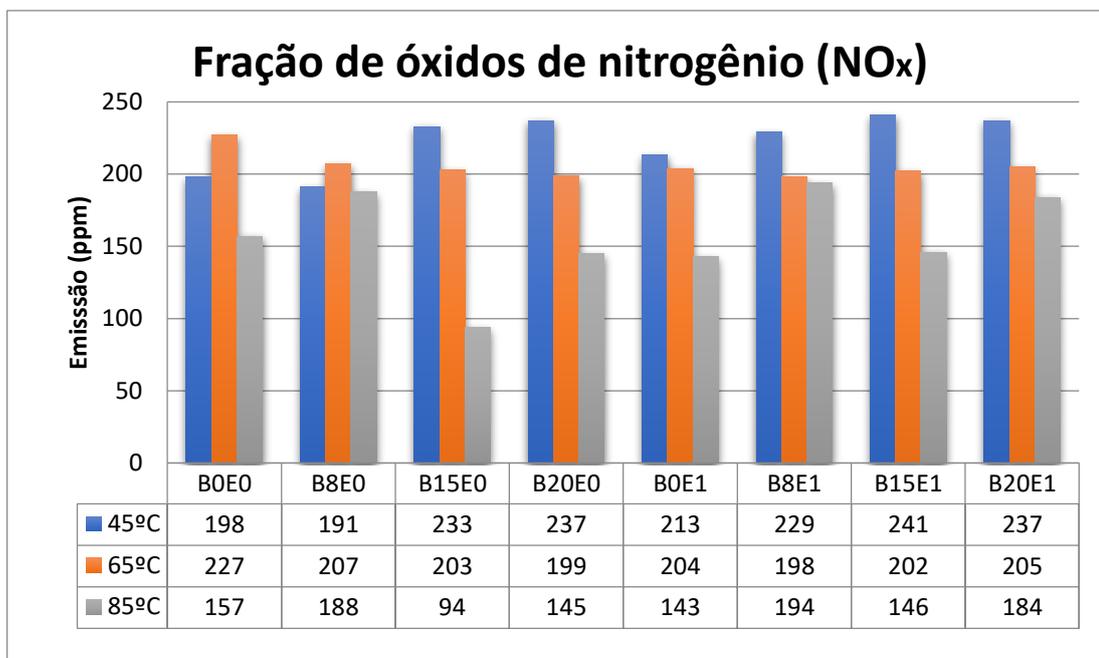


**Figura 29** - Variação de emissão de gás dióxido de carbono CO<sub>2</sub> na combustão das misturas.

Para os valores de CO<sub>2</sub>, nas temperaturas de 45°C e 85°C, se mantiveram em uma característica estável, porém para o valor de 85°C, os valores de CO<sub>2</sub> diminuíram. Segundo Capana (2008), durante o processo de combustão do óleo diesel, o produto de uma combustão completa é o CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, para uma combustão incompleta os valores de CO e material particulado (MP) aumentam, foi o que possivelmente ocorreu no presente trabalho, os valores de CO<sub>2</sub> diminuíram, pois possivelmente os valores de CO e MP aumentaram, em função do decréscimo da eficiência de combustão, no entanto não foi possível realizar a medição dos valores de CO e MP.

#### 4.3.4 Fração de óxidos de nitrogênio (NOx ppm)

Na Figura 30 são apresentados os valores medidos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), para cada mistura em função das temperaturas de ensaio.



**Figura 30** - Variação de emissão de NO<sub>x</sub> na combustão das misturas.

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Para os valores de NO<sub>x</sub>, em função da temperatura, com exceção das misturas B0E0 e B8E0, o restante das misturas seguiram uma tendência de decréscimo do valor de NO<sub>x</sub> em função do aumento da temperatura. Para a temperatura de 45°C, os valores de NO<sub>x</sub> aumentaram em função do aumento da porcentagem de biodiesel, também observado por Shahir et al, (2015), para a temperatura de 65°C o NO<sub>x</sub> se manteve instável, já para a temperatura de 85°C, os valores de NO<sub>x</sub> tiveram uma tendência a diminuir.

