



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

CARLOS ROBERTO PERARO

**ESTUDO SOBRE EMISSÕES DE GASES E MATERIAL  
PARTICULADO DE DIFERENTES MISTURAS DE DIESEL E  
BIODIESEL**

---

Londrina  
2019

CARLOS ROBERTO PERARO

**ESTUDO SOBRE EMISSÕES DE GASES E MATERIAL  
PARTICULADO DE DIFERENTES MISTURAS DE DIESEL E  
BIODIESEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia da Universidade Estadual de Londrina como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Cristina Solci  
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Corrêa da Silva

Londrina  
2019

P426 Peraro, Carlos Roberto.  
Estudo sobre emissões de gases e material particulado de diferentes misturas de diesel e biodiesel / Carlos Roberto Peraro. - Londrina, 2019.  
67 f. : il.

Orientador: Maria Cristina Solci.  
Coorientador: Rodrigo Corrêa Da Silva.  
Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, 2019.  
Inclui bibliografia.

1. Biodiesel - Tese. 2. Gerador de energia elétrica - Tese. 3. Gases de exaustão - Tese. I. Solci, Maria Cristina . II. Da Silva, Rodrigo Corrêa . III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. IV. Título.

CDU 662

CARLOS ROBERTO PERARO

**ESTUDO SOBRE EMISSÕES DE GASES E MATERIAL  
PARTICULADO DE DIFERENTES MISTURAS DE DIESEL E  
BIODIESEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Bioenergia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Maria Cristina Solci  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Carmen Luísa Barbosa Guedes  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. Ismael de Marchi Neto  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR

Londrina, 06 de Setembro de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha orientadora, professora Dr<sup>a</sup>. Maria Cristina Solci, não só pela orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade, paciência e atenção;

Agradeço ao meu coorientador, professor Dr. Rodrigo Corrêa da Silva, não só pela coorientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade, paciência e atenção;

Agradeço aos professores coordenadores dos Laboratórios da UEL, pela disponibilidade de materiais e recursos humanos: professora Dr<sup>a</sup>. Carmen Luisa Barbosa Guedes e Professor Dr. Dionísio Borsato.

Agradeço à Universidade Estadual de Londrina - UEL pela oportunidade e pelo conhecimento adquirido no programa de pós-graduação em Bioenergia.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Londrina – UTFPR, em especial ao professor Dr. Ismael de Marchi Neto, pela oportunidade, conhecimento e disponibilidade do Laboratório de Sistemas Térmicos.

Aos membros da banca examinadora, pelo aceite do convite da professora Dra. Maria Cristina Solci.

Aos colegas que se dispuseram a auxiliar-me e, mais ainda, com fiel e sincera amizade, em especial, José Batista, Francino Costa, Marissa Kimura, Oscar Andres, Isadora Branco, Guilherme Augusto Colucce, Dr. Jurandir Pereira Pinto, Dr. Carlos Roberto da Silva Junior e Dr. Vladimir Moreira.

PERARO, Carlos Roberto. **Estudo sobre emissões de gases poluentes e material particulado de diferentes misturas de diesel e biodiesel**. 67 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia). Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

## RESUMO

Neste trabalho, foram investigadas as emissões de gases, material particulado, avaliação energética e *black carbon* provenientes da combustão de diesel e misturas com biodiesel em um motogerador ciclo diesel de pequena escala, com potência nominal de 2,0 kW. O biodiesel comercial foi adicionado ao diesel mineral em frações que variaram de 0 a 30 % v/v. O comportamento das diferentes misturas foi avaliado em três níveis de carga elétrica: 0,50 kW, 1,25 kW e 2,0 kW. Nas emissões de gases de exaustão do motogerador, foram investigadas: teor de oxigênio, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre, e obtidas amostras de material particulado. A partir das amostras coletadas de material particulado, foram analisados, por reflexão ótica, o *black carbon*. O consumo de combustível foi medido gravimetricamente e calculado o consumo específico e potência elétrica (carga elétrica) do gerador, acoplado diretamente ao motor ciclo diesel. Os resultados apontaram, entre as misturas analisadas, os maiores valores de emissões de NO<sub>x</sub>, na carga de 2,0 kW; e maiores valores de emissões de CO corrigido na carga de 0,5 kW. O melhor rendimento térmico foi com a mistura B30. A maior quantidade de massa de material particulado foi observado com B20 e a menor com AS-500, e a maior quantidade de emissão de *black carbon* foi observado com B30, e a menor com AS-500. Este estudo experimental mostrou ser possível averiguar o comportamento de misturas de diesel e biodiesel com carga variável em motogerador, e correlatas emissões nos gases de exaustão.

**Palavras-chave:** biodiesel; gerador de energia elétrica; gases de exaustão.

PERARO, Carlos Roberto. **Estudo sobre emissões de gases poluentes e material particulado de diferentes misturas de diesel e biodiesel**. 67 p. Dissertação (Mestrado em Bioenergia). Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

### **ABSTRACT**

In this work, we investigated the emissions of gases, particulate matter, energy assessment and black carbon from diesel combustion and biodiesel blends in a small scale diesel generator with 2.0 kW nominal power. Commercial biodiesel was added to mineral diesel in fractions ranging from 0 to 30% v / v. The behavior of the different mixtures was evaluated at three levels of electric charge: 0.50 kW, 1.25 kW and 2.0 kW. In the exhaust emissions of the generator, were investigated: oxygen content, carbon monoxide, nitrogen oxides and sulfur dioxide, and particulate matter samples were obtained. From the samples collected from particulate material, black carbon was analyzed by optical reflection. Fuel consumption was measured gravimetrically and the specific consumption and electrical power (electrical load) of the generator were calculated, coupled directly to the diesel engine cycle. Among the mixtures analyzed, the results showed the highest NO<sub>x</sub> emission values, at a load of 2.0 kW; and higher values of 0.5 kW load corrected CO emissions. The best thermal efficiency was with the B30 mixture. The largest amount of particulate matter mass was observed with B20 and the smallest with AS-500, and the largest amount of black carbon emission was observed with B30, and the smallest with AS-500. This experimental study showed that it was possible to verify the behavior of diesel and biodiesel mixtures with variable load in motorgenerator, and related exhaust gas emissions.

**Keywords:** biodiesel; electric power generator; exhaust gases.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Ciclos do motor diesel.....	7
<b>Figura 2</b> – Obtenção do biodiesel .....	9
<b>Figura 3</b> – Evolução da produção de biodiesel (B100) entre 2007 a 2018.....	10
<b>Figura 4</b> – Misturas obrigatórias de biodiesel no diesel no Brasil comercializado em território nacional. ....	10
<b>Figura 5</b> – Matéria-prima na produção de biodiesel.....	12
<b>Figura 6</b> – Estrutura de montagem do trabalho .....	23
<b>Figura 7</b> – Valores médios do consumo de combustível em função da potência elétrica. ....	35
<b>Figura 8</b> – Valores médios do consumo específico do combustível em função da potência elétrica.....	36
<b>Figura 9</b> – Valores médios da eficiência do motogerador .....	37
<b>Figura 10</b> – Valores médios de temperaturas em função da potência elétrica dissipada. ....	38
<b>Figura 11</b> – Valores médios da concentração de oxigênio dos gases exaustão.....	39
<b>Figura 12</b> – Valores médios da concentração de monóxido de carbono nos gases de exaustão.....	40
<b>Figura 13</b> – Valores médios da concentração de dióxido de enxofre nos gases de exaustão.....	41
<b>Figura 14</b> – Valores médios da concentração de (NO) nos gases de exaustão.....	42
<b>Figura 15</b> – Valores médios da concentração de (NO <sub>2</sub> ) nos gases de exaustão. ....	43
<b>Figura 16</b> – Valores médios da concentração de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) nos gases de exaustão.....	45
<b>Figura 17</b> – Valores médios da massa absoluta (µg) de MP em função das misturas de biodiesel .....	46
<b>Figura 18</b> – Filtros carregados com MP e potência elétrica dissipada. ....	47
<b>Figura 19</b> – Valores médios de <i>Black Carbon</i> em função das misturas de biodiesel.....	47
<b>Figura 20</b> – Relação BC / MP em função das misturas de biodiesel.....	48

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Propriedades físicas das misturas de diesel fóssil e biodiesel .....	34
<b>Tabela 2</b> – Relação NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> .....	43

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Aleatoriedade do procedimento experimental dos combustíveis AS-500 e B10 .....	32
<b>Quadro 2</b> – Aleatoriedade do procedimento experimental dos combustíveis B20 e B30 .....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACGIH	Association Advancing Occupational and Environmental Health
ANP	Agência Nacional de Petróleo
BIG	Boletim de informações gerenciais
B100	Biodiesel puro
BC	<i>Black Carbon</i>
BTU	British Thermal Unit
CE	Carbono elementar
CO	Carbono orgânico
EELS	<i>Evans Electroselenium Ltd Spectro</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FISPO	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos
GEE	Gases de efeito estufa
HPA	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MCI	Motores de combustão interna
MB/D	Milhões de barris por dia
MP	Material particulado
NO	Monóxido de nitrogênio
	NO <sub>2</sub> Dióxido de nitrogênio
	NO <sub>x</sub> Óxidos de nitrogênio
CO	Monóxido de carbono
	CO <sub>2</sub> Dióxido de carbono
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
NC	Número de cetano
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
MME	Ministério de Minas e Energia (MME)
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
PEFF	Ponto de entupimento de filtro a frio
PPF	Propriedades de fluxo a frio
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1.	IMPORTÂNCIA DOS BIOCOMBUSTÍVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....	2
1.2.	GERAÇÃO DE ELETRICIDADE .....	4
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	5
2.1.	OBJETIVO GERAL .....	5
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>3.</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	6
3.1.	MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTÃO .....	6
3.2.	MOTOGERADOR .....	8
3.3.	BIODIESEL .....	9
3.4.	MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE BIODIESEL .....	11
3.5.	FUNDAMENTOS DE COMBUSTÃO E FORMAÇÃO DE POLUENTES .....	12
3.6.	MONÓXIDO DE CARBONO (CO) .....	14
3.7.	ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NOX) .....	14
3.8.	MATERIAL PARTICULADO (MP) .....	16
3.9.	BLACK CARBON (BC) .....	18
3.10.	ESTUDOS DE BIOCOMBUSTÍVEIS EM MOTORES DIESEL .....	19
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	22
4.1.	DESCRIÇÃO DA BANCADA DE TESTES .....	22
4.1.1.	COMBUSTÍVEIS .....	29
4.1.2.	PROCEDIMENTO DE EXPERIMENTOS .....	30
4.1.3.	ANÁLISES DE GASES DE EXAUSTÃO .....	32
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	34
5.1.	ANÁLISE DAS MISTURAS DE DIESEL FÓSSIL E BIODIESEL .....	34
5.2.	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E POTÊNCIA ELÉTRICA. ....	34
5.3.	TEMPERATURAS .....	37
5.4.	EMISSÃO DE OXIGÊNIO .....	38
5.5.	EMISSÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO .....	39

5.6.	EMISSÃO DE DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO <sub>2</sub> ).....	40
5.7.	EMISSÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO.....	41
5.8.	EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO E <i>BLACK CARBON</i> .....	45
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>49</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>
<b>8.</b>	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>58</b>
8.1.	APÊNDICE A - MÉDIA DOS RESULTADOS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA.....	58
8.2.	APÊNDICE B - MÉDIA DOS RESULTADOS DE ANÁLISE DE GASES EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA.....	60
8.3.	APÊNDICE C - MÉDIA DOS RESULTADOS DE VOLTAGEM E CORRENTE EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA.....	62
8.4.	APÊNDICE D - MÉDIA DOS RESULTADOS DE MASSA CONSUMIDA NO MOTOR EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA.....	63
8.5.	APÊNDICE E – MÉDIA RESULTADOS DE MATERIAL PARTICULADO E BLACK CARBON EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA.....	64
<b>9.</b>	<b>ANEXO.....</b>	<b>65</b>
9.1.	ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO MOTOGERADOR.....	65
9.2.	ANEXO B - ANALISADOR DE GASES TESTO-350.....	66
9.3.	ANEXO C - ALICATE WATTÍMETRO.....	67

## 1. INTRODUÇÃO

O biodiesel vem assumindo grande importância na matriz energética, como componente na adição ao diesel mineral. Desde março de 2018, todo diesel comercializado em todo território nacional deve conter, obrigatoriamente, uma fração de 10 % em volume de biodiesel (B10). Em geral, a adição de biodiesel altera as emissões dos gases de exaustão a partir dos motores de combustão interna. Maiores valores de fração de biodiesel, presentes na mistura ainda demandam estudos que avaliem, sob uma ótica multidisciplinar, o desempenho energético e de emissão de poluentes. Além da aplicação veicular, motores a diesel são importantes fontes de geração descentralizada de energia elétrica, e estudos que avaliem o comportamento de motogeradores são ainda escassos.

Estudos em combustíveis de origem renovável e em garantia do suprimento de energia no futuro têm aumentado com o objetivo de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, que largamente são utilizados desde a metade do século XIX. Após as crises de petróleo, iniciadas na década de 70, ocorreram sucessivos choques de preço e reduções no abastecimento pelos principais produtores mundiais (GAZZONI, 2014). Aliado a esta crise, a preocupação ambiental, a conscientização de que os recursos naturais são finitos, e a correlação com o desenvolvimento sustentável, conservação de energia, eficiência e preservação do meio ambiente tornam-se altamente pronunciados nos dias atuais.

Preocupações com as mudanças climáticas levaram a sociedade a buscar alternativas para reduzir as emissões de carbono. Para esse fim, existe a necessidade da mudança na conversão de energia por meio de combustíveis fósseis para renováveis. Embora a energia renovável possa fornecer uma fonte limpa de eletricidade, os combustíveis fósseis ainda são responsáveis pela grande maioria da geração de eletricidade do mundo (LAZKANO; NOSTBAKKEN; PELLI, 2017).

O consumo de energia vem aumentando continuamente a cada ano. Projeções recentes do *U.S. Energy Information Administration (EIA)*, apresentadas no relatório *International Energy Outlook 2018*, prevêem um acréscimo de 28 % no consumo de energia primária mundial no período de 2015 a 2040, chegando a 739 bilhões (BTU), sendo que 64 % desta energia será proveniente, principalmente, de países em desenvolvimento, os quais não fazem parte da OCDE (Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico).

A produção de energia primária no Brasil aumentou 31,7 % de 2007 a 2016, sendo a maior participação proveniente do petróleo e outros combustíveis líquidos (44 %),

seguidos pela hidroeletricidade (35 %) e gás natural (8 %) (EPE, 2018). O Brasil detém uma posição de liderança em relação à utilização de recursos energéticos renováveis. Em 2016, a participação de energia primária renovável, a qual engloba fontes hidráulica, eólica, solar, produtos da cana de açúcar, lenha, biodiesel, entre outros, foi de 41,5 %, em torno de três vezes superior à média mundial (13,5 %). Conforme reportado no relatório do Balanço Energético Nacional, o Brasil ainda continua dependente de energia externa, com importação de 2,1 % para o suprimento energético nacional (EPE, 2018).

A oferta de energia elétrica no Brasil é predominantemente renovável, sustentada principalmente pela fonte hidráulica. Em 2016, a oferta total foi de 619,7 TWh, oriunda de fontes, em ordem decrescente: hidráulica 68,1 %, gás natural 9,1 %, biomassa 8,2 %, eólica 5,4 %, carvão 4,2 %, nuclear 2,6 %, derivados de petróleo 2,4 % e solar 0,01 %.

O Brasil possui um dos maiores potenciais de geração de energia hidrelétrica do mundo. Em ordem de capacidade de geração de energia hidrelétrica está a China com 296,0 GW, seguido por Brasil 91,7 GW, Canadá 79,2 GW e Estados Unidos 70,7 GW. A geração hidrelétrica no Brasil corresponde a mais de dois terços do total da capacidade do país (EPE, 2018). De fato, o uso de recursos hídricos traz muitas vantagens, mas sua prevalência torna eletricamente dependente das condições hidrológicas (CORRÊA DA SILVA; DE MARCHI NETO; SILVA SEIFERT, 2016). A existência de períodos secos compromete o planejamento operacional de um sistema elétrico que está condicionado à aleatoriedade de recursos hidrológicos, viabilizando usinas termelétricas em situações de baixo nível dos reservatórios (FERNANDES et al., 2008).

#### 1.1. IMPORTÂNCIA DOS BIOCOMBUSTÍVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

O Brasil e vários países do mundo já visualizaram a importância da produção e do uso de combustíveis renováveis, os quais são sustentados pela utilização de produtos de origem agrícola e renovável (MARTIN, 2013). Por definição, biocombustível é fonte de energia renovável e sustentável, de origem biológica, biomassa vegetal e animal, não fóssil. Os principais tipos de biocombustíveis são bioetanol, biogás, biomassa e biodiesel (TEIXEIRA, 2010).

O biocombustível obtido a partir da biomassa vegetal ou animal possui três grandes fontes que podem ser predominantes: os derivados de madeira e outras formas de

biomassa, os derivados de triglicerídeos, como óleos vegetais o biodiesel, e os derivados de carboidratos, como o etanol (GAZZONI, 2014; SCHIRMER et al., 2017).

O Brasil é destaque mundial na inserção de biocombustíveis na matriz energética, em especial pelo amplo uso de etanol (obtido da cana de açúcar) e do biodiesel (produzido a partir de óleos vegetais e gordura animal) (SCHIRMER et al., 2017). Desde 1975, quando o governo federal estabeleceu o Programa Nacional do Álcool-Proálcool, o etanol anidro é misturado à gasolina dentro de padrões estabelecidos por lei. A partir de 1977, o país também passou a comercializar álcool etílico hidratado, contendo 5 a 6 % v/v de água (NIGRO; SZWARC, 2009).

As emissões de gases para a atmosfera pela combustão de etanol produz, em geral, menos poluentes do que a emissão por combustão de gasolina e o diesel. A combustão de etanol pode possibilitar uma queima mais completa com menor emissão de monóxido de carbono (CO) e de material particulado (MP). Por outro lado, há o aumento na emissão de aldeídos (GUARIEIRO; VASCONCELLOS; SOLCI, 2011).

As primeiras notícias de utilização de óleos vegetais como combustíveis datam do século XIX quando Rudolph Diesel apresenta na feira mundial de Paris, em 1898, o motor abastecido com óleo de amendoim (MARCOVITCH, 2006). No Brasil, as investigações quanto à utilização de óleos vegetais como combustível foram realizadas nos anos de 1920 pelo Instituto Nacional de Tecnologia (TEIXEIRA et al., 2010).

O biodiesel vem sendo incluso na matriz energética por ser uma fonte renovável e biodegradável, aliada à expectativa de redução no aquecimento global (AL QUBEISSI; SAZHIN; ELWARDANY, 2017), sendo utilizado predominantemente em motores de combustão interna de ignição por compressão (SPACINO et al., 2015). Com relação ao meio ambiente, tem menor emissão nos gases de efeito estufa, em relação ao combustível fóssil, quando considerado o ciclo de vida do combustível (DE PAULO et al., 2016). Possui propriedades físico-químicas semelhantes à versão mineral e é constituído de metil ou etil ésteres de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação dos triglicerídeos com a curta cadeia do álcool, metanol ou etanol (PARENTE, 2003; BORSATO et al., 2014). As semelhanças em termos de propriedades e as vantagens em termos ambientais tornam o biodiesel atrativo para o setor de transporte e geração de eletricidade (LAPUERTA et al., 2005; JASPER et al., 2010). O principal benefício do biodiesel no cenário econômico é a sustentabilidade, aumento de empregos na fabricação, desenvolvimento de novas tecnologias e competitividade internacional.

Neste contexto, o aumento de misturas de biodiesel ao diesel mineral pode ser considerado uma alternativa que viabilizará o atendimento da demanda de energia e aprimorará a estabilização do aumento da temperatura global e a eliminação gradual dos combustíveis fósseis (CHERUBINI et al., 2016).

## 1.2. GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

A demanda por eletricidade está crescendo devido, principalmente, à expansão da eletrificação contínua dos setores residencial, comercial e industrial. Em geral, pode-se afirmar que a eletricidade tem sido um importante impulsionador do crescimento econômico (TORRES, 2012).

Conforme relatório da Aneel, através do, boletim de informações gerenciais de dezembro de 2018, a potência elétrica instalada no Brasil é da ordem de 163,6 GW; E subdivide-se em fontes: 104,1 GW (63,6 %) é hidráulica, 41,3 GW (25,2 %) é termelétrica, 18,2 GW (11,2 %) é de outras fontes (eólica, nuclear, fotovoltaica).

A fonte de combustíveis para geração de energia elétrica das termelétricas, que é da ordem de 41,3 GW e subdivide-se em fontes: 26,6 GW (64,6 %) é de combustível fóssil; gás natural (31,4 %), óleo diesel (10,6 %), óleo combustível (9,8 %), carvão mineral (8,0 %) e outros (10,3 %), e 14,7 GW (35,4 %) é bioenergia; bagaço-de-cana (27,3 %), licor negro (6,2 %) e outros (2,0 %).

A diversificação da matriz elétrica é fundamental para a segurança no fornecimento de energia elétrica futura, minimizando os efeitos de sazonalidade na intensidade pluviométrica. A geração termelétrica exerce um papel importante, devido a sua alta flexibilidade operativa e não estando sujeita à imprevisibilidade de existência de recursos naturais (sol, vento e chuva). Com base nos dados analisados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as termelétricas são acionadas quando os reservatórios das hidrelétricas encontram-se abaixo dos níveis operacionais recomendados e quando há problemas de falha e/ou manutenção de seus equipamentos, por exemplo.

O custo de geração de energia elétrica hidráulica é em média menor que a geração de eletricidade por termelétrica e por esse motivo as termelétricas podem não operar continuamente, sendo despachadas somente em casos de necessidade (CORRÊA DA SILVA; DE MARCHI NETO; SILVA SEIFERT, 2016). Além disso, há o possível dano ao meio

ambiente, provocadas pelas usinas termelétricas, tanto na extração da matéria-prima, que é usada como combustível, e como nas emissões atmosféricas (COLOSSI, 2012). Vantajosamente as termelétricas podem, em muitas aplicações, operar como um sistema de cogeração para produção conjunta de eletricidade e vapor para uso em processos industriais (DOS REIS; SANTOS, 2015).

As emissões em motores diesel, aplicados tanto em veículos quanto em usinas termelétricas são quimicamente complexas e bastante variáveis. A composição dos gases de exaustão nos motores diesel depende de vários fatores, como composição do combustível (diesel e blendas de diesel e biodiesel), aditivos, tipo do motor, condições operacionais do motor, (como rotação, potência absorvida), condições ambientais (temperatura e umidade relativa) e a presença de conversores catalíticos (HOSEINI et al., 2017).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem como objetivo investigar o efeito de misturas/blendas de diesel e biodiesel no consumo de combustível, produção de eletricidade e emissão de poluentes a partir de um motogerador de pequeno porte, operando em diferentes condições operacionais em termos de potência.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- i. Investigar o comportamento operacional de misturas de biodiesel;
- ii. (10, 20 e 30 % v/v) de biodiesel com diesel mineral;
- iii. Avaliar as emissões de gases gerados na combustão em motor ciclo diesel, em termos de: CO, NO, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>;
- iv. Avaliar as concentrações de material particulado e *black carbon* (BC).

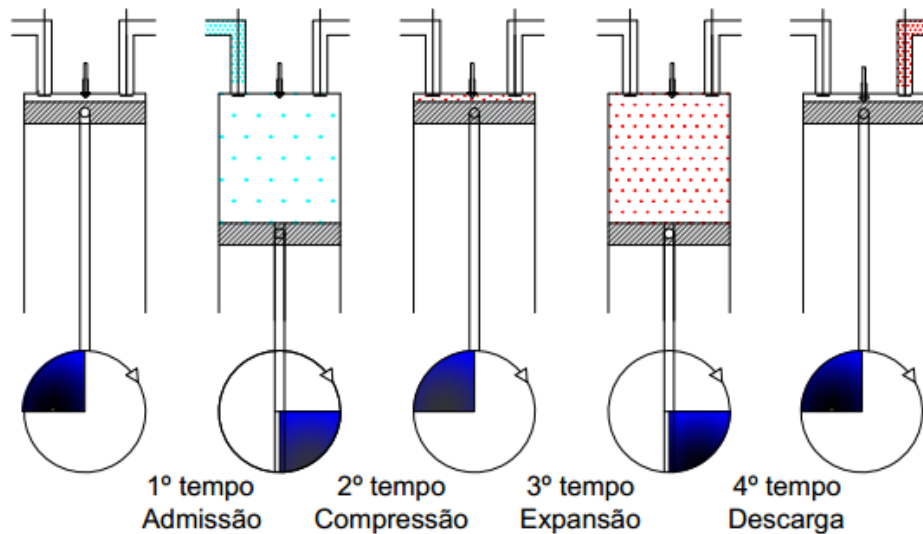
### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTÃO

Máquinas térmicas ou motores térmicos são destinados a converter o calor fornecido por uma fonte de alta temperatura (por meio da combustão, por exemplo) em energia mecânica (trabalho útil), rejeitando o calor restante para uma fonte a baixa temperatura (HEYWOOD, 1988). Entre as máquinas térmicas existentes, os motores alternativos de combustão interna destacam-se pela ampla utilização no setor de transporte, industrial e geração de eletricidade. Os motores alternativos de combustão interna operam segundo ciclos termodinâmicos, sendo o ciclo Otto e ciclo Diesel comumente utilizados (PASSOS, 2003).

Grande parte dos motores operam segundo um ciclo mecânico de quatro etapas. Na primeira etapa, denominada admissão (primeiro tempo, admissão), o êmbolo (pistão) desloca-se no sentido descendente no cilindro do motor, criando uma pressão negativa e succionando o ar atmosférico para o interior do cilindro através da válvula previamente aberta (válvula de admissão). Ao final do tempo de admissão, após o êmbolo passar pela posição mais inferior do seu curso, conhecido como (PMI-ponto morto inferior), a válvula de admissão fecha-se. No segundo tempo, conhecido como tempo de compressão, o êmbolo inicia o movimento ascendente com início da compressão do ar atmosférico, até atingir a posição superior do seu curso (PMS-ponto morto superior). Durante a compressão, a temperatura do ar atmosférico aumenta, propiciando o início da ignição do combustível. Pouco antes de atingir o PMS, tem início a injeção de combustível. Com o resultado da combustão, a pressão e temperatura aumentam e provocam o movimento descendente do pistão, quando os gases formados se expandem no interior do cilindro durante a terceira etapa. Pouco tempo antes de atingir o PMI, a válvula de escape é aberta, iniciando a etapa de escape dos gases de exaustão quando o êmbolo em movimento ascendente expulsa os gases formados na combustão para o exterior do cilindro do motor. Pouco tempo antes do êmbolo atingir o PMS, abre-se a válvula de admissão e mais um ciclo de quatro etapas inicia-se, representado pela Figura 1.

**Figura 1-** Ciclos do motor diesel



Fonte: Adaptado (DA SILVEIRA, 2008)

O diferencial fundamental entre os motores que operam segundo o ciclo Otto e o ciclo Diesel encontra-se na câmara de combustão e ignição. Nos motores ciclo Otto, normalmente o combustível é atomizado juntamente com o ar atmosférico antes de ser injetado na câmara de combustão, onde é comprimido e a combustão tem início por meio de uma centelha elétrica (GUIBET; FAURE-BIRCHEM, 1999). Nos motores ciclo Diesel, somente o ar é admitido e comprimido dentro do cilindro. Como consequência do aumento de pressão, dependente da taxa de compressão utilizada, observa-se um aumento de temperatura (500-800°C), a qual é suficientemente elevada para a ignição do combustível. Assim, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão através de um bico atomizador, operando acoplado a uma bomba de deslocamento positivo (MENEZES, 2009). Devido à alta temperatura do ar, o combustível entra em combustão sem a necessidade de centelha (HEYWOOD, 1988).

Geralmente, os motores a ciclo diesel são vantajosos em comparação com motores a ciclo Otto devido à sua maior eficiência térmica, confiabilidade e durabilidade, menor consumo de combustível e menor emissão de CO<sub>2</sub> (KIM; CHOI, 2010).

### 3.2. MOTOGERADOR

O conjunto motogerador pode fornecer energia elétrica para diversos equipamentos, máquinas, ou ainda assim, substituir o suprimento de energia elétrica principalmente em estabelecimentos industriais e comerciais, além de formar grupos de geração elétrica em usinas termelétricas.

As máquinas elétricas destinam-se à conversão entre a energia mecânica em energia elétrica. O dispositivo destinado a converter energia mecânica em energia elétrica denomina-se gerador elétrico, enquanto o inverso ocorre em dispositivos conhecidos como motores elétricos (CHAPMAN, 2013). O motogerador é um equipamento que possui um motor de combustão interna diretamente acoplado ao gerador elétrico. Os motogeradores podem operar isoladamente ou em paralelo com outros motogeradores, formando grupos com capacidade de até 30 MW (MAMEDE FILHO, 2000). Segundo a ANEEL, através do Boletim de Informações Gerenciais (ANEEL, 2018), existe no Brasil 2147 instalações com motogeradores, usando como fonte de combustível o diesel e com potência fiscalizada de 4,3 GW.

A literatura mostra que emissões dos gases, performance elétrica e performance mecânica são diretamente proporcionais às cargas aplicadas no motor e conseqüentemente, é importante avaliar as condições de carga (BEDOYA; ARRIETA; CADAVID, 2009; SCHIRMER et al., 2017). O motogerador permite a modulação de potência elétrica consumida e potência mecânica que possibilitam análises de variáveis de desempenho do conjunto e emissões gasosas. Vários estudos apresentam dispositivos para variar as condições de carga em motogeradores como dinamômetros ou banco de resistência elétrica, com dissipação de calor, a fim de simular condições de funcionamento para avaliar performance de combustíveis, eficiência mecânica, emissão de gases, geração de eletricidade (D'AGOSTO et al., 2017; MENEZES, 2009; GUARIEIRO et al., 2014).

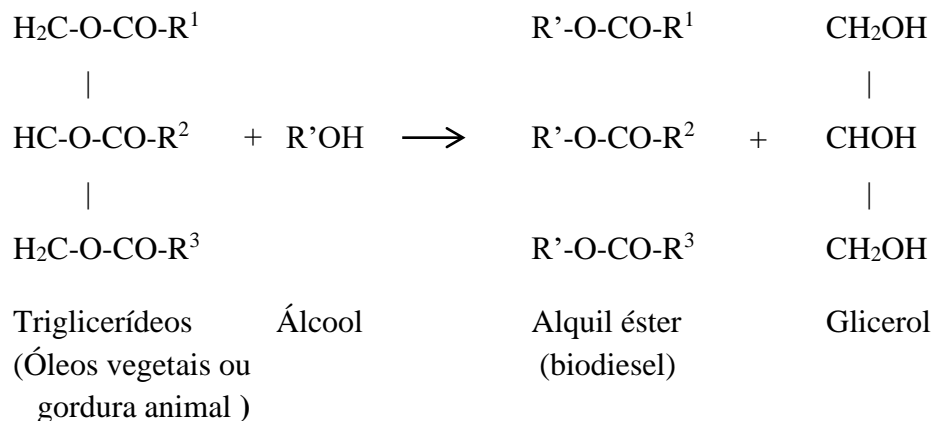
Com a variação de carga elétrica aplicada no motogerador, é necessário que o gerador alcance a potência apontada e opere dentro da frequência da rede e, para isto, o motor deve operar a rotação constante, que é, diretamente proporcional à frequência elétrica. Nos motores a diesel, a regulagem da velocidade de rotação da árvore do motor é feita a partir da injeção de combustível. A rotação do motor depende da vazão de combustível injetada e da carga aplicada à árvore do motor (potência transmitida pelo motor). O mecanismo de regulagem de rotação do motor diesel (regulador/governador de rotação) altera a vazão de

combustível injetado na câmara de combustão. Essa variação energética permite a regulação da velocidade angular do motor (GARCIA; MONTICELLI, 2003).

### 3.3. BIODIESEL

O biodiesel é um combustível renovável obtido a partir de um processo químico denominado transesterificação. Por meio deste processo, os triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal reagem com um álcool primário (metanol ou etanol), gerando dois produtos: o éster e a glicerina. Essa reação é apresentada na Figura 2. O éster é denominado biodiesel após passar por processos de purificação e adequação à especificação de qualidade especificada pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), sendo destinado, principalmente, à aplicação em motores ciclo Diesel.

**Figura 2** - Obtenção do biodiesel

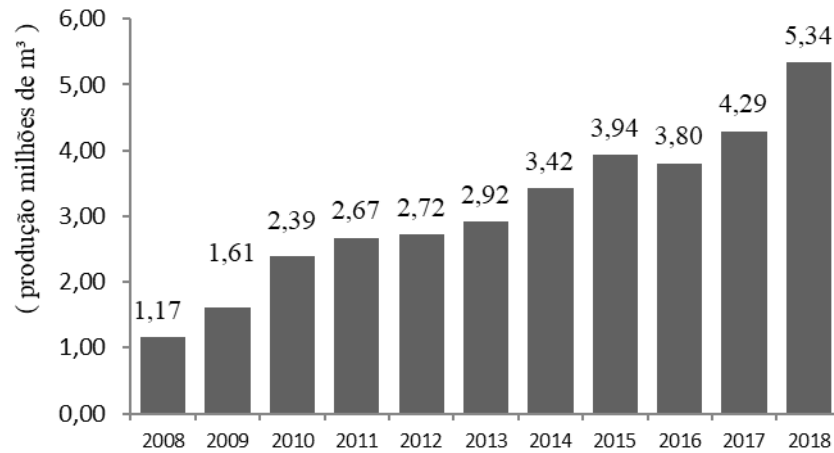


R<sup>1</sup>, R<sup>2</sup> e R<sup>3</sup> cadeias de ácidos graxos; metanol (R'=CH<sub>3</sub>) com metilato de sódio (NaOCH<sub>3</sub>); mais utilizado

**Fonte:** Adaptado (KNOTHE; RAZON, 2017)

Em 2018, a produção brasileira de biodiesel foi de 5,33 milhões de metros cúbicos, conforme dados da ANP (ANEEL, 2018). Para efeito de comparação, no mesmo ano, os Estados Unidos produziram 7,01 milhões de metros cúbicos. O gráfico da Figura 3 mostra a evolução na produção de biodiesel no Brasil, o qual está atrelado a autorizações governamentais de misturas do biodiesel ao combustível diesel.

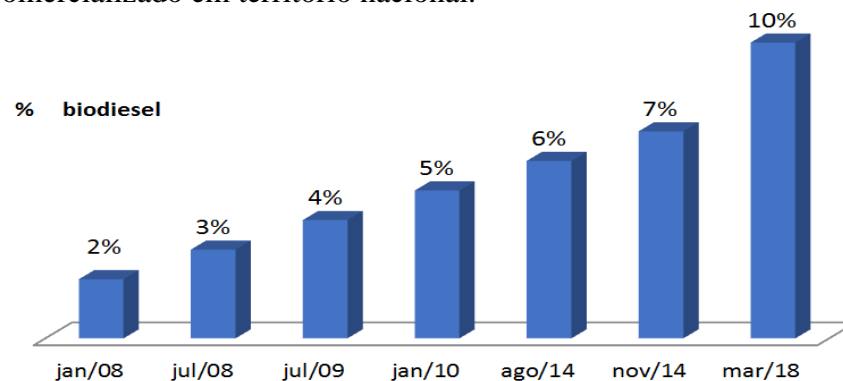
**Figura 3** - Evolução da produção de biodiesel (B100) entre 2007 a 2018.



**Fonte:** (ANP, 2017)

Em dezembro de 2004, surgiu o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) com o objetivo inicial de introduzir o biodiesel na matriz energética brasileira. A sua mistura ao diesel fóssil teve início em 2004, em caráter experimental e, entre 2005 e 2007, no teor de 2 % v/v, e a comercialização passou a ser voluntária. A obrigatoriedade veio no artigo 2º da Lei nº 11.097/2005, que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira. Em janeiro de 2008, entrou em vigor a mistura legalmente obrigatória de 2 % (B2), em todo o território nacional. A partir de março de 2018, a porcentagem estabelecida é de 10 % v/v de biodiesel. A Figura 4 mostra a evolução do percentual de biodiesel misturado ao diesel fóssil.

**Figura 4** - Misturas obrigatórias de biodiesel no diesel no Brasil comercializado em território nacional.



**Fonte:** (ANEEL, 2018)

A especificação do biodiesel é por meio de resolução do Ministério de Minas e Energia (MME), o qual determina parâmetro de qualidade e o percentual do biodiesel a ser adicionado ao diesel fóssil. Os atos normativos referentes à especificação do biodiesel são listados a seguir:

- Resolução ANP nº 30/2016: estabelece a especificação de óleo diesel, AS-500 a B30, em caráter autorizativo, nos termos dos incisos I, II e III do art. 1º da Resolução CNPE nº 03, de 21 de setembro de 2015;
- Resolução ANP nº 45/2014: estabelece a especificação do biodiesel contida no Regulamento Técnico ANP nº 3/2014 e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional.

#### 3.4. MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE BIODIESEL

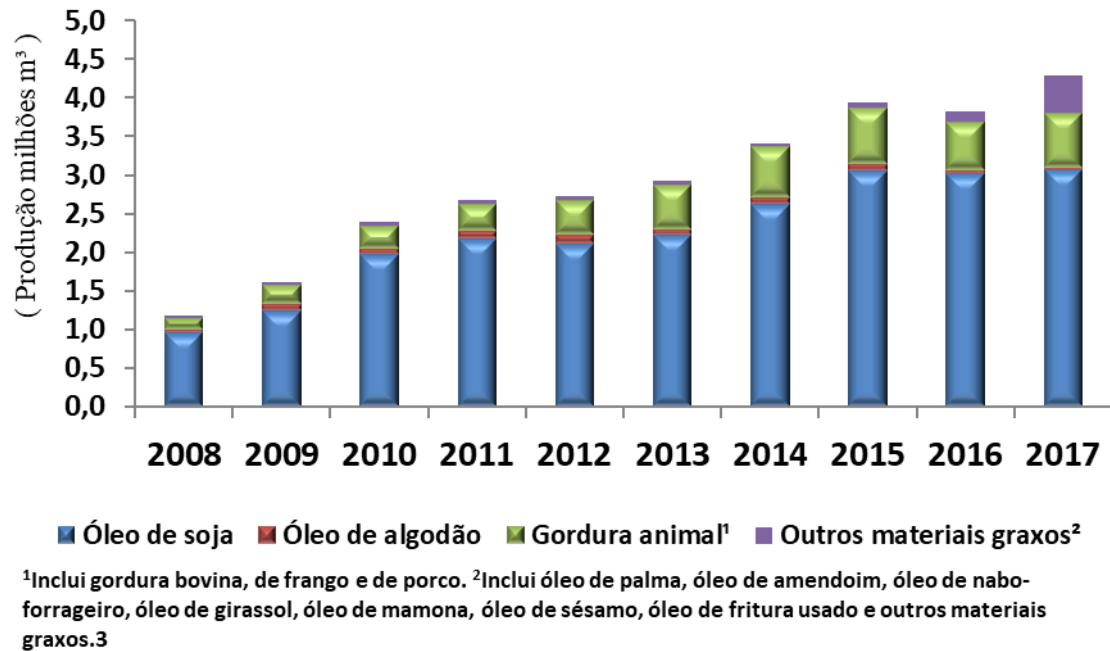
A Figura 5 mostra a matéria-prima utilizada para a produção brasileira de biodiesel. No Brasil, a produção de biodiesel é proveniente de maior porcentagem de óleo de soja (70 %), seguido por gorduras animais (17 %), principalmente com a cadeia de cultivo e distribuição da oleaginosa estar consolidada.