## 5. CONCLUSÃO

Foi possível observar que a temperatura de alimentação do combustível, influenciou no desempenho de motor agrícola. Com o aumento da temperatura, o consumo horário, consumo específico, torque máximo e potência máxima reduziram, nas misturas B15E0 e B20E0, porém os valores de índice de elasticidade e reserva de rotação, tiveram um acréscimo, conforme o aumento da temperatura do combustível, onde a utilização de biocombustíveis aquecidos pode ser útil dependendo da operação agrícola.

Com o incremento de biodiesel nas misturas os valores de consumo horário aumentaram. Os valores de torque máximo tiveram um decréscimo e os valores de potência máxima e reserva de torque se mantiveram.

Para as misturas com etanol, os valores de consumo específico tiveram um decréscimo para as misturas B15E1 e B20E1, e os valores de torque máximo e potência máxima se mantiveram, em comparação com as misturas sem etanol, logo as misturas com 15 e 20% de biodiesel possuem um melhor desempenho quando adicionado etanol.

As emissões de  $O_2$ , tiveram um acréscimo, conforme o aumento da temperatura, já os valores de  $CO_2$  e  $NO_x$ , tiveram um decréscimo.

## 6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para pesquisas futuras, é interessante ressaltar a importância da viscosidade do combustível, no desempenho de um motor agrícola, como a influência na atomização, também no funcionamento do sistema de injeção. Logo, é interessante a investigação de misturas com maiores quantidades de biodiesel, que possuam maior viscosidade, ou até mesmo com óleo bruto de sementes de culturas energéticas. Também é importante investigar diferentes temperaturas, com intuito de verificar se o combustível permanecerá com as propriedades e limites próximos ao estipulado pela ANP.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES FILHO, Henrique José Ribeiro; NOGUEIRA, Danilo Borges. **SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA BANCADA DE ENSAIOS DINAMOMÉTRICOS DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA**. 2015. 142 f. Curso de Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. 2015.
- ARAÚJO, K.M; OLIVEIRA, A.K.C; COSTA, G.B; QUEIROGA, R. N. G. e PANNIR SELVAM, P.V. **Estudo comparativo técnico e econômico de diferentes óleos vegetais brasileiros para produção de biocombustível**. 2002. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2002.
- AYALA, German Raul Chumpitaz. **Estudo da atomização e caracterização de injetores utilizando óleo político de pneu usado puro e em misturas com diesel**. 2016. 220 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Instituto de Engenharia Mecânica Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- AZEVEDO, Edmundo J. S. Gomes de. **Termodinâmica Aplicada**. 3. ed. Lisboa: Escolar Editora, 2011. 891 p.
- BARABAS, I., et al. **Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol blends**. Fuel. Vol. 89, p. 3827-3832. 2010.
- BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 461 p.
- BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. Edgard Blucher, 2005.
- BUNCE, M. et al. **Optimization of soy-biodiesel combustion in a modern diesel engine**. Fuel, v. 90, n. 8, p. 2560–2570, 2011.
- CARVALHO, Roberta de Almeida et al. **ESTUDO DA ADIÇÃO DE BIODIESEL NO DIESEL S10 E S500 E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES DO COMBUSTÍVEL E NA ATOMIZAÇÃO**. UFRJ, RJ, p.1-1, 2014.
- CARVALHO, Roberta de Almeida. **ESTUDO DA ADIÇÃO DE BIODIESEL NO DIESEL S10 E S500 E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES DO COMBUSTÍVEL E NA ATOMIZAÇÃO**. 2015. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.
- CAPANA, G. H. **Estudo do impacto do enxofre presente no diesel na emissão de poluentes e em tecnologia de pós tratamento de gases de escape**. USP, 2008.