A gordura animal, principalmente o sebo bovino, importante produto usado na matéria-prima do biodiesel, é um resíduo com alto potencial poluente que é frequentemente ligado a problemas ambientais por causa de seu descarte irregular no meio ambiente (DOS REIS et al., 2013). A alta concentração de ácidos graxos saturados na composição da gordura animal influencia a qualidade do biodiesel, principalmente com pontos de fusão mais elevados do que compostos de ácidos graxos insaturados (BALEN, 2012). Portanto, demonstram tendência maior à solidificação em baixas temperaturas (CUNHA, 2008).

A avaliação de propriedades físico-químicas de um combustível fornece importantes informações a respeito da sua qualidade. O tamanho da cadeia carbônica das moléculas que compõem a matéria na fabricação do biodiesel afetam as propriedades de fluxo a frio (PFF), massa específica e viscosidade cinemática (ISIOMA et al., 2013). Em função de sua composição química, o biodiesel com maiores porcentagens de gordura animal possui PEFF desfavoráveis, apresentando altos pontos de entupimento de filtro a frio (PEFF) (BALEN, 2012). Em decorrência disso, este produto tende a solidificar a baixas temperaturas,

podendo entupir filtros ou mesmo tornar-se espesso a ponto de não poder ser bombeado do tanque de combustível até o motor (TEIXEIRA et al., 2010).

**Figura 5** – Matéria-prima na produção de biodiesel



Fonte : ANP (2018)

### 3.5. FUNDAMENTOS DE COMBUSTÃO E FORMAÇÃO DE POLUENTES

Combustão é a denominação dada à reação de oxidação dos constituintes de um combustível. A maioria dos combustíveis é constituída de carbono, hidrogênio e enxofre, e a combinação destes elementos com o oxigênio é que promove a liberação de calor (TURNS, 2013). Combustíveis derivados de petróleo apresentam uma mistura de vários hidrocarbonetos, que são a parte principal de combustíveis orgânicos usados em motores de combustão interna (MCI) e são os hidrocarbonetos que têm grandes poderes caloríficos. Vapores dos hidrocarbonetos de combustíveis facilmente misturam-se com o ar atmosférico e formam uma mistura combustível (HEYWOOD, 1988). O calor de combustão representa a energia liberada por unidade de massa, ou volume de combustível, quando oxidado completamente forma dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O) (MENEZES, 2009).

Para motores ciclo Diesel, os processos de pulverização e carburação do combustível no cilindro são fundamentais para a qualidade da combustão. O início da combustão é determinado pelo aumento da pressão no cilindro e a autoinflamação do combustível. A autoinflamação determina o intervalo do tempo entre início de injeção e início de combustão e é característica do número de cetano. Assim, quanto menor o número de cetano maior será o retardo da ignição, conseqüentemente, maior será a quantidade de combustível que permanecerá na câmara sem queimar no tempo certo. Combustíveis com alto número de cetano acarretam um avanço na ignição, aumentando a temperatura na câmara e, conseqüentemente, aumentando a formação de material particulado (MP) (MENEZES; CATALUÑA VESES, 2008). Combustíveis com alto teor de parafinas apresentam alto número de cetano, enquanto produtos ricos em hidrocarbonetos aromáticos apresentam valores baixos (HEYWOOD, 1988).

Com relação aos hidrocarbonetos formados a partir da combustão incompleta do diesel e do óleo lubrificante, estes ficam adsorvidos sobre a superfície do material particulado. Os hidrocarbonetos não queimados, formados nas regiões frias da câmara de combustão, ou seja, junto às paredes, ou na região onde a mistura é muito diluída, impede a propagação da chama. Esta aglomeração de não queimados, núcleos carbônicos, começa na câmara de combustão e continua até a descarga (HEYWOOD, 1988).

As emissões de poluentes gerados pelos motores ciclo Otto e ciclo Diesel contribuem significativamente para a deterioração da qualidade do ar no meio ambiente. Vários compostos provenientes do processo de combustão nestes motores apresentam perigos à saúde, cujas emissões são regulamentadas, resolução CONAMA nº491 de 2018, e outras não estão regulamentadas: hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), aldeídos, amônia, benzeno (NEEFT; MAKKEE; MOULIJN, 1996).

Os principais poluentes associados à queima de óleo diesel são o CO<sub>2</sub>, óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), óxido de enxofre (SO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), material particulado (MP) e hidrocarbonetos (HC), enquanto alguns poluentes como o CO, HC e MP são resultantes combustão incompleta do combustível, o NO<sub>x</sub> está diretamente associado às elevadas taxas de compressão e temperatura no interior da câmara de combustão, o SO<sub>x</sub> está relacionado à presença de enxofre no combustível (ASSESSMENT; DIVISION, 2002).

### 3.6. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

O monóxido de carbono é gás inodoro, incolor, inflamável e que pode ser prejudicial quando inalado em grandes quantidades, e tem limite de exposição 25 ppm (parte por milhão v/v) (HYGIENISTS, 2017). Pode estar presente nos gases de exaustão dos motores a diesel como o resultado da incompleta combustão dentro dos cilindros dos motores de combustão, devido, principalmente, à deficiência do oxigênio dentro da mistura combustível-ar ou também como é conhecido mistura rica (AMBARITA, 2017; SCHIRMER et al., 2017). Também, mesmo em misturas pobres o monóxido de carbono é formado devido à combustão incompleta no interior das câmaras de combustão.

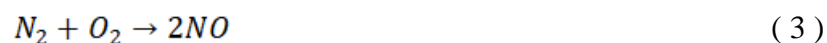
A exposição ao monóxido de carbono pode causar vários efeitos adversos à saúde, que variam de dor de cabeça e fadiga ao coma e até a morte. A geração de monóxido de carbono em equipamentos, como a combustão em motores e geradores, foi identificada como a fonte mais comum de envenenamento com monóxido de carbono. A maioria dos eventos de envenenamento por monóxido de carbono pode ser atribuído à má ventilação e à falta de proteção respiratória individual eficaz (IQBAL et al., 2012).

### 3.7. ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO<sub>x</sub>).

O termo NO<sub>x</sub> é aplicado aos óxidos de nitrogênio emitidos pelo motor. O óxido de nitrogênio formado na combustão do motor é o NO (óxido nítrico), e este óxido passa a NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio) durante a exaustão para a atmosfera. O mecanismo de formação de NO<sub>x</sub> ( Equações 1,2,3 ) envolve o oxigênio do ar e o nitrogênio na zona de queima do gás (GUIBET; FAURE-BIRCHEM, 1999; MENEZES, 2009).



A reação global é expressa pela equação:



A velocidade de formação de NO cresce de maneira exponencial com a temperatura de combustão, tem um valor máximo em misturas ligeiramente pobre e variam

consideravelmente como função dos parâmetros que modificam a temperatura local no interior da câmara de combustão (SUN; CATON; JACOBS, 2010) (MENEZES, 2009).

Nos gases de exaustão dos motores a diesel,  $\text{NO}_x$  é predominantemente composto de  $\text{NO}$  e em menor quantidade de  $\text{NO}_2$ , a maioria das condições analíticas, outros óxidos de nitrogênio são formados como  $\text{N}_2\text{O}$  (óxido nitroso), e  $\text{N}_2\text{O}_5$  (pentóxido de nitrogênio) em quantidades desprezíveis (HOEKMAN; ROBBINS, 2012).

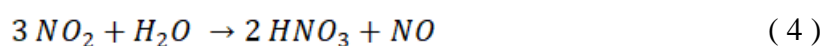
Há três principais mecanismos de formação do  $\text{NO}_x$ :  $\text{NO}_x$  térmico,  $\text{NO}_x$  imediato,  $\text{NO}_x$  combustível (DE BLAS, 1998;HOEKMAN; ROBBINS, 2012). O  $\text{NO}_x$  térmico é formado dentro da câmara de combustão de um motor a diesel em altas temperaturas;  $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$  podem reagir através de uma série de etapas químicas conhecidas como o mecanismo de Zeldovich. A formação de  $\text{NO}_x$  ocorre a temperaturas acima de  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  e a taxa de formação aumenta rapidamente com o aumento da temperatura, sob a maioria das condições de combustão do motor a diesel. Acredita-se que o  $\text{NO}_x$  térmico é o contribuinte predominante para o  $\text{NO}_x$  total (HEYWOOD, 1988) (FERNANDO; HALL; JHA, 2006) (SUN; CATON; JACOBS, 2010).

O  $\text{NO}_x$  imediato é relativo à química do combustível, enquanto o  $\text{NO}_x$  térmico é relativo à temperatura da combustão. Embora se reconheça que o  $\text{NO}_x$  térmico geralmente domina o total de formação de  $\text{NO}_x$ , alterações na química do combustível ou condições de combustão podem mudar a importância relativa do  $\text{NO}_x$  térmico e imediato (CHENG; UPATNIEKS; MUELLER, 2006; HOEKMAN;ROBBINS,2012). Em processos convencionais que operam com quantidade de ar acima da estequiométrica, a formação de  $\text{NO}_x$  imediato não é significativa (VERGNHANINI FILHO, 2017).

O  $\text{NO}_x$  do combustível forma-se no processo de combustão pela reação do nitrogênio do combustível com oxigênio. Os níveis naturais de nitrogênio no diesel fóssil e no biodiesel são extremamente baixos e esse processo de formação de  $\text{NO}_x$  pode ser considerado insignificante. Esse processo de formação pode se tornar mais significativo quando utilizados aditivos de combustível contendo nitrogênio em alta concentração (HOEKMAN; ROBBINS, 2012).

O  $\text{NO}$  puro é praticamente inofensivo, mas pode oxidar-se facilmente formando dióxido de nitrogênio, através de reação com oxigênio, com ozônio e até com radicais peróxidos presentes na atmosfera (ALLOWAY; AYRES, 1997). Além disso, também pode diminuir as concentrações de ozônio na estratosfera, contribuindo com a destruição da camada de ozônio (HARRISON, 1982).

O  $\text{NO}_2$  é um gás muito tóxico, reagindo com todas as partes do corpo expostas ao ar, pele e mucosas, provocando lesões celulares e inflamações no sistema respiratório, desde a cavidade nasal até a profundidade dos alvéolos pulmonares. Em caso de intoxicação grave, a inalação provoca edema pulmonar, hemorragias alveolares e insuficiência respiratória, causando morte. O  $\text{NO}_2$  pode reagir com o vapor da água e formar ácido nítrico (Equação 4). Este comportamento é análogo à formação do dióxido de enxofre em ácido sulfúrico, sendo esses dois óxidos os principais responsáveis pelo fenômeno da chuva ácida (LOPES, 1997).



### 3.8. MATERIAL PARTICULADO (MP)

O material particulado produzido em motores diesel é constituído, basicamente, de carbono elementar, hidrocarbonetos condensados, sulfatos, água associada e partículas metálicas (AGARWAL et al., 2015). É formado em altas temperaturas na câmara de combustão, a partir de gotículas individuais, envolvendo uma sequência de passos elementares: pirólise, nucleação, crescimento e coagulação, agregação e oxidação (MENEZES, 2009). Pirólise é o processo no qual compostos orgânicos como combustíveis sofrem uma mudança na estrutura molecular a altas temperaturas sem concentração suficiente de oxigênio; a etapa de nucleação é o processo no qual partículas são formadas a partir de reagentes da fase gasosa, e este processo de nucleação leva à produção de um grande número de partículas muito pequenas; na etapa de crescimento superficial, o tamanho do material particulado é majoritariamente aumentado e, na fase gasosa, a deposição de hidrocarbonetos ocorre na superfície das esférulas que se desenvolvem para formar os núcleos. E parece ser principalmente acetilenos que, finalmente, levam a um aumento na massa de fuligem, enquanto o número de partículas permanece constante; na fase de coalescência e aglomeração, são os processos em que ocorrem a combinação de partículas. Uma vez que as partículas tenham sido formadas, colisões entre partículas podem levar à aglomeração. Isso pode levar a diminuir o número de partículas e aumentar seu tamanho. Nestes dois processos, as partículas esféricas colidirão entre si e finalmente resultarão em sua coagulação em um único esferóide; na fase de oxidação, o processo de formação de fuligem

ocorre com as moléculas de carbono ou hidrocarbonetos que se oxidam em produtos de combustão. O processo físico de formação de fuligem depende de várias condições como pressão, temperatura, parâmetros de injeção e estrutura de combustível (MOHANKUMAR; SENTHILKUMAR, 2017).

Em geral a composição e estrutura do combustível desempenham um papel importante na formação de material particulado. A composição do combustível é determinado por seu conteúdo, e consiste principalmente de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, e substâncias como o sulfato e chumbo, que aumentam a formação da fração orgânica solúvel e, conseqüentemente, aumenta a massa de fuligem (BARRY et al., 1985). A estrutura do combustível é determinada por sua estrutura de ligação, localização e tipo de ligação, que compõem as moléculas nos combustíveis (CALCOTE; MANOS, 1983). Combustível com maior teor de carbono em sua composição tem grande tendência a produzir fuligem, enquanto o teor de oxigênio dentro do combustível reduz a taxa de formação de fuligem (OLSON; PICKENS; GILL, 1985). O conteúdo de hidrogênio no combustível também influencia a taxa de formação de fuligem; combustível com menos conteúdo de hidrogênio produz mais fuligem. O teor de enxofre não está diretamente envolvido no processo de formação, mas é responsável por aumentar a massa particulada por oxidação e, em seguida, por se ligar a partículas de fuligem, resultando em aumento do tamanho e da massa das partículas (GÜLDER, 1995) (MOHANKUMAR; SENTHILKUMAR, 2017).

Na combustão em motores ciclo Diesel o MP consiste, basicamente, de aglomerados de núcleos de carbono e de hidrocarbonetos,  $SO_3$  ou ácido sulfúrico e água, adsorvidos ou condensados sobre esses núcleos carbônicos (NEEFT; MAKKEE; MOULIJN, 1996).

O uso de biodiesel como combustível reduz o MP, por baixo teor de enxofre e aromáticos e também contém quase 10 % de oxigênio, que melhora o processo de combustão. Um breve resumo de estudos com o uso de biodiesel:

Awad e colaboradores (2014), usando motor diesel, monocilindro, e biodiesel proveniente de resíduos de gordura animal: houve redução de MP em todas as faixas de carga, principalmente a baixa e média cargas, a redução de MP é devido, segundo o pesquisador, ao aumento na fração orgânica solúvel nestas condições operacionais (AWAD; LOUBAR; TAZEROUT, 2014)

Barrios e colaboradores (2018), usando motor diesel, monocilindro, e biodiesel proveniente de óleo de soja: houve redução no diâmetro médio das partículas,

devido principalmente ao aumento do nível de saturação de ácidos graxos (DOMÍNGUEZ-SÁEZ; RATTÁ; BARRIOS, 2018)

Young e colaboradores (2012), usando motor diesel de serviço pesado, e biodiesel (B2,B10 e B20), proveniente de óleo residual de frituras: houve aumento na concentração de número de partículas ao aumentar a porcentagem de carga e redução com a adição de misturas de biodiesel, devido principalmente o teor de oxigênio no biodiesel que promove a oxidação do combustível.(YOUNG et al., 2012).

### 3.9. BLACK CARBON (BC)

BC é uma forma sólida, principalmente de puro carbono, que absorve radiação solar (luz) em todos os comprimentos de onda, é a forma mais eficaz de material particulado para absorver a energia solar e é produzido por combustão incompleta (SASSER et al., 2012).

Existe uma variedade de fontes naturais e antropogênicas de partículas de BC, que incluem tipicamente uma mistura complexa de materiais. Fontes antropogênicas incluem móveis e estacionárias (fontes de geração de energia; caldeiras industriais, comerciais, fontes residenciais de combustão), motores ciclo Diesel (especialmente motores mais antigos) e, em menor escala, motores de ignição por centelha (ciclo Otto) (ASSESSMENT; DIVISION, 2002). Os incêndios florestais são a principal fonte natural de BC. As partículas de BC possuem composições dependendo de suas fontes, por vezes, sendo principalmente carbono elementar, mas, muitas vezes, existentes como misturas complexas de carbono elementar, carbono orgânico e outras espécies não-carbono, como espécies iônicas e traços de metais (NI et al., 2014).

É importante ressaltar que o BC é reconhecido por ter impactos adversos à saúde pública, carregando compostos carcinogênicos e ao clima (BRIGGS; LONG, 2016). As evidências científicas atualmente disponíveis sobre os efeitos na saúde do BC são geralmente consistentes com a literatura de efeitos na saúde abordando material particulado MP(2,5) (partículas de diâmetro aerodinâmico  $\leq 2,5$  micrômetros), apresentando a evidência mais consistente de efeitos cardiovasculares (SASSER et al., 2012).

### 3.10. ESTUDOS DE BIOCOMBUSTÍVEIS EM MOTORES DIESEL

O biodiesel ainda não é utilizado isoladamente em motores a diesel disponíveis atualmente. Apesar da semelhança ao diesel mineral, podem ocorrer falhas por entupimento e pulverização das partículas, devido principalmente à sua elevada massa específica e viscosidade (KNOTHE; RAZON, 2017). A partir de resultados de diversos estudos é possível observar o comportamento dos motores a diesel com o uso de misturas de diesel com biodiesel, e estes comportamentos são variáveis por distintas condições operacionais, fabricantes, modelos, potência envolvida, combustíveis, mecanismos e diversos controles.

Alguns estudos recentes sobre o uso de biocombustíveis nos motogeradores e também nos motores de combustão interna de ciclo diesel, mostram comportamentos variáveis, tanto na emissão de gases quanto na performance do motor. Alguns dos estudos mais relevantes são revisados ao longo da presente seção:

De Paulo e colaboradores (2016) estudaram a performance do motor ciclo diesel, usando o motogerador, de potência de 13 kVA e misturas variáveis de combustíveis, biodiesel, proveniente de óleo residual de frituras, e diesel mineral de petróleo. Os experimentos com as misturas de combustíveis foram: B5 (5 % v/v de biodiesel e 95 % v/v diesel mineral) e assim, em sequência, B20, B30, B50, B75 e B100 (100 % biodiesel). A operação com o motogerador, foi estabelecido, com carga resistiva e constante de 11 kW. Eles observaram que, ao acrescentar as misturas de biodiesel no diesel, havia aumento na temperatura dos gases de exaustão. Anotaram a temperatura dos gases de exaustão do motogerador em 440°C, usando o combustível B5, e também observaram que a temperatura dos gases de exaustão estava em contínua elevação com o aumento da porcentagem de mistura de biodiesel, aproximando-se em 480°C com o combustível B100. Anotaram também que o consumo específico de combustível alterava com as misturas experimentadas, obtendo: 0,295 kgkWh<sup>-1</sup> usando o combustível B5; 0,257 kgkWh<sup>-1</sup> usando o combustível B20; 0,274 kgkWh<sup>-1</sup> usando o combustível B30; 0,287 kgkWh<sup>-1</sup> usando o combustível B100. Observaram também, nas análises dos gases de exaustão, que a concentração de oxigênio (O<sub>2</sub>) permaneceu próximo de 12 % e a concentração de CO<sub>2</sub>, permaneceu próximo de 6 % (DE PAULO et al., 2016).

Rosa e colaboradores (2014) estudaram a performance e emissões em motogerador com potência elétrica do gerador de 5,0kW, e potência do motor acoplado, ciclo

diesel, com potência 7,6 kW. Nos experimentos, foram usados dois combustíveis: biodiesel, oriundo de óleo de crambe, e diesel mineral de petróleo. Na operação com o motogerador, foi estabelecido o uso em diferentes cargas resistivas: 1,0 kW; 2,0 kW; 3,0 kW; 4,0 kW; 5,0 kW. Eles observaram também que o consumo específico dos combustíveis não apresentou variação expressiva ao aumentar a carga do motogerador, permanecendo a diferença, próxima de 1,2 % (ROSA et al., 2014).

QI e colaboradores (2010) estudaram as características de combustão e desempenho, abastecido com combustíveis de misturas de biodiesel de óleo de soja, rota metálica, e diesel mineral de petróleo. No experimento foi realizado com o motor de injeção direta, ciclo diesel, quatro tempos, monocilindro e potência nominal de 11,03 kW, abastecido com as seguintes misturas: AS-500 (100 % v/v diesel mineral); B30 (30 % v/v biodiesel e 70 % v/v diesel mineral); B50; B80; e B100 (100 % v/v biodiesel). A carga foi aplicada ao motor pelo dinamômetro, em diferentes porcentagens: desde 15 % até 90 % da carga nominal do motor, em etapas aproximadas de 15 %. Observaram redução no consumo específico de combustível, ao aumentar a carga no motor, em todas as misturas de combustíveis testadas, mas também observaram aumento no consumo específico de combustível, ao aumentar a mistura de biodiesel. Nas emissões gasosas, observaram também acréscimo na emissão de NOx, ao aumentar a mistura de biodiesel. Segundo os mesmos autores, o consumo específico do motor a diesel depende da relação entre o sistema de injeção volumétrico de combustível, densidade do combustível, viscosidade e valor do poder calorífico inferior, e mais biodiesel e suas misturas são necessárias para produzir a mesma quantidade de energia, devido ao menor valor calorífico em comparação com o combustível a diesel (QI et al., 2010).

Valente e colaboradores (2012) avaliaram misturas de combustíveis com 5 %, 20 %, 35 %, 50 % e 85 % v/v de biodiesel de soja rota metálica com óleo diesel mineral, variando a carga do motor, no intervalo de 9,6 kW a 35,7 kW. Foram avaliados consumo específico de combustível e emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrocarbonetos. O motor foi mantido com as configurações originais em operação com óleo diesel. Os resultados, frente ao AS-500, mostraram acréscimo de consumo específico de combustível, acréscimo nas emissões de HC, ao aumento de mistura de biodiesel. No menor consumo específico registrado em torno de 28 kW, que corresponde a cerca de 2/3 da potência máxima nas emissões de CO<sub>2</sub>, houve acréscimo de 4,6 % B5 a 11,9 % B85. As maiores emissões de CO<sub>2</sub> a baixas cargas; as maiores misturas de biodiesel produziram maiores níveis de emissão de CO. (VALENTE et al., 2012).

Yilmaz e colaboradores (2016) também observaram que a variação na emissão de CO nos gases de exaustão está em função da variação da carga imposta ao motor e quanto maior a carga imposta maior a porcentagem de CO emitida devido à mistura ser mais rica. Avaliaram também que o B100 (100 % v/v biodiesel) em relação ao AS-500 (100 % v/v diesel), devido à maior densidade e viscosidade do biodiesel em relação ao diesel deixa as gotículas maiores e pobre atomização nos injetores, criam evaporação mais lenta, resultando maiores emissões de CO. A redução no número de cetano (atraso na ignição do combustível) e o aumento na entalpia de vaporização do combustível também aumenta a formação de monóxido de carbono (ATMANLI, 2016).

O biodiesel difere do diesel fóssil em vários aspectos, dentre eles as diferenças mais significantes são as altas taxas de oxigênio e grau de insaturação presentes no biodiesel, que são responsáveis pelas diferenças de outras propriedades físicas e químicas, como maior densidade específica, viscosidade, ponto de ebulição e menor conteúdo de carbono em massa, hidrogênio e conteúdo energético (HOEKMAN et al., 2011;HOEKMAN; ROBBINS, 2012).

A mistura de biodiesel ao diesel contribui para formação do NO<sub>x</sub>, observado em estudos experimentais. Em estudo sobre o efeito do biodiesel na potência do motor, no consumo de combustível e na eficiência térmica, reportou que B100 produz aproximadamente 10 % mais NO<sub>x</sub> que o diesel AS-500 (LAPUERTA; ARMAS; RODRIGUEZ-FERNANDEZ, 2008). Em artigo de revisão sobre emissão de NO<sub>x</sub> em motores com misturas de diesel e biodiesel indica que não há uma consistente razão para o aumento na emissão NO<sub>x</sub> com aumento de biodiesel. Por outro lado, condições operacionais, câmara de combustão, mistura ar e combustível são razões para aumento da emissão de NO<sub>x</sub> com biodiesel (HOEKMAN; ROBBINS, 2012). A taxa de combustão mais rápida do biodiesel, como a razão potencial para maiores emissões de NO<sub>x</sub>, a ignição mais rápida do biodiesel aumentam a temperatura e pressão na câmara de combustão, levando a formação térmica do NO<sub>x</sub> (FERNANDO; HALL; JHA, 2006). NO<sub>x</sub> é uma mistura de gases (NO + NO<sub>2</sub>), formado pela combustão a elevadas temperaturas (DE PAULO et al., 2016).

O uso de biodiesel como combustível reduz o MP, por baixo teor de enxofre e aromáticos e também contém quase 10 % de oxigênio, que melhora o processo de combustão. Um breve resumo de estudos com o uso de biodiesel:

Awad e colaboradores (2014), usando motor diesel, monocilindro, e biodiesel proveniente de resíduos de gordura animal: houve redução de MP em todas as faixas

de carga, principalmente a baixa e média cargas, a redução de MP é devido, segundo o pesquisador, ao aumento na fração orgânica solúvel nestas condições operacionais (AWAD; LOUBAR; TAZEROUT, 2014).

Barrios e colaboradores (2018), usando motor diesel, monocilindro, e biodiesel proveniente de óleo de soja: houve redução no diâmetro médio das partículas, devido principalmente ao aumento do nível de saturação de ácidos graxos (DOMÍNGUEZ-SÁEZ; RATTÁ; BARRIOS, 2018).

Young e colaboradores (2012), usando motor diesel de serviço pesado, e biodiesel (B2,B10 e B20), proveniente de óleo residual de frituras: houve aumento na concentração de número de partículas ao aumentar a porcentagem de carga e redução com a adição de misturas de biodiesel, devido principalmente o teor de oxigênio no biodiesel que promove a oxidação do combustível (YOUNG et al., 2012).

## **4. METODOLOGIA**

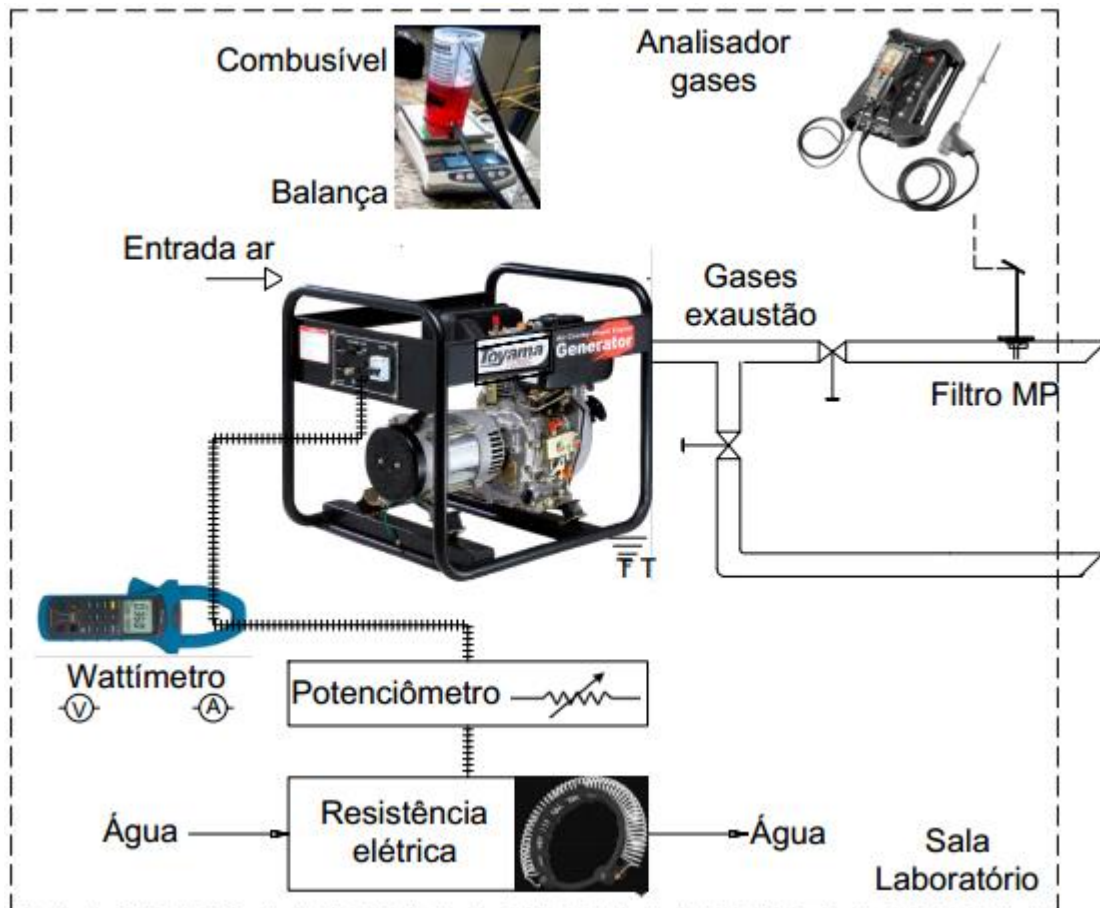
### **4.1. DESCRIÇÃO DA BANCADA DE TESTES**

Uma visão geral da bancada de testes encontra-se esquematizada a seguir (Figura 6). A bancada de testes encontra-se instalada no Laboratório de Sistemas Térmicos (TSL) da UTFPR-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus de Londrina. O conjunto de equipamentos é composto por motogerador diesel, reservatório e o combustível a ser estudado; resistência elétrica modulada por potenciômetro; dispositivo de dissipação de calor por fluxo constante de água; sensores de temperatura tipo termopares; unidade de aquisição e comutação e registro de dados; balança de precisão; microcomputadores; medidor de potência elétrica; porta-filtro de coleta de material particulado e analisador de gases.

Os experimentos foram realizados com um motogerador diesel monofásico, marca Toyama, modelo TD2500C5. Este modelo de motogerador de pequeno porte é um equipamento que apresenta um motor ciclo Diesel acoplado ao gerador elétrico com dupla saída de tensão elétrica, usado para fornecimento de energia elétrica, principalmente para equipamentos como ferramentas manuais ou para fornecimento de energia emergencial. O gerador elétrico está acoplado diretamente ao motor ciclo diesel, dois polos (rotação 3600 rpm), frequência 60Hz, potência nominal 2,0 kW, tensão de saída nominal 127V e 220V, regulador de tensão com capacitor, corrente nominal alternada 18,2A/9,1A, monofásico, fator

de potência 1. O motor é ciclo Diesel, monocilindro, refrigeração a ar, rotação 3600 rpm e potência máxima de 3,51 kW.

**Figura 6** - Estrutura de montagem do trabalho



A admissão de ar para a câmara de combustão do motogerador a diesel é diretamente succionado pelo motor, isento de dispositivo de controle de vazão volumétrica. A vazão de ar atmosférico, para operação do motor, provém do ambiente da sala do laboratório. Este fluxo de ar, para combustão no motor, tem a temperatura continuamente monitorada, por intermédio de termopar tipo K.

Após o ciclo de combustão, os gases de exaustão formados são expelidos para o escapamento do motor, e um prolongamento neste duto foi instalado para exaustão dos gases para o ambiente externo ao laboratório, com tubo diâmetro interno de 32mm. Neste duto prolongado, foi adaptado um desvio tipo "by-pass" com duas válvulas tipo gaveta, permitindo a troca do filtro de material particulado durante as amostragens. Neste mesmo

duto de descarga, é instalado a haste de sucção do analisador de gases para monitoramento dos gases.

O tanque de armazenagem de combustível, existente no conjunto motogerador foi retirado para melhor manuseio e substituição do combustível a ser testado. Foi usado um bequer volume de 1,0 L. Do béquer o combustível flui, por mangueira apropriada, alimentando por gravidade a sucção da bomba de deslocamento positivo incorporado internamente ao motor. O combustível excedente (o combustível que não é injetado pelo bico de atomização na câmara de combustão) retorna por outra mangueira ao mesmo béquer. O consumo de combustível foi determinado pela (Equação 5) e, para otimizar as medições de massa de combustível consumida durante os experimentos, o bequer de polipropileno instalado sobre o centro na balança foi posicionado sobre a bancada fixa, isenta de vibração na sala do laboratório.

A vazão mássica de combustível foi determinada a partir da (Equação 5). Inicialmente é completo o volume do béquer ( 1 litro ) com o combustível a ser analisado, assim o motor em operação em torno de trinta minutos, garante que nas mangueiras contenham somente o combustível analisado. Após o aquecimento do motor inicia-se as análises do experimento. Para os resultados de consumo de combustível nos experimentos, o tempo é cronometrado entre o início e final da análise, e a massa consumida neste intervalo é anotada, após feito a tara na balança. Assim temos a vazão consumida em massa do combustível analisado. O tempo para as análises foi definido em 15 minutos após o tempo de estabilização das temperaturas do motor (óleo do cárter, bloco do motor e gases de exaustão). O fluxo foi então medido em 15 minutos, e em três réplicas, totalizando assim 45 minutos, o tempo total de análise a cada combustível analisado.

$$Q_c = \frac{m}{t} \quad (5)$$

Onde:

$Q_c$  é a vazão de combustível, em  $g\ s^{-1}$

$m$  é a massa de combustível, em g

$t$  é o tempo, em s

Para dissipação da energia produzida pelo motogerador é utilizada uma resistência elétrica resfriada por água corrente. O sistema de dissipação possui uma resistência

elétrica variável, controlada por um potenciômetro que regula a corrente, variando assim a potência ativa do gerador (fator de potência igual a um). Um alicate wattímetro é utilizado para monitorar continuamente a corrente (em ampere) e a tensão elétrica (em volts); detalhes adicionais encontram-se no anexo 3. O produto destes fatores resulta a potência elétrica consumida. A potência elétrica medida é resistiva, então o produto destes fatores resulta a potência elétrica consumida (Equação 6). O valor da corrente e tensão, foi anotado em planilha com três valores a cada segundo. Foram determinadas três potências resistivas, como *set-point*: A menor 0,5 kW; a intermediário 1,25 kW; a nominal 2,0 kW. A potência elétrica (carga), foi determinada com intervalo de tempo em 15 minutos, a partir dos valores da corrente e tensão anotados na planilha, e com três réplicas, totalizando 45 minutos de consumo de eletricidade.

$$P = V \cdot i \quad (6)$$

Onde:

$P$  é a Potência dissipada, em W

$V$  é a Tensão, em V

$i$  é a corrente, em A

O consumo específico de combustível é um indicativo da eficiência do conjunto motogerador para a produção do trabalho útil, a partir da energia do processo de combustão. O consumo específico de combustível ( $\text{kg kWh}^{-1}$ ) foi obtido através da razão entre a vazão mássica de combustível, que recalca para o motor ( $\text{kg h}^{-1}$ ), por unidade de potência elétrica dissipada na resistência elétrica, de acordo com a (Equação 7):

$$Cec = \frac{Qc}{P} \quad (7)$$

Onde:

$Cec$  é o Consumo específico de combustível, em  $\text{kg (kWh)}^{-1}$

$Qc$  é a vazão de combustível, em  $\text{kg h}^{-1}$

$P$  é a Potência dissipada, em kW

O rendimento térmico ( $\eta$ ) do motogerador foi calculado pela relação do consumo específico de combustível ( $Cec$ ) e a entalpia de combustão (Poder Calorífico Superior), conforme expresso na (Equação 8).

$$\eta = \frac{3600}{Cec \cdot PCS} \cdot 100 \quad (8)$$

onde :

$\eta$  é o rendimento térmico, em porcentagem

$Cec$  é o consumo específico de combustível, em Kg kWh<sup>-1</sup>

$PCS$  é o poder calorífico superior, em kJ kg<sup>-1</sup>

O valor do poder calorífico das misturas, (Equação 11), foi calculado de acordo com o percentual de massa de combustível, isto é, diesel e biodiesel, contida nas misturas (VLASSOV,2008) e a partir das análises de poder calorífico individuais, conforme equacionamento abaixo :

$$A = v_{diesel} \cdot PCS_{diesel} \cdot d_{diesel} \quad (9)$$

$$B = v_{biodiesel} \cdot PCS_{biodiesel} \cdot d_{biodiesel} \quad (10)$$

$$PCS_{Bx} = \frac{A+B}{d_{Bx}} \quad (11)$$

Onde:

$PCS_{Bx}$  é o poder calorífico superior da mistura BX, em kJ kg<sup>-1</sup>

Bx é a mistura de biodiesel, variável (B10; B20; B30)

$v_{diesel}$  é o volume de diesel, em mL

$d_{diesel}$  é a massa específica do diesel, kg m<sup>-3</sup>

$d_{Bx}$  é a massa específica da mistura Bx, kg m<sup>-3</sup>

$PCS_{diesel}$  é o poder calorífico superior do diesel, em kJ kg<sup>-1</sup>

$PCS_{biodiesel}$  é o poder calorífico superior do biodiesel, em kJ kg<sup>-1</sup>

As medidas de temperaturas foram obtidas por intermédio de sensores termopar tipo K. O sinal dos transdutores são enviados ao equipamento modelo Agilent 34972-A, que faz a aquisição e comutação destes dados e são transferidos para um computador. O registro da temperatura, em décimo de graus celsius e em intervalo de 5 segundos, foram listados em uma planilha no computador. Os transdutores foram posicionados nos seguintes pontos:

- temperatura de entrada de ar: próximo ao filtro de entrada, no duto de ar de admissão do motor, para registro da temperatura de ar de admissão;
- temperatura do bloco do motor: lateral externa nas aletas de refrigeração do bloco do motor, para registro da temperatura do bloco do motor;
- temperatura dos gases de exaustão: no duto de escapamento dos gases de exaustão do motor, para registro da temperatura dos gases de exaustão;
- temperatura do óleo do cárter: imerso no óleo do cárter, posicionado no orifício da vareta de inspeção do nível de óleo;
- temperatura ambiente: sobre a bancada do laboratório, aproximadamente um metro de distância do motogerador;
- temperatura do filtro: internamente na haste da sonda do instrumento de análises de gases, esta haste é instalada no duto a jusante do filtro de amostragem de material particulado.

O equipamento TESTO-350, com especificações técnicas apresentadas no anexo 2, é utilizado para monitoramento dos principais componentes dos gases de exaustão. A amostragem dos gases é realizada por uma sonda inserida no duto, a montante da filtragem do material particulado. Uma bomba peristáltica controla a vazão de gases amostrado em  $0,98 \pm 0,01 \text{ L min}^{-1}$ . A umidade presente nos gases de exaustão é removida por condensação, obtendo-se, assim, os resultados das frações volumétrica dos componentes em base seca. Os valores dos gases amostrados foram compilados em planilha, em intervalos a cada 10 segundos. O período de amostragem foi determinada com intervalo de tempo em 15 minutos, com três réplicas, totalizando 45 minutos de amostragem por (carga) potência elétrica consumida. Estas medidas foram realizadas simultaneamente com o consumo de combustível e impactação do material particulado no filtro de fibra de vidro.

A coleta do material particulado foi realizada simultaneamente com as medições de vazão mássica do combustível, composição de gases de exaustão e temperaturas. A quantificação da fração sólida é realizada por análise gravimétrica. As partículas foram

depositadas em filtros de membrana de vidro de 37mm de diâmetro e porosidade de 1,2mm, Macherey-Nagel<sup>®</sup>. Os filtros foram tratados previamente por 6 horas a 100<sup>o</sup>C e mantidos em dessecador por 24 horas para estabilização de temperatura e umidade relativa. A seguir, foram pesados em balança analítica com precisão de 1,0 µg, Mettler Toledo – modelo AX26, e devidamente acondicionados até a hora da amostragem. Após as coletas, os filtros foram deixados em dessecador por 24 horas para estabilização da temperatura e umidade e pesados novamente. O filtro foi posicionado em suporte para porta-filtros em aço inox que foi diretamente instalado no orifício do tubo de escapamento do motogerador diesel. A vazão dos gases, que permeava o filtro, foi mantido em fluxo constante em 0,98±0,01 L min<sup>-1</sup>. O tempo de amostragem foi estabelecido em 15 minutos. A coleta de material particulado nos filtros foi realizada em três réplicas por mistura de diesel e biodiesel. Após o posicionamento do filtro no porta-filtro, o tempo foi cronometrado. Ao final do tempo de amostragem (15 minutos), os gases do escapamento do motor foram desviados para a atmosfera, retirado o filtro com pinça e colocado em recipiente para posterior secagem e pesagem em balança de precisão no laboratório da UEL.

Para análise de BC, foi utilizado o refletômetro EEL Model 43D, através do método óptico EELS reflectometer. Para determinação do BC em uma amostra, utilizou-se o resultado da refletância de luz reduzida pelo material particulado. Este procedimento consiste em iluminar o filtro analisado por uma lâmpada, e a luz refletida, que é detectada em porcentagem por um fotosensor no instrumento da *Diffusion System (EEL Model 43D)*, é inversamente proporcional à absorvida que, por sua vez, é função da quantidade de material absorvedor. A operação é ligar o instrumento e permanecer até 5 minutos, colocar um filtro limpo (lado liso para cima) sobre o padrão branco da placa de teste e colocar a máscara sobre ele, colocar o caneco sensor sobre a máscara e ajustar a sensibilidade para obter uma leitura de 100 ± 2. Trocar o filtro limpo por um filtro com a amostra que se deseja medir, colocar o caneco com máscara sobre o filtro com amostra e registrar a leitura diretamente do visor do instrumento.

As medidas de BC foram determinadas com o intervalo de tempo de 15 minutos, com três réplicas na área do filtro em que o material particulado foi impactado, e então aplicada a seguinte equação (Equação 12), fornecida pela fabricante (*Diffusion Systems Ltd., London, UK*) para determinação do BC.

$$BC = \frac{(0,3724) \left( e^{5,52 - \frac{0,51}{\ln(R)}} e^{-0,84 \ln(R)} \right) (A)}{V} \quad (12)$$

Onde :

$BC$  é a concentração de carbono negro, em  $\mu\text{g m}^{-3}$

$A$  é a área do filtro, em  $\text{cm}^2$

$V$  é o volume amostrado, em  $\text{m}^3$

$R$  é a refletância, em %

#### 4.1.1. COMBUSTÍVEIS

Dois combustíveis foram utilizados: diesel (AS-500) e biodiesel (B-100). O diesel (AS-500) foi fornecido pela Petrobrás Distribuidora Londrina-Pr. O Diesel AS-500 Petrobrás, com teor máximo de enxofre (500 PPM), faixa de variação da massa específica (820 a 850  $\text{kg/m}^3$ ) e uma curva de destilação com a temperatura dos 95 % evaporados no máximo 370°C. Essas propriedades também conferem benefícios na combustão e na partida a frio dos motores especificados, conforme ANP nº50/2013. O Diesel AS-500 (utilizado nos experimentos) é assim chamado por conter teor máximo de enxofre 500  $\text{mg kg}^{-1}$  ou 500 ppm (partes por milhão), sendo conhecido nos postos de abastecimento como diesel comum. Tem aspecto visual avermelhado por adição de corante vermelho. É um produto adequado, principalmente aos veículos a diesel fabricado antes de 1º de janeiro de 2012. Veículos fabricados a partir de 2012 devem usar o diesel S-10, diesel com 10 ppm de enxofre.

O biodiesel (B100), rota metílica, foi fornecido pela indústria Brazilian Oleochemical Ltda. Quatro amostras foram usadas no estudo: AS-500 (100 % v/v diesel), B10 (10 % v/v biodiesel), B20 (20 % v/v biodiesel) e B30 (30 % v/v biodiesel). As misturas foram elaboradas seguindo as equações (Equação 13) e (Equação 14), e os resultados e características físicas estão tabelados na tabela 1.

$$Vb = B_x \cdot (x) \quad (13)$$

$$Vd = B_x \cdot (1 - x) \quad (14)$$

Onde :

$V_b$  é o volume de biodiesel, em mL

$V_d$  é o volume de diesel, em mL

$B_x$  é o volume da mistura, em mL

$x$  é a concentração de biodiesel, em % v/v

As análises físico-químicas dos combustíveis e material particulado foram efetuadas nos Laboratórios da UEL-Universidade Estadual de Londrina.

As três amostras com misturas de diesel e biodiesel foram feitas no Laboratório da UEL-Universidade Estadual de Londrina (LAQUIBIO) e posterior análise físico-químicas; viscosidade cinemática, massa específica, estabilidade oxidativa e teor de água, realizadas no Laboratório de Pesquisa e Análise de Combustíveis-UEL.

A viscosidade cinemática foi obtida através de ensaio e foi realizado em viscosímetro da marca CANNON, modelo número 100, em banho térmico com termostato de marca JULABO.

A massa específica, o ensaio foi obtido utilizando o densímetro para petróleo e seus derivados líquidos de escala 0,800 a 0,850 g ml<sup>-1</sup> e 0,850 a 0,900 g ml<sup>-1</sup>.

A estabilidade oxidativa, o ensaio foi feito no equipamento RANCIMAT<sup>®</sup>, número 873, de marca Metrohm.

O teor de água foi realizado no equipamento 899 Coulometer de marca Metrohm.

As análises do poder calorífico, do combustível diesel e do combustível biodiesel foram ensaiadas pelo método ASTM D-240, no laboratório do Instituto de Tecnologia do Paraná-TECPAR e os resultados do poder calorífico das misturas destes combustíveis foram calculados de acordo com o porcentual de massa de cada mistura.

#### 4.1.2. PROCEDIMENTO DE EXPERIMENTOS

Foram definidas três potências resistivas, como *set-point*: A menor 0,5 kW; a intermediária 1,25 kW e a nominal 2,0 kW. Também foram definidas três misturas de combustíveis para análise conforme apresentado anteriormente: AS-500, B10, B20, B30.

Após ser completo o recipiente béquer com o combustível, e finalizar o aquecimento e estabilização de temperaturas do motor, ajusta-se o set-point da potência/carga

pelo potenciômetro. Em seguida, posiciona-se o filtro de coleta de material particulado, no porta filtro, instalado do duto de exaustão dos gases do motor. Este filtro foi preparado previamente no laboratório da UEL, numerado e anotado a massa inicial. A haste do analisador de gases é instalado no duto dos gases de exaustão do motor, a montante do filtro do MP, que por meio desta haste, faz-se a sucção dos gases a serem analisados. Para iniciar as medições faz-se a manobra de abertura e fechamento de válvulas, para desvio dos gases de exaustão do motor, a fim de que, parte desse fluxo seja permeado pelo filtro de MP e analisados no equipamento TESTO-350. Inicia-se então a cronometragem do período de amostragem, definido como escrito anteriormente em 15 minutos. Assim, é simultaneamente, impactado o MP no filtro, analisados os gases de exaustão, medido a massa consumida de combustível e registrado a tensão elétrica e corrente elétrica, que é potencializada da resistência elétrica.

Ao final desse período de amostragem, os resultados do experimento são anotados em planilhas, e o fluxo de gases é desviado no *by-pass*, com a manobra de fechamento e abertura de válvulas, permitindo assim, retirar o filtro impactado com MP e alocado em recipiente apropriado, para posterior análises no laboratório da UEL. Em seguida o motogerador é desligado, para resfriamento dos elementos do motogerador e limpo o porta filtro com hexano líquido.

Este procedimento experimental foi feito com três réplicas, com aleatória escolha do *set-point* da potência elétrica resistiva. A cada combustível experimentado totalizou o tempo de operação do motor em 2 horas e 15 minutos, com nove procedimentos experimentais. O resultado do procedimentos experimental, é a média aritmética das réplicas, anotados em planilha com o desvio padrão. Os Quadros 1 e 2 mostram a aleatoriedade do procedimento experimental conforme abaixo:

**Quadro 1** - Aleatoriedade do procedimento experimental dos combustíveis AS-500 e B10

Combustível					
AS-500			B10		
Procedimento experimental	Réplica	Potência Elétrica Set-Point (kW)	Procedimento experimental	Réplica	Potência Elétrica Set-Point (kW)
1	R 1	0,5	10	R 1	0,5
2	R 2	1,25	11	R 2	1,25
3	R 3	2,0	12	R 3	2,0
4	R 1	1,25	13	R 1	1,25
5	R 2	0,5	14	R 2	0,5
6	R 3	2,0	15	R 3	2,0
7	R 1	2,0	16	R 1	2,0
8	R 2	1,25	17	R 2	1,25
9	R 3	0,5	18	R 3	0,5

**Quadro 2** - Aleatoriedade do procedimento experimental dos combustíveis B20 e B30

Combustível					
B20			B30		
Procedimento experimental	Réplica	Potência Elétrica Set-Point (kW)	Procedimento experimental	Réplica	Potência Elétrica Set-Point (kW)
19	R 1	0,5	28	R 1	0,5
20	R 2	1,25	29	R 2	1,25
21	R 3	2,0	30	R 3	2,0
22	R 1	1,25	31	R 1	1,25
23	R 2	0,5	32	R 2	0,5
24	R 3	2,0	33	R 3	2,0
25	R 1	2,0	34	R 1	2,0
26	R 2	1,25	35	R 2	1,25
27	R 3	0,5	36	R 3	0,5

#### 4.1.3. ANÁLISES DE GASES DE EXAUSTÃO

As análises nos gases de exaustão, foram feitas juntamente com o comportamento das temperaturas que foram medidas: temperatura do ar atmosférico de

alimentação do motor, temperatura do bloco do motor, temperatura dos gases de exaustão, temperatura do óleo do cárter e temperatura ambiente. Os gases medidos foram:

- O oxigênio (O<sub>2</sub>), faixa de medição 0 a 25 %, volumétrica, com resolução centesimal, aquisição de dados em intervalo de 10 segundos;

- O monóxido de carbono (CO), faixa de medição de 0 a 10000 ppm, resolução 1 ppm, e sensor eletroquímico, aquisição de dados em intervalo de 10 segundos, e resolução 0,1 ppm.

- O monóxido de nitrogênio (NO), faixa de medição 0 a 300 ppm e resolução 0,1 ppm, exatidão  $\pm 2$  ppm, aquisição de dados em intervalo de 10 segundos;

- O dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), faixa de medição 0 a 500 ppm e resolução 0,1 ppm, exatidão  $\pm 5$  ppm, aquisição de dados em intervalo de 10 segundos;

- Os óxidos de nitrogênio, NO<sub>x</sub>, o resultado é calculado por somatório do teor de (NO+NO<sub>2</sub>);

- O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), faixa de medição 0 a 5000 ppm e resolução 1 ppm, exatidão  $\pm 5$  ppm, aquisição de dados em intervalo de 10 segundos.

É importante ressaltar que a calibração do equipamento foi realizado pelo fabricante do instrumento credenciado pelo INMETRO e ABNT NBR ISO/IEC 17025.

A concentração dos gases (CO; NO; NO<sub>2</sub>; NO<sub>x</sub>; SO<sub>2</sub>) foram corrigidos para um mesmo referencial de oxigênio. A Resolução SEMA-PR 016/14 apresenta em seu capítulo III, art. 22, dos padrões de emissão atmosférica por tipologia de fontes estacionárias potencialmente poluidoras, os padrões de emissão atmosférica, para processos de geração de calor ou energia. Em seu item VIII, estabelece os seguintes padrões de emissão considerando a condição referencial de oxigênio em 5 %, para motores estacionários. O resultado da (Equação 15) foi usado como fator referencial para correção para o mesmo referencial de oxigênio:

$$C_r = \frac{21 - O_r}{21 - O_m} \cdot C_m \quad (15)$$

Onde:

C<sub>r</sub> é a concentração corrigida para as condições referenciais, em ppm

O<sub>r</sub> é a concentração referencial de oxigênio, em 5 % v/v

O<sub>m</sub> é a concentração medida de oxigênio, em % v/v

C<sub>m</sub> é a concentração medida, em ppm

## 5. RESULTADOS

### 5.1. ANÁLISE DAS MISTURAS DE DIESEL FÓSSIL E BIODIESEL.

**Tabela 1** – Propriedades físicas das misturas de diesel fóssil e biodiesel

Especificação	Unidade	Mistura					Método
		Diesel	B10	B20	B30	B100	
Viscosidade cinemática [ 40°C]	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	2,958	3,063	3,196	3,274	4,379	D-445
Massa específica [ 20°C]	Kg m <sup>-3</sup>	842,3	846,3	849,3	851,3	876,3	D-1298
Poder Calorífico Superior	KJ kg <sup>-1</sup>	44,51	43,99*	43,52*	43,11*	39,77	D-240
Estabilidade oxidativa [110°C]	h					9,85	DIN EN-14112
Cor		Vermelho				Castanho claro	
Teor de água	Mg kg <sup>-1</sup>	31,1				59,0	D-6304

\* Calculado conforme Equação 11

**Fonte** : Laboratório de Pesquisa e Análise de Combustível-UEL e Instituto de Tecnologia do Paraná-TECPAR.

### 5.2. CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E POTÊNCIA ELÉTRICA.

O gráfico da Figura 7 mostra a média do consumo em massa de combustível com diferentes misturas (B10; B20; B30) e diesel AS-500, em três diferentes potências elétricas (carga) consumidas (0,5 kW; 1,25 kW; 2,0 kW). Esses resultados de vazão de massa de combustíveis são a média de três repetições para cada combustível, e a diferença entre os valores para cada teste foram menores que 5 %, e desvio padrão menor que 2,8 %. Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. Em geral, a figura indica que, ao aumentar a potência elétrica, há o aumento de vazão em massa de combustível consumida, evidenciando que o aumento do trabalho efetivo do motor é diretamente proporcional à energia disponível da combustão, conforme já esperado.

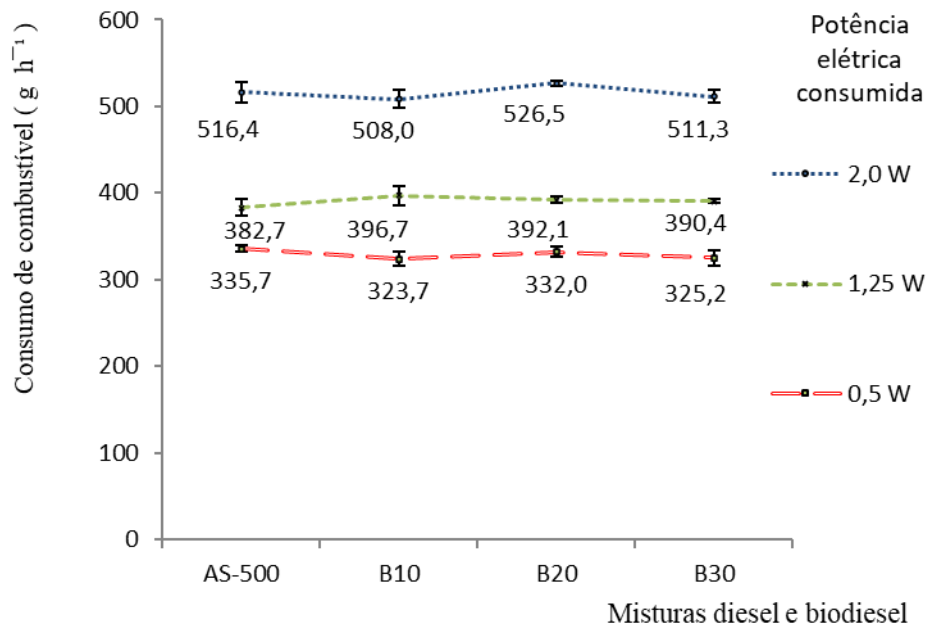
O menor consumo obtido de combustível foi com B10, em operação a 0,5 kW. O maior consumo de combustível foi com B20 em operação a 2,0 kW. O consumo de B20 em relação ao B10 tem acréscimo de 2,6 % e 3,6 %, em operação com 0,5 kW e 2,0 kW respectivamente, e decréscimo de 1,2 %, em operação com 1,25 kW.

O consumo de B30 em relação ao B10 tem acréscimo de 0,4 % e 0,6 %, em operação com 0,5 kW e 2,0 kW respectivamente, e decréscimo de 1,5 %, em operação com 1,25 kW.

Os resultados evidenciam que no intervalo de 10 % v/v a 30 % v/v de mistura de biodiesel, em operação com potência intermediária (1,25 kW), há pequena redução

no consumo de massa de combustível e aumento no consumo nas potências (0,5 kW e 2,0 kW).

**Figura 7-** Valores médios do consumo de combustível em função da potência elétrica.



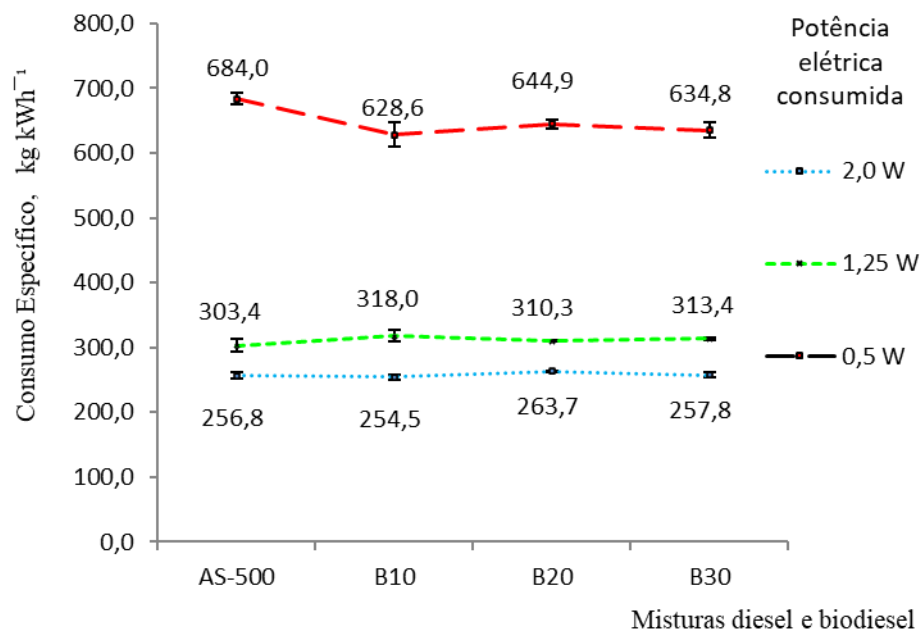
O consumo específico de combustível é um parâmetro de comparação muito usado para mostrar quão eficiente um motor transforma o combustível em trabalho e tem também maior aceitação que rendimento térmico, pois as variáveis envolvidas são medidas em unidade padrão (tempo, potência e massa).

O gráfico da Figura 8 mostra a média do consumo específico de combustível, com diferentes misturas (B10; B20; B30) e diesel AS-500, em três diferentes potências elétricas consumidas (0,5 kW; 1,25 kW; 2,0 kW). Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. Mostra também que, ao aumentar a potência elétrica, há redução no consumo específico de combustível, indicando uma operação mais eficiente do motor e uma conversão energética mais favorável.

O menor consumo específico de combustível foi com B10, em operação a 2,0 kW, devido possivelmente, à regulagem de fábrica com o combustível B10 em altas

cargas. O maior consumo específico de combustível foi com AS-500 em operação a 0,5 kW. O melhor resultado específico foi na maior potência, devido, principalmente, por capacidade de geração com melhor rendimento do motogerador. Na baixa carga, o consumo específico aumenta significativamente, devido à operação com maior excesso de ar, uma vez que boa parte da energia produzida no processo de combustão é utilizada para aquecer o ar (calor sensível), reduzindo a temperatura na câmara de combustão e conseqüentemente reduzindo a eficiência do ciclo termodinâmico.

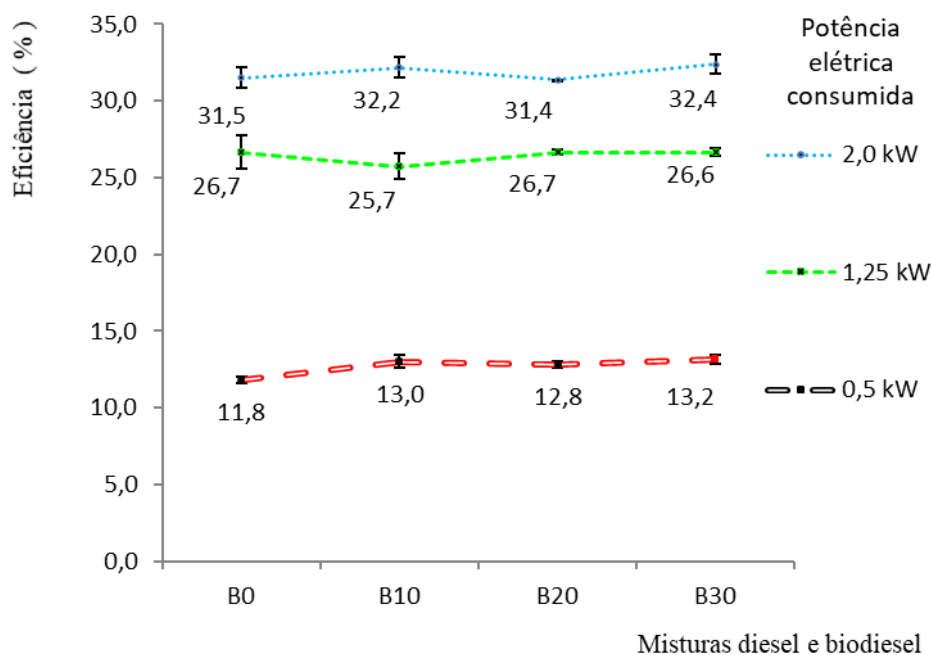
**Figura 8-**Valores médios do consumo específico do combustível em função da potência elétrica



O gráfico da Figura 9 mostra a média da eficiência do conjunto motogerador na conversão da energia química do combustível em energia elétrica, como foi calculado pela Equação 8, com diferentes misturas (B10; B20; B30) e diesel AS-500, em três diferentes potências elétricas consumidas (0,5 kW; 1,25 kW; 2,0 kW). Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. O melhor resultado na eficiência do conjunto motogerador foi observado com a mistura B30, 32,4 %, ou seja, 2,9 % acima do AS-500 e, também não houve diferença significativa da eficiência do B10 até a mistura B30, mostrando assim, que o comportamento de eficiência está

relacionado, principalmente, às variações entre as diversas cargas que são aplicadas com este motogerador. Para a baixa carga 0,5 kW, apresentou as menores relações entre a energia química do combustível e a geração de energia elétrica.

**Figura 9** – Valores médios da eficiência do motogerador



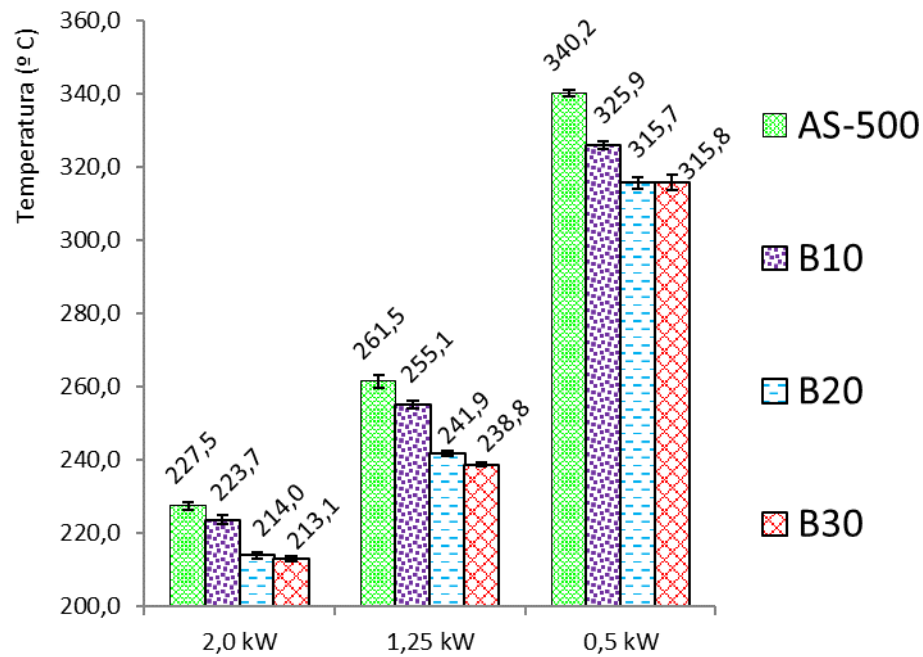
### 5.3. TEMPERATURAS

O gráfico da Figura 10 mostra a média da temperatura dos gases de exaustão, para os casos avaliados. Os desvios padrão estão mostrados no gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios.

Ao aumentar a potência elétrica, há o aumento de temperatura de gases de exaustão, devido, principalmente, à maior velocidade de queima do combustível, também reportado por (MENEZES; CATALUÑA VESES, 2008)(YILMAZ; ATMANLI, 2017).

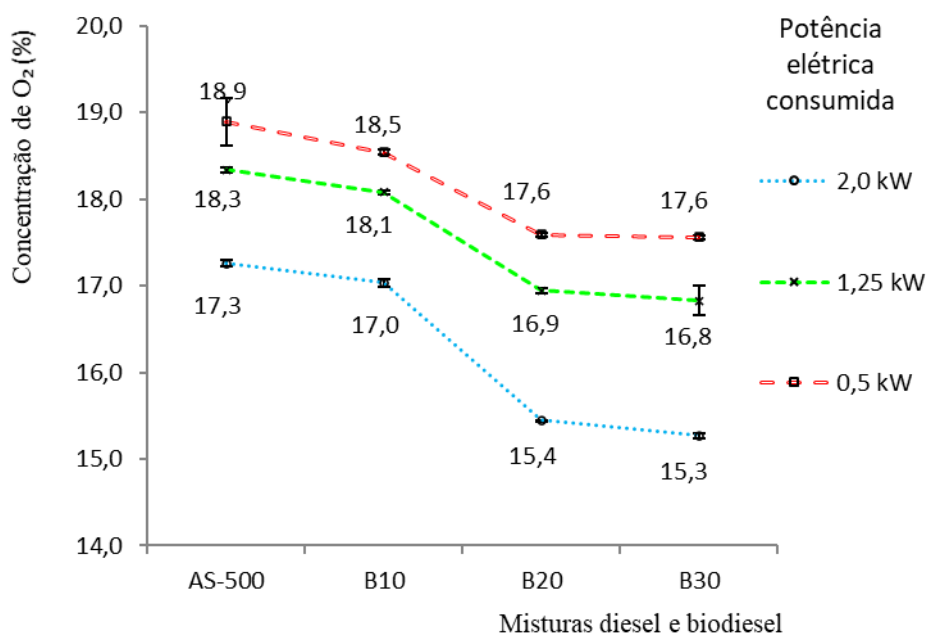
A menor temperatura dos gases de exaustão foi obtida com a queima de combustível B30, em operação a 0,5 kW. A maior temperatura dos gases de exaustão foi obtida com a queima de combustível AS-500, em operação a 2,0 kW. A temperatura dos gases de exaustão em relação ao AS-500 teve decréscimo de 6,3 %, 8,7 %, 7,2 % em operação com 0,5 kW, 1,25 kW e 2,0 kW respectivamente. Temperaturas maiores nos gases de exaustão podem contribuir para a redução no rendimento do motogerador.

**Figura 10** – Valores médios de temperaturas em função da potência elétrica dissipada.



#### 5.4. EMISSÃO DE OXIGÊNIO

No presente motor, com regulagem de fábrica, a vazão de massa de ar atmosférico é constante, independentemente da carga operacional. O gráfico da Figura 11 mostra a média do teor de oxigênio em porcentagem v/v de O<sub>2</sub> dos gases de exaustão, para as condições analisadas. Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. O gráfico mostra que ao aumentar a potência elétrica no motogerador há o decréscimo do percentual de oxigênio presente nos gases de exaustão, devido ao aumento do fluxo de combustível ao aumento de carga. O menor percentual (15,3 %) de oxigênio obtido foi com B30, em operação a 2,0 kW. O maior percentual (18,9 %) de oxigênio obtido foi com AS-500, em operação a 0,5 kW.

**Figura 11** – Valores médios da concentração de oxigênio dos gases exaustão

### 5.5. EMISSÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO

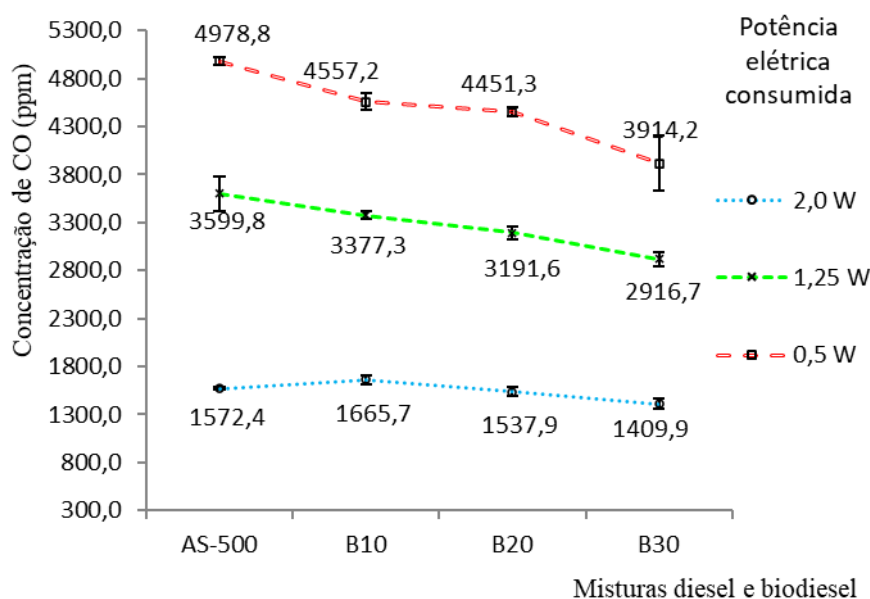
O gráfico da Figura 12 mostra a média da concentração de monóxido de carbono (ppm CO) dos gases de exaustão. Também mostra que, ao aumentar a potência elétrica consumida, há o decréscimo do percentual de monóxido de carbono presente nos gases de exaustão. Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. Os valores apresentados foram corrigidos para o referencial de 5 % de oxigênio.

O principal agente de formação de monóxido de carbono é a combustão incompleta (HOSEINI et al., 2017).

A menor quantidade (1409,9 ppm CO) de monóxido de carbono foi obtida com B30, redução de 10,3% em relação ao AS-500, em operação a 2,0 kW. A maior quantidade ( 4978,8 ppm CO) de monóxido de carbono foi obtida com AS-500, 21,4% maior que B-30, em operação a 0,5 kW. A redução na concentração de CO, com o aumento na carga

é resultado da melhor combustão em altas cargas, pode ser, devido a regulagem do fabricante dos elementos de mistura de ar/combustível e tamanho de partículas no processo de injeção do combustível na operação em maiores cargas. E também corroborado com os resultados de maior eficiência em maiores cargas.

**Figura 12-** Valores médios da concentração de monóxido de carbono nos gases de exaustão.

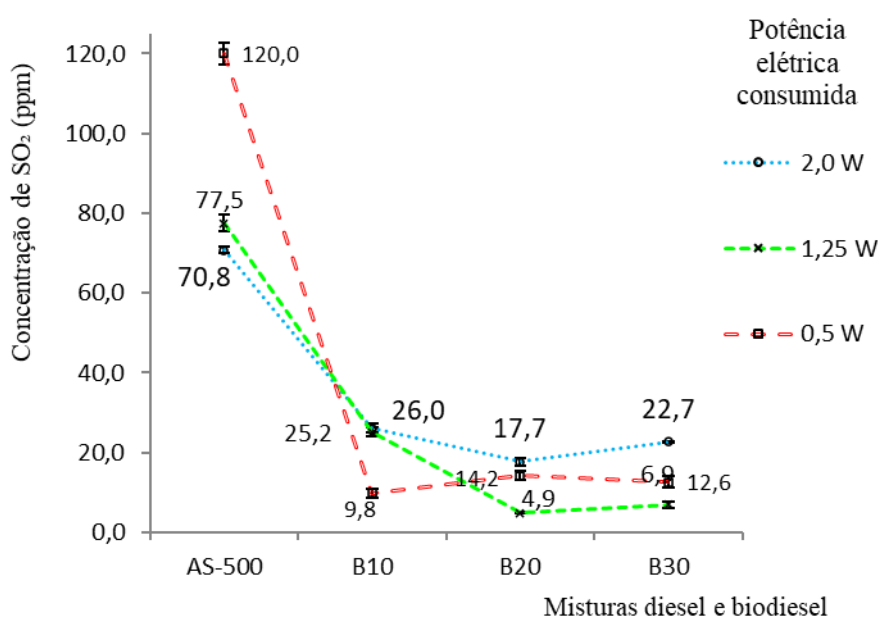


#### 5.6. EMISSÃO DE DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO<sub>2</sub>)

O gráfico da Figura 13 mostra a média da concentração de dióxido de enxofre (ppm SO<sub>2</sub>) nos gases de exaustão, com diferentes misturas e diesel AS-500, em três diferentes potências elétricas. Os valores apresentados foram corrigidos para o referencial de 5 % de oxigênio. Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. Também mostra em todas as amostras de combustíveis analisadas, que ao aumentar a potência elétrica de 0,5 kW para 2,0 kW, há a diminuição da concentração de dióxido de enxofre presente nos gases de exaustão, devido à maior quantidade em massa de combustível consumido. O menor porcentual (4,9 ppm SO<sub>2</sub>) obtido foi com B20, em operação a 1,25 kW. O maior porcentual (120,0 ppm SO<sub>2</sub>) obtido foi com AS-500, em operação a 0,5 kW. Os resultados mostram que mesmo corrigidos para o referencial de oxigênio, apresentaram valores insignificantes menores que 120ppm. As emissões de (SO<sub>2</sub>) com aumento de misturas de biodiesel apresentaram valores menores

para todas as cargas, isso pode ser explicado pela baixa quantidade de enxofre presente no biodiesel (ROSA et al., 2014) (GHORBANI et al., 2011) (LEITE et al., 2019). Os autores também mostraram que os combustíveis baseados em óleos vegetais contêm uma baixa quantidade de enxofre, nitrogênio e aromáticos em sua composição. O valor porcentual de redução de emissão de SO<sub>2</sub> do diesel AS-500 ao biodiesel B30 foram 90 % em 0,5 kW; 91 % em 1,25 kW; 68 % em 2,0 kW.

**Figura 13** - Valores médios da concentração de dióxido de enxofre nos gases de exaustão

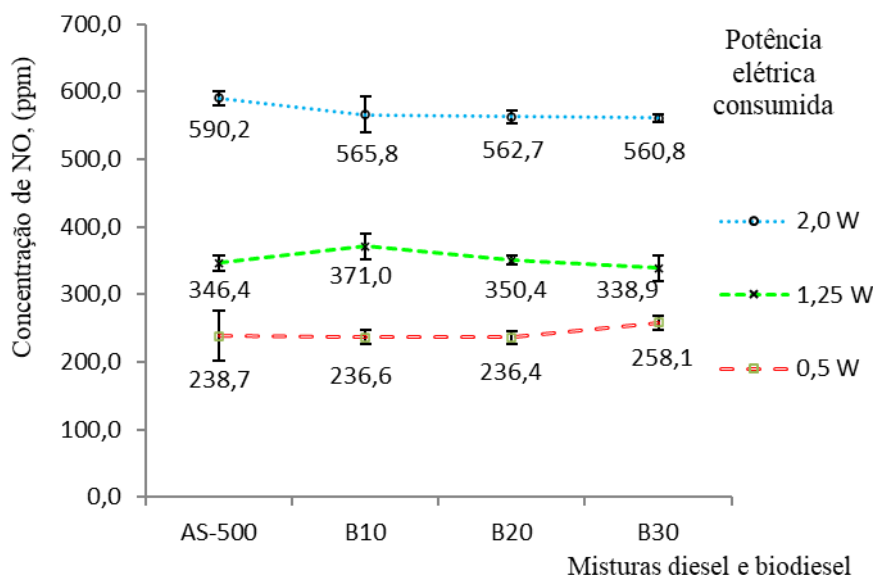


### 5.7. EMISSÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO

O gráfico da Figura 14 mostra a média da concentração de monóxido de nitrogênio (ppm NO) nos gases de exaustão, com diferentes misturas (B10; B20; B30) e diesel AS-500, em três diferentes potências elétricas consumidas (0,5 kW; 1,25 kW; 2,0 kW). Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. Os valores apresentados foram corrigidos para o referencial de 5 % de oxigênio. Também mostra que ao aumentar a potência elétrica, apresenta aumento também na quantidade de NO, presente nos gases de exaustão, devido aumento de temperatura na combustão (gráfico 10). Também o aumento na concentração de NO, com o aumento de

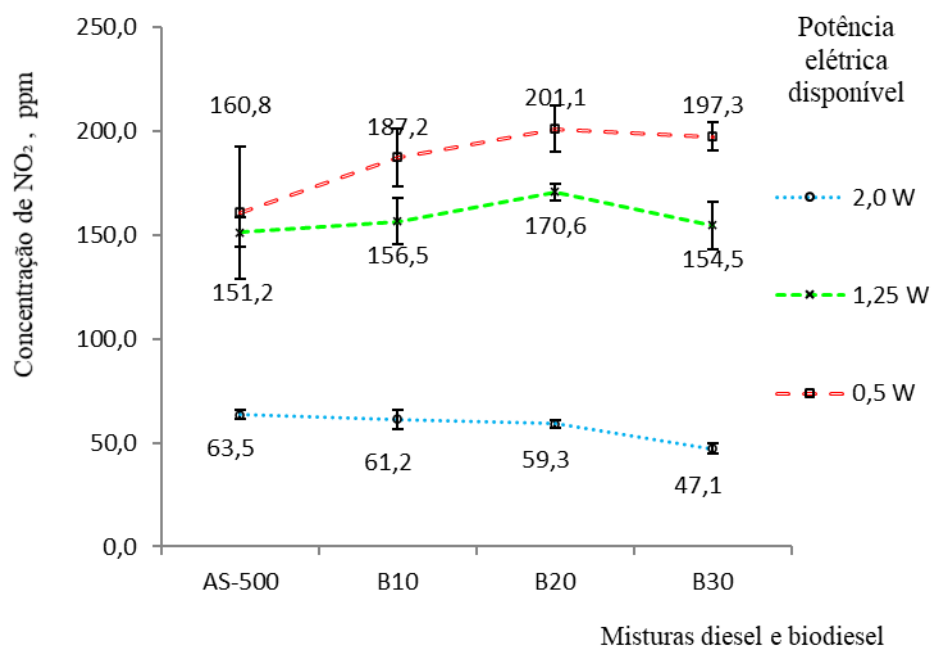
carga, está relacionado com a redução na concentração de  $O_2$  (gráfico 11), de acordo com a formação NO, mostrado anteriormente no capítulo 3.7 (Equação 2). NO é o primeiro componente de formação do  $NO_x$  (Equação 1) descrito no capítulo 3.7, é originado da oxidação do nitrogênio do ar atmosférico (KOC; ABDULLAH, 2013).

**Figura 14** - Valores médios da concentração de (NO) nos gases de exaustão.



Geralmente, biodiesel não contém compostos nitrogenados, então o mecanismo de formação de NO por combustível pode ser negligenciado. O aumento de NO é diretamente proporcional à temperatura e a alta concentração de  $O_2(g)$  (RANGEL; BUCHLER, 2005). É observado que ambos NO e  $NO_x$  têm uma similar tendência com o aumento da carga elétrica consumida pelo motor e os resultados de aumento de NO ao aumento de mistura de biodiesel. De acordo com estudos,  $NO_x$  é uma mistura de gases com aproximadamente 95 % NO, formado em elevadas temperaturas (ONG et al., 2011).

O gráfico da Figura 15 mostra a média da concentração de dióxido de nitrogênio (ppm  $NO_2$ ) nos gases de exaustão. Os valores apresentados foram corrigidos para o referencial de 5 % de oxigênio. Também mostra que, ao aumentar a potência elétrica, há redução da quantidade de dióxido de nitrogênio presente nos gases de exaustão. Maiores estudos são necessários para análise do comportamento de aumento NO com o aumento de carga e simultaneamente a redução de NO com aumento de carga imposta ao motogerador.

**Figura 15** - Valores médios da concentração de ( $\text{NO}_2$ ) nos gases de exaustão.

O menor percentual (47,1 ppm  $\text{NO}_2$ ) obtido foi com B-30, em operação a 2,0 kW. O maior percentual (201,1 ppm  $\text{NO}_2$ ) obtido foi com B20, em operação a 1,25 kW. As maiores variações na quantidade de  $\text{NO}_2$  foram observados no aumento de mistura de B10 ao B20, 7,4 % em 0,5 kW; 9,0 % em 1,25 kW; e redução 3,1 % em 2,0 kW. Ao aumento de mistura de B20 ao B30 foram observados redução na quantidade de  $\text{NO}_2$  ; 1,9 % em 0,5 kW; redução de 9,4 % em 1,25 kW; redução de 20,6 % em 2,0 kW. O comportamento de NO e  $\text{NO}_2$  depende de uma série de fatores como reportado em literatura, misturas de biodiesel, cargas aplicadas, matéria-prima, ignição do combustível, aditivos e pós-tratamentos nos gases de exaustão (LAPUERTA et al., 2005) (GHORBANI et al., 2011) (VALENTE et al., 2012) (AGARWAL et al., 2015).

Os maiores percentuais de quantidade de  $\text{NO}_2$  em relação ao  $\text{NO}_x$  foram observados em baixa carga , mostrado Tabela 2:

**Tabela 2-** Relação  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ 

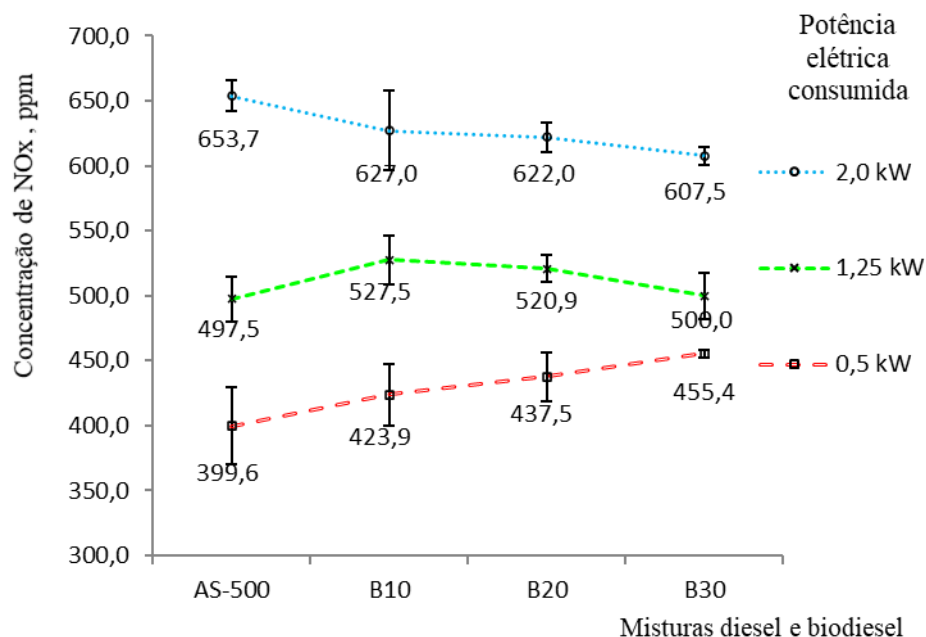
	0,5 kW	1,25 kW	2,0 kW
AS-500	40,2	30,4	9,7
B10	44,2	29,7	9,8
B20	46,0	32,7	9,5
B30	43,3	30,9	7,7

A relação  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  pode afetar a produção de ozônio e sua distribuição espacial (HEEB et al., 2010). E a fotólise do  $\text{NO}_2$  promove a formação do ozônio, que é um poluente secundário na troposfera (WEI et al., 2018). Lijiang Wei e colaboradores (2018) observaram que há maior relação  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ , em operação a baixa carga. Isto pode ser concluído que condições operacionais têm grande impacto sobre a relação  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ , também afetado pelo aumento da mistura de biodiesel (WEI et al., 2018).

O gráfico da Figura 16 mostra a média da concentração de óxidos de nitrogênio (ppm  $\text{NO}_x$ ) nos gases de exaustão. Também mostra que, ao aumentar a potência elétrica, há o aumento da quantidade de óxidos de nitrogênio presente nos gases de exaustão. Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. Os valores apresentados foram corrigidos para o referencial de 5 % de oxigênio.

O gráfico também mostra a concentração mínima de  $\text{NO}_x$  (399,6 ppm em 0,5 kW) e máxima (653,7 ppm em 2,0 kW). A concentração de  $\text{NO}_x$ , de acordo com a literatura, pode ser atribuído a altas temperatura de chama na combustão, e corrobora com os resultados apresentados na figura 10, de aumento de temperatura ao aumento de carga. De acordo com artigo de Wen-Jhy Lee, o aumento da quantidade de óxidos de nitrogênio pode ser atribuído a altas temperaturas de chama e nitrogênio atmosférico e presença de moléculas adicionais de oxigênio na câmara de combustão (LEE et al., 2011 ; VALENTE et al., 2012). Ao aumento de carga, pressão e temperatura do cilindro são aumentados como resultado da maior quantidade de combustível, e estes resultados estão em concordância com os encontrados por Alptekin (ALPTEKIN et al., 2015) e Valente (VALENTE et al., 2012). O aumento do atraso de ignição do biodiesel, permitindo que mais combustível seja injetado antes da ignição, também pode ser outro motivo para o aumento de  $\text{NO}_x$  (RAMAN et al., 2019).

**Figura 16-** Valores médios da concentração de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) nos gases de exaustão



O maior aumento na quantidade de NO<sub>x</sub> foi observado no aumento de mistura de AS-500 ao B30, 14,0 % em 0,5 kW; redução em 0,5 % em 1,25 kW; redução em 7,1 % em 2,0 kW. Ao aumento de mistura de B10 ao B30 foram observados aumento 7,4 % em 0,5 kW; redução em 5,2 % em 1,25 kW; e redução 3,1 % em 2,0 kW. Os maiores aumentos NO<sub>x</sub> apresentados, ao aumento de carga, pode ser atribuído, também, à maior viscosidade do biodiesel (tabela 1) em decorrência no atraso de ignição do combustível.

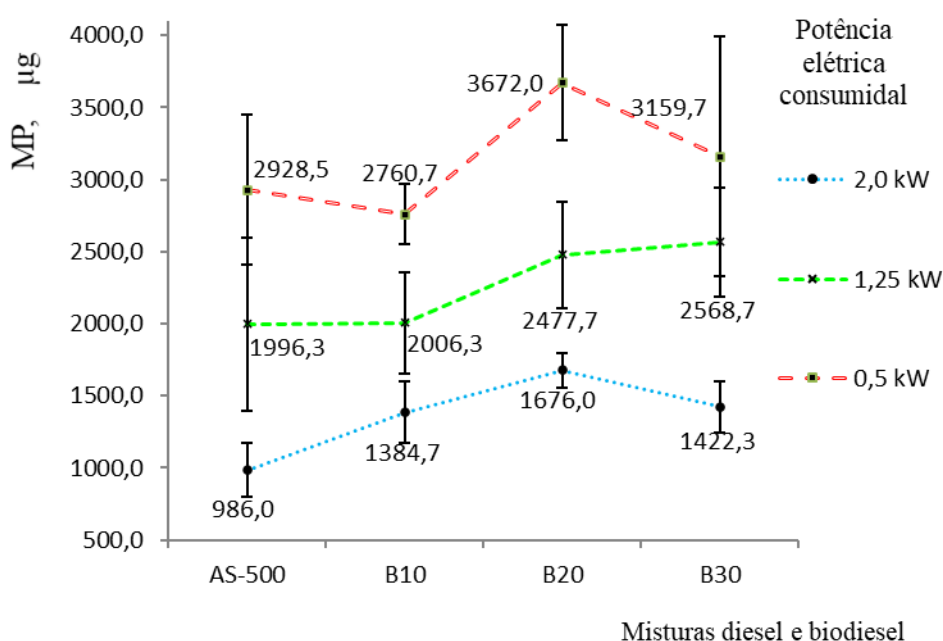
## 5.8. EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO E *BLACK CARBON*

O material particulado (MP) é definido como qualquer material coletado nos filtros do sistema de amostragem do material particulado, sendo composto, genericamente, de carbono elementar, hidrocarbonetos condensados, sulfatos, água associada e partículas metálicas. É formado em altas temperaturas em regiões da câmara de combustão ricas em combustível, envolvendo etapas descritas no item 3.7. O material particulado não é um

quantitativo absoluto, é função da temperatura e pressão, sendo que destas duas variáveis, a temperatura tem grande efeito sobre a quantidade do MP nos gases de exaustão, e a pressão na maioria das fontes estacionárias pode ser negligenciada.

O gráfico da Figura 17 mostra a média da quantidade de material particulado nos gases de exaustão. Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios.

**Figura 17-** Valores médios da massa absoluta ( $\mu\text{g}$ ) de MP em função das misturas de biodiesel



A menor quantidade de MP coletado 986,0  $\mu\text{g}$  obtido foi com AS-500, em operação a 2,0 kW. A maior quantidade de MP coletado 3672,0  $\mu\text{g}$  obtido foi com B20, em operação a 0,5 kW. O experimento mostrou que ao aumentar a potência elétrica, houve redução da quantidade de MP, provavelmente à operação na melhor condição de injeção de combustível, obtendo-se pequenas gotículas na mistura ar/combustível, levando ao melhor processo de oxidação do combustível e menor emissão de MP. A maior quantidade de massa de material particulado ocorreram em baixa carga, devido principalmente a qualidade de combustão que apresentaram os menores valores de eficiência térmica.

Figura 18- Filtros carregados com MP e potência elétrica dissipada.

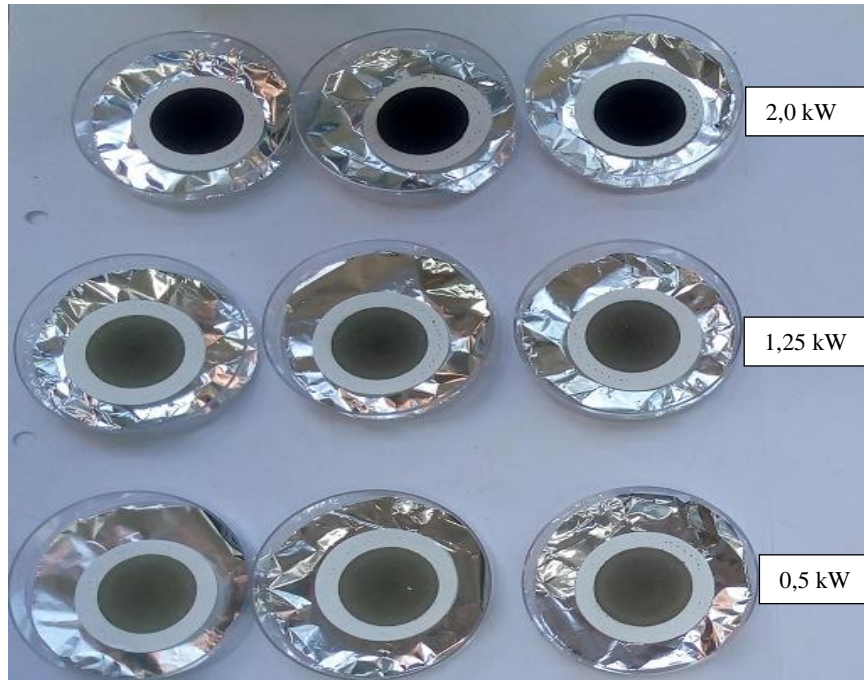
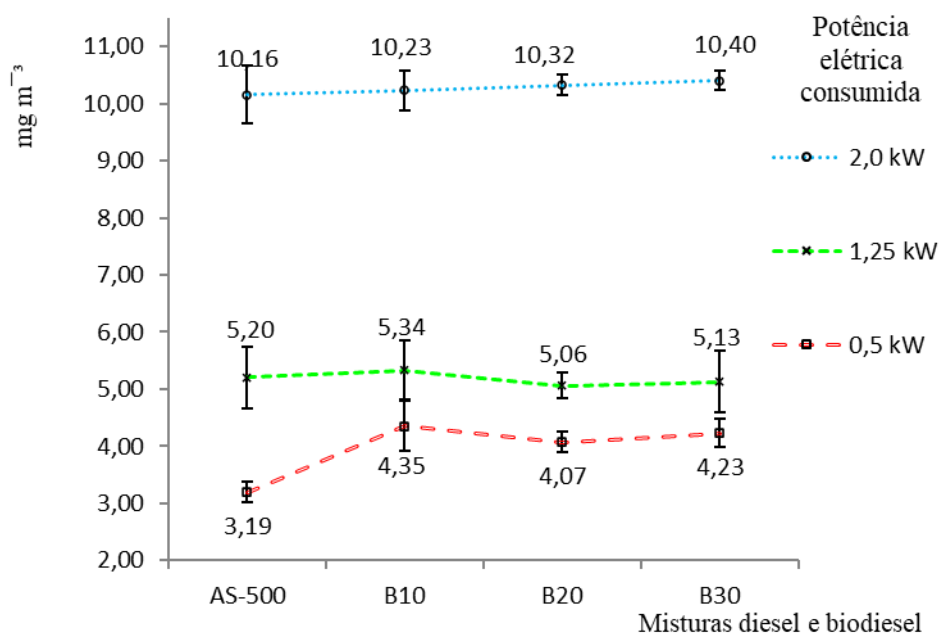


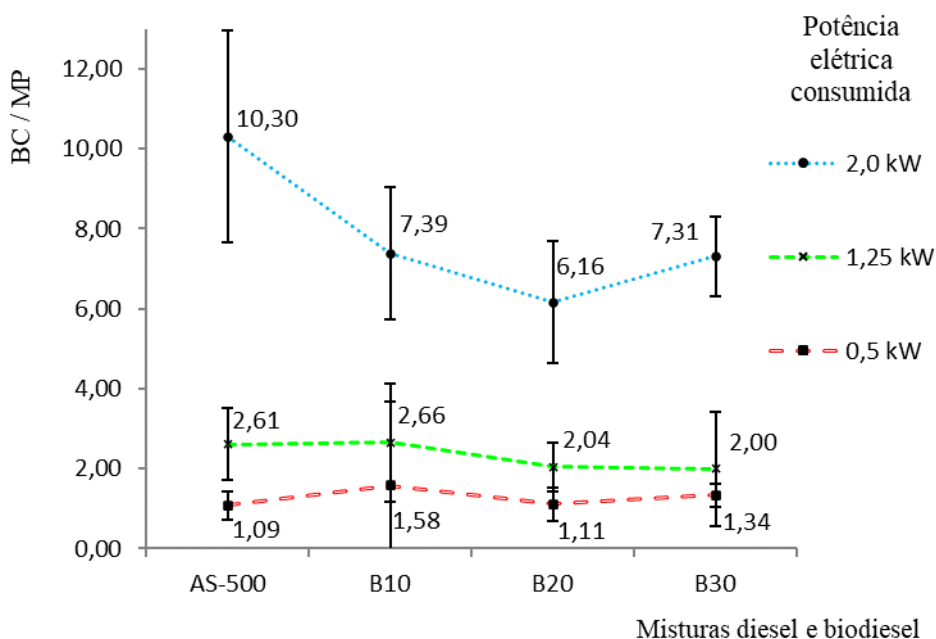
Figura 19 – Valores médios de *Black Carbon* em função das misturas de biodiesel



O gráfico da Figura 19 mostra a média da quantidade de BC na exaustão, com diferentes misturas (B10; B20; B30) e diesel AS-500, em três diferentes potências elétricas consumidas (0,5 kW; 1,25 kW; 2,0 kW). Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. Também mostra que, ao aumentar a potência elétrica, há o aumento da quantidade BC presente nos gases de exaustão. A menor quantidade  $3,19 \text{ mg m}^{-3}$ , obtida foi com AS-500 em operação a 0,5 kW. A maior quantidade  $10,40 \text{ mg m}^{-3}$ , obtida foi com B30, em operação a 2,0 kW. A Figura 18 mostra a imagem do MP em três diferentes cargas e mostra a cor mais escura em operação a 2,0 kW.

O gráfico da Figura 20 mostra a média da relação de BC/MP com diferentes misturas (B10; B20; B30) e diesel AS-500. Os desvios padrão estão mostrados no eixo do gráfico como barras de erros, próximo aos valores médios. Foi observado redução na relação BC/MP, principalmente na maior carga 2,0 kW, e entre AS-500 até B20, e, na sequência, aumento na relação da mistura, de B20 até B30.

**Figura 20** – Relação BC / MP em função das misturas de biodiesel



Carlos e colaboradores (2019) investigaram a emissão de black carbon dentro da estação de ônibus rodoviário urbano, durante intervalo de quatro anos, e observaram a relação entre BC e MP<sub>2,5</sub>, e BC e MP<sub>1,0</sub>, e constaram a redução na relação BC/MP, com o aumento da mistura biodiesel presente no combustível comercializado B5;B6;B7;B8 (SILVA JUNIOR et al., 2019).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo experimental mostrou que é possível averiguar o comportamento de misturas de diesel e biodiesel com carga variável em motogerador e correlatas emissões nos gases de exaustão. As emissões de óxidos de nitrogênio (NO e NO<sub>x</sub>) aumentaram com o aumento da carga e as emissões de NO<sub>2</sub> reduziram com o aumento na carga do motogerador. O rendimento energético apresentou a melhor performance com B30; 3,1 % superior ao AS-500 em carga nominal 2,0 kW. Também observa-se em todas as cargas experimentadas no motogerador, tem-se que :

- i. Na carga de 2,0 kW em relação à carga 0,5 kW, em média houve aumento de (56,6 %) no consumo de combustível;
- ii. Na carga de 0,5 kW em relação à carga 2,0 Kw, em média houve redução de (57,5 %) na emissão na emissão de monóxido de nitrogênio corrigido (NO);
- iii. Na carga de 2,0 kW em relação à carga 0,5 kW, em média houve redução de (69,0 %) na emissão de dióxido de nitrogênio corrigido (NO<sub>2</sub>);
- iv. Na carga de 2,0 kW em relação à carga 0,5 kW, em média houve aumento de (46,3 %) na emissão de óxidos de nitrogênio corrigido (NO<sub>x</sub>);
- v. Na carga de 0,5 kW em relação à carga 2,0 kW, em média houve aumento de (60,4 %) na emissão de monóxido de carbono corrigido (CO);
- vi. Na mistura B30 houve redução em média (19,1 %) na emissão de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) em relação à mistura B10;
- vii. Na mistura B20 houve aumento em média (25,8 %) na emissão de MP em relação à mistura B10;
- viii. Na carga de 2,0 kW em relação à carga 0,5 kW, em média houve aumento de (61,4 %) na quantidade na emissão de *black carbon*.

A variação da potência elétrica gerada no motogerador apresentou impactos significativos nos resultados. O motor foi planejado para trabalhar na potência máxima, sendo assim, em uma análise multivariada a melhor condição foi em operação na potência consumida de 2,0 kW.

## 7. REFERÊNCIAS

- AGARWAL, A. K. et al. Particulate emissions from biodiesel fuelled CI engines. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 94, p. 311–330, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415000023>>
- AL QUBEISSI, M.; SAZHIN, S. S.; ELWARDANY, A. E. Modelling of blended Diesel and biodiesel fuel droplet heating and evaporation. **Fuel**, [s. l.], v. 187, p. 349–355, 2017.
- ALLOWAY, B.; AYRES, D. C. **Chemical principles of environmental pollution**. [s.l.] : CRC press, 1997.
- ALPTEKIN, E. et al. Using waste animal fat based biodiesels–bioethanol–diesel fuel blends in a DI diesel engine. **Fuel**, [s. l.], v. 157, p. 245–254, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236115004810>>
- AMBARITA, H. Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogas) mode. **Case Studies in Thermal Engineering**, [s. l.], v. 10, p. 179–191, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X17300369>>
- ANEEL. BOLETIM MENSAL DO BIODIESEL. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA**, [s. l.], 2018. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informações+Gerenciais+-+4º+trimestre+de+2018/36e91555-141a-637d-97b1-9f6946cc61b3?version=1.2](http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informações+Gerenciais+-+4º+trimestre+de+2018/36e91555-141a-637d-97b1-9f6946cc61b3?version=1.2)>
- ANP, G. N. e B. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**, ANP Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/3819-anuario-estatistico-2017>>
- ASTM Internacional; D445 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity),2019.
- ASTM Internacional; D1298 Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method,2017.
- ASTM Internacional; D240 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter,2017.
- ASTM Internacional; D6304, Standard Test Method for Determination of Water in Petroleum Products, Lubricating Oils, and Additives by Coulometric Karl Fischer Titration,2016.
- ASSESSMENT; DIVISION, S. A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions. **Draft Technical Report EPA420-P-02-001**, [s. l.], 2002.
- ATMANLI, A. Comparative analyses of diesel–waste oil biodiesel and propanol, n-butanol or 1-pentanol blends in a diesel engine. **Fuel**, [s. l.], v. 176, p. 209–215, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116300114>>
- AWAD, S.; LOUBAR, K.; TAZEROUT, M. Experimental investigation on the combustion,

performance and pollutant emissions of biodiesel from animal fat residues on a direct injection diesel engine. **Energy**, [s. l.], v. 69, p. 826–836, 2014.

BALEN, M. Aditivos melhoradores das propriedades de fluxo a frio em biodiesel. [s. l.], 2012.

BARRY, E. G. et al. **Heavy-duty diesel engine/fuels combustion performance and emissions-A cooperative research program**. [s.l.] : SAE Technical Paper, 1985.

BEDOYA, I. D.; ARRIETA, A. A.; CADAVID, F. J. Effects of mixing system and pilot fuel quality on diesel–biogas dual fuel engine performance. **Bioresource technology**, [s. l.], v. 100, n. 24, p. 6624–6629, 2009.

BORSATO, D. et al. Oxidation kinetics of biodiesel from soybean mixed with synthetic antioxidants BHA, BHT and TBHQ: Determination of activation energy. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 127, p. 111–116, 2014.

BRIGGS, N. L.; LONG, C. M. Critical review of black carbon and elemental carbon source apportionment in Europe and the United States. **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 144, p. 409–427, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016307026>>

CALCOTE, H. F.; MANOS, D. M. Effect of molecular structure on incipient soot formation. **Combustion and Flame**, [s. l.], v. 49, n. 1–3, p. 289–304, 1983.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [s.l.] : AMGH Editora, 2013.

CHENG, A. S.; UPATNIEKS, A.; MUELLER, C. J. Investigation of the impact of biodiesel fuelling on NO<sub>x</sub> emissions using an optical direct injection diesel engine. **International Journal of engine research**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 297–318, 2006.

CHERUBINI, F. et al. Global spatially explicit CO<sub>2</sub> emission metrics for forest bioenergy. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 6, p. 20186, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/srep20186>>

COLOSSI, B. R. Avaliação ambiental de uma usina termoelétrica a óleo combustível utilizando análise do ciclo de vida. Trabalho conclusão de curso Engenharia Ambiental. Porto Alegre. UFRGS, [s. l.], 2012.

CORRÊA DA SILVA, R.; DE MARCHI NETO, I.; SILVA SEIFERT, S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 59, p. 328–341, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000290>>

CUNHA, M. E. Da. Caracterização de biodiesel produzido com misturas binárias de sebo bovino, óleo de frango e óleo de soja. [s. l.], 2008.

D'AGOSTO, M. de A. et al. Comparative study of emissions from stationary engines using biodiesel made from soybean oil, palm oil and waste frying oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 70, p. 1376–1392, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116310954>>

DA SILVEIRA, F. L. Máquinas térmicas à combustão interna de Otto e de Diesel. **Instituto de Física**

da **Universidade Federal do Rio Grande Do Sul**, [s. l.], 2008.

DE BLAS, L. J. M. **Pollutant formation and interaction in the combustion of heavy liquid fuels**. 1998. University of London, [s. l.], 1998.

DE PAULO, A. A. et al. Performance and emission evaluations in a power generator fuelled with Brazilian diesel and additions of waste frying oil biodiesel. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 98, p. 288–297, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115014179>>

DIN EN-14112, Fat and oil derivatives - Fatty Acid Methyl Esters (FAME) - Determination of oxidation stability (accelerated oxidation test) 2016.

DOMÍNGUEZ-SÁEZ, A.; RATTÁ, G. A.; BARRIOS, C. C. Prediction of exhaust emission in transient conditions of a diesel engine fueled with animal fat using Artificial Neural Network and Symbolic Regression. **Energy**, [s. l.], v. 149, p. 675–683, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218303086>>

DOS REIS, E. F. et al. \Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja. **Performance and emissions of a diesel engine-generator cycle under different concentrations of soybean biodiesel.**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. 565–571, 2013. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fst&AN=88982112&lang=pt-br&site=eds-live>>

DOS REIS, L. B.; SANTOS, E. C. **Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. [s.l.] : Editora Manole, 2015.

EPE, E. Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017. **Rio de Janeiro: EPE**, [s. l.], 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>

FERNANDES, E. et al. Natural-gas-powered thermoelectricity as a reliability factor in the Brazilian electric sector. **Energy Policy**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 999–1018, 2008.

FERNANDO, S.; HALL, C.; JHA, S. NO<sub>x</sub> reduction from biodiesel fuels. **Energy & Fuels**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 376–382, 2006.

GARCIA, A.; MONTICELLI, A. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**, Campinas, SP, Editora da UNICAMP, 2003.

GAZZONI, D. L. Balanço de emissões de CO<sub>2</sub> por biocombustíveis no Brasil: histórico e perspectivas. **Embrapa Soja-Livro técnico (INFOTECA-E)**, [s. l.], 2014.

GHORBANI, A. et al. A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler. **Applied Energy**, [s. l.], v. 88, n. 12, p. 4725–4732, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911004016>>

GUARIEIRO, L. L. N. et al. Assessment of the use of oxygenated fuels on emissions and performance

- of a diesel engine. **Microchemical Journal**, [s. l.], v. 117, p. 94–99, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X14001076>>
- GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 3, n. 5, p. 434–445, 2011.
- GUIBET, J.-C.; FAURE-BIRCHEM, E. **Fuels and engines: technology, energy, environment**. [s.l.] : Editions Technip, 1999. v. 2
- GÜLDER, Ö. L. Effects of oxygen on soot formation in methane, propane, and n-butane diffusion flames. **Combustion and Flame**, [s. l.], v. 101, n. 3, p. 302–310, 1995.
- HARRISON, R. M. **Pollution: causes, effects and control**. [s.l.] : Royal Society of Chemistry, 1982.
- HEEB, N. V et al. Impact of low-and high-oxidation diesel particulate filters on genotoxic exhaust constituents. **Environmental science & technology**, [s. l.], v. 44, n. 3, p. 1078–1084, 2010.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. [s. l.], 1988.
- HOEKMAN, S. K. et al. Investigation of biodiesel chemistry, carbon footprint and regional fuel quality. **Desert Research Institute Reno, NV**, [s. l.], v. 89512, 2011.
- HOEKMAN, S. K.; ROBBINS, C. Review of the effects of biodiesel on NOx emissions. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 96, p. 237–249, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382012000021>>
- HOSEINI, S. S. et al. The effect of combustion management on diesel engine emissions fueled with biodiesel-diesel blends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 73, p. 307–331, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117300941>>
- HYGIENISTS, A. C. of G. I. Threshold limit values (TLVs) and biological exposure indices (BEIs). In: 2017, **Anais...** : American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Cincinnati, OH, 2017.
- IQBAL, S. et al. A review of disaster-related carbon monoxide poisoning: surveillance, epidemiology, and opportunities for prevention. **American journal of public health**, [s. l.], v. 102, n. 10, p. 1957–1963, 2012.
- ISIOMA, N. et al. Cold flow properties and kinematic viscosity of biodiesel. **Universal Journal of Chemistry**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 135–141, 2013.
- JASPER, S. P. et al. Análise energética da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) produzida em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], p. 395–403, 2010.
- KIM, H.; CHOI, B. The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on nanoparticles and exhaust emissions from CRDI diesel engine. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 157–163, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109001633>>
- KNOTHE, G.; RAZON, L. F. Biodiesel fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, [s. l.], v. 58, p. 36–59, 2017. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128516300284>>

KOC, A. B.; ABDULLAH, M. Performance and NO<sub>x</sub> emissions of a diesel engine fueled with biodiesel-diesel-water nanoemulsions. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 109, p. 70–77, 2013.

Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382012003657>>

LAPUERTA, M. et al. Diesel emissions from biofuels derived from Spanish potential vegetable oils. **Fuel**, [s. l.], v. 84, n. 6, p. 773–780, 2005.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; RODRIGUEZ-FERNANDEZ, J. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 198–223, 2008.

LAZKANO, I.; NØSTBAKKEN, L.; PELLI, M. From fossil fuels to renewables: The role of electricity storage. **European Economic Review**, [s. l.], v. 99, p. 113–129, 2017. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014292117300697>>

LEE, W.-J. et al. Assessment of energy performance and air pollutant emissions in a diesel engine generator fueled with water-containing ethanol–biodiesel–diesel blend of fuels. **Energy**, [s. l.], v. 36, n. 9, p. 5591–5599, 2011. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544211004609>>

LEITE, D. et al. Emissions and performance of a diesel engine affected by soybean, linseed, and crambe biodiesel. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 130, p. 267–272, 2019. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669018311543>>

LOPES, C. V. M. **Propostas para o ensino de química: poluição do ar e lixo**. [s.l.] : Centro de Ciências do Rio Grande do Sul, 1997.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. [s.l.] : Grupo Gen-LTC, 2000.

MARCOVITCH, J. **Para mudar o futuro: mudanças climáticas, políticas públicas e estratégias empresariais**. [s.l.] : Edusp, 2006.

MARTIN, C. Biorrefinaria se aproxima do setor. **Revista O Papel, São Paulo**, [s. l.], p. 24–30, 2013.

MENEZES, E. W. De. Produção de trabalho, geração de contaminantes e tratamento pós-combustão em motores ciclo diesel. [s. l.], 2009.

MENEZES, E. W. De; CATALUÑA VESES, R. Amostragem do material particulado e fração orgânica volátil das emissões em motor ciclo diesel sem a utilização de túnel de diluição. **Química nova. São Paulo. Vol. 31, n. 8 (nov. 2008), p. 2027-2030**, [s. l.], 2008.

MOHANKUMAR, S.; SENTHILKUMAR, P. Particulate matter formation and its control methodologies for diesel engine: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 80, p. 1227–1238, 2017. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211730761X>>

MOSER, B. R. et al. Exhaust emissions and fuel properties of partially hydrogenated soybean oil methyl esters blended with ultra low sulfur diesel fuel. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 90, n. 9, p. 1122–1128, 2009.

- MUCAK, A. et al. Performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with emulsified biodiesel-diesel fuel blends. **International Journal of Automotive Engineering and Technologies**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 176–185, 2016.
- NEEFT, J. P. A.; MAKKEE, M.; MOULIJN, J. A. Diesel particulate emission control. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 1–69, 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378382096010028>>
- NI, M. et al. A review on black carbon emissions, worldwide and in China. **Chemosphere**, [s. l.], v. 107, p. 83–93, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653514002562>>
- NIGRO, F.; SZWARC, A. Etanol como combustível veicular: perspectivas tecnológicas e propostas de políticas públicas. **Versão Preliminar, USP**, [s. l.], 2009.
- OLSON, D. B.; PICKENS, J. C.; GILL, R. J. The effects of molecular structure on soot formation II. Diffusion flames. **Combustion and Flame**, [s. l.], v. 62, n. 1, p. 43–60, 1985.
- ONG, H. C. et al. Comparison of palm oil, Jatropha curcas and Calophyllum inophyllum for biodiesel: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 3501–3515, 2011.
- PARENTE, E. J. de S. Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado. **Fortaleza: tecbio**, [s. l.], v. 68, 2003.
- PASSOS, J. C. Carnot e a Segunda Lei da Termodinâmica. **ABENGE: Revista de Ensino de Engenharia**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 25–31, 2003.
- QI, D. H. et al. Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 51, n. 12, p. 2985–2992, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410002542>>
- RAMAN, L. A. et al. Experimental investigation on performance, combustion and emission analysis of a direct injection diesel engine fuelled with rapeseed oil biodiesel. **Fuel**, [s. l.], v. 246, p. 69–74, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119303151>>
- RANGEL, L. P.; BUCHLER, P. M. Estudo do nitrogênio na combustão do gás natural. **Química Nova**, [s. l.], v. 28, n. 6, p. 957, 2005.
- ROSA, H. A. et al. Biodiesel produced from crambe oil in Brazil—A study of performance and emissions in a diesel cycle engine generator. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 38, p. 651–655, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114004651>>
- SASSER, E. et al. Report to congress on black carbon. **Department of the Interior, Environment, and Related Agencies**, [s. l.], 2012.
- SCHIRMER, W. N. et al. Effects of air/fuel ratio on gas emissions in a small spark-ignited non-road engine operating with different gasoline/ethanol blends. **Environmental Science and Pollution**

**Research**, [s. l.], v. 24, n. 25, p. 20354–20359, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-017-9651-8>>

SILVA JUNIOR, C. R. Da et al. Black Carbon Associated to PM<sub>1.0</sub> and PM<sub>2.5</sub>: Mass Variation due to Combustion of Biodiesel/Diesel Blends (B5, B6, B7 and B8). **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 786–792, 2019.

SPACINO, K. R. et al. Determination of kinetic and thermodynamic parameters of the B100 biodiesel oxidation process in mixtures with natural antioxidants. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 137, p. 366–370, 2015.

SUN, J.; CATON, J. A.; JACOBS, T. J. Oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fuelled diesel engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 677–695, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128510000237>>

TEIXEIRA, C. C. V. **Análise de Emissões e Desempenho de Motores Diesel utilizando Óleo Diesel Comercial, Biodiesel de Palma (B100) e Misturas (Bx)**. 2010. Master Thesis, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, [s. l.], 2010.

TEIXEIRA, L. S. G. et al. Characterization of beef tallow biodiesel and their mixtures