DOMAN, L., & CHASE, N. (2015). **Passenger travel accounts formost of world transportation energy use**. Retrieved from: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=23832>.

FARIA, Marcia Dardari Castanheira; PINTO, Ricardo Rodrigues da Cunha; VALLE, Maria Letícia Murta. **Efeito do Biodiesel na Atomização do Combustível em Motores Diesel de Injeção Direta. Artigo Técnico**, RJ, p.1-1, 2010.

FARIAS, Marcelo Silveira de. **Avaliação de motores de tratores agrícolas utilizando dinamometro movel**. 2014. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pos Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria Rs, 2014.

FERNANDES, Manoel Reginaldo. **FORMULAÇÃO DE NOVOS COMBUSTÍVEIS BASE DIESEL: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E EMISSÕES**. 2011. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Química Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

FIGLIARESE, D. A.; DALLMEYER, A. U.; ROMANO, L. N.; SCHLOSSER, J. F.; MACHADO, P. R. M. **Desempenho de um motor de trator agrícola em bancada dinâmométrica com biodiesel de óleo de frango e misturas binárias com óleo diesel**. Ciência Rural, Vol.42, n.4, p.660-6, Santa Maria, Brasil, 2012.

GABRIEL, R., LIMA, A.K.S., SANTOS, G.E.S., SOLETTI J. I., CARVALHO de H. V.L. **CONSTRUÇÃO DE CURVAS DE TEMPERATURAS PARA A VISCOSIDADE E DENSIDADE DAS BLENDS FORMADAS COM DIESEL MINERAL E BIODIESEL DE COCO, DENDE E OURICURI**. XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUIMICA, 2014, Florianópolis - Sc - Cobeq, 2014.

GUEDES, Andrew David Mendes. **Estudo Experimental sobre o Impacto do Etanol em Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol nos Motores de Ignição por Compressão**. 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

HAICAL, Rafael da Cruz. **Desenvolvimento de um sistema de controle de dinamômetro para testes de motores de combustão interna**. 2009.

HODGSON, P.E. **The energy crisis**. *Modern Age*. 2008, v. 50, n. 2, pp. 140-147, 2008.

IACONO, Giuseppe Eugênio Peruzo. **DESEMPENHO DO MOTOR DE UM TRATOR AGRÍCOLA UTILIZANDO MISTURAS DIESEL-BIODIESEL-ETANOL**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE, Cascavel PR, 2017.

IEA (2015), **Energy and Climate Change: World Energy Outlook Special Report**, OECD/IEA, Paris.

KLAJN, F. F. **Avaliação comparativa de diferentes proporções da mistura diesel-biodiesel-etanol e diesel-biodiesel frente ao diesel tipo "a": Análises**

**físico-químicas e de desempenho de um conjunto motor.** 2016. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016.

KWANCHAREON, P.; LUENGNARUEMITCHAI A.; JAI-IN, S. **Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties and its emission characteristics from diesel engine.** Fuel. V.86, p. 1053 – 1061. 2007.

MACHADO, Paulo Romeu Moreira. **ESTERES COMBUSTÍVEIS EM MOTOR CICLO DIESEL SOB CONDIÇÕES DE PRE-AQUECIMENTO E VARIAÇÃO NO AVANÇO DE INJEÇÃO.** 2008. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS, 2008.

MACHADO, P, R, M. **Avaliação de Desempenho do Óleo de Soja como Combustível para Motores Diesel.** 212 p. Dissertação, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS. 2003.

MARTINS, Jorge (2006). **Motores de Combustão Interna**, 2ª edição. Publindústria.

MIALHE, L. G.. **Máquinas agrícolas: ensaios e certificação.** Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 1996.

MORAN, Michael J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. 947 p.

MOFIJUR, M.; RASUL, M. G. G.; HYDE, J.; AZAD, A. K. K.; MAMAT, R.; BHUIYA, M. M. K. Role of biofuel and their binary (diesel-biodiesel) and ternary (ethanol-biodiesel-diesel) blends on internal combustion engines emission reduction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 265–278, 2016.

PETERSEN, Paulo (org.) **Agricultura familiar camponesa na construção do futuro** / Paulo Petersen (org) - Rio de Janeiro: AS-PTA, 2009.

PERIN, Gismael Francisco. **DESEMPENHO E EMISSÕES DE MOTOR AGRÍCOLA CICLO DIESEL UTILIZANDO DIFERENTES COMBUSTÍVEIS.** 2014. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Centro de Cinâncias Rurais Programa de Pos Graduação Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria Rs, 2014.

PERERA, Solimar Carra. **ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS DE SPRAYS DE ÓLEO VEGETAL DE SOJA OBTIDOS DE UM ATOMIZADOR DE DIESEL.** 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PIRES, Rodrigo Marques. **Simulação Numérica da Atomização de Combustíveis com Interesse para Grandes Motores Diesel Marítimos.** 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia e A Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

PODORODECZKI, Paulo Ricardo. **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL COM INJEÇÃO ELETRÔNICA COMMON RAIL ALIMENTADO COM MISTURAS DIESEL – BIODIESEL EM DINAMÔMETRO DE CHASSIS.** 2016. 88 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RAHIMI, H.; GHOBADIAN, B.; YUSAF, T.; NAJAFI, G.; KHATAMIFAR, M. Diesterol: An environment-friendly IC engine fuel. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 335–342, 2009.

RAMOS, Diogo Mesquita. **Influência do Biodiesel na Injeção de um Motor Diesel**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2009.

SANTOS, Luis Carlos Aguiar. **Sistema de Injeção Diesel**. 2009. Disponível em: <[http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/act\\_lect/SIAUT/Trabalhos2008-09/SIAUT2009\\_InjeccaoDiesel.pdf](http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/act_lect/SIAUT/Trabalhos2008-09/SIAUT2009_InjeccaoDiesel.pdf)>. Acesso em: 24 jul. 2017.

SCHASCHKE, C. **A Dictionary of Chemical Engineering**. Oxford: Oxford University Press. (2014).

SHAHIR, S. A., et al. **Feasibility of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as existing CI engine fuel: An assessment of properties, material compability, safety and combustion**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V.32, p. 379-395. 2014.

SILVA, R. W. C.; PAULA. B. L. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. **Terra Didactic**, v.5, n. 1, p.42-49, 2009.

SILVA, Eduardo Miranda Moreira da et al. **MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**. Portugal: FEUP, 2015. 20 p.

SIANO, D. **Fuel Injection**, Ed Sciyo, Croácia, 2010.

SOUZA, Cristiane Daliassi Ramos de et al. Caracterização físico-química das misturas binárias de biodiesel e diesel comercializados no Amazonas. **Acta Amazônia**, Amazonas, v. 2, n. 39, p.383-388, jan. 2009.

SOUZA R.D ,2005, Balança Curie e Correntes de Foucault, UNICAMP SP.

TILLMANN, Carlos Antonio da Costa. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

UNIÃO EUROPEIA. **Objetivos da UE no setor da energia**. Disponível em: <[https://europa.eu/european-union/topics/energy\\_pt](https://europa.eu/european-union/topics/energy_pt)>. Acesso em: 26 jul. 2017.

VARELLA, Carlos Alberto Alves; SANTOS, Gilmar de Souza (Ed.). **NOÇÕES BÁSICAS DE MOTORES DIESEL**. Rio de Janeiro: Ufrj, 2010. 45 p.

VIANA, Joseane Cristina Ocroch. Plataforma de testes de desempenho veicular para dinamômetros inerciais de linguagem Labview, Santo André – São Paulo 2011.

YASIN, M. H. M.; YUSAF, T.; MAMAT, R.; YUSOP, A. F. Characterization of a diesel engine operating with a small proportion of methanol as a fuel additive in biodiesel blend. **Applied Energy**, v. 114, p. 865–873, 2014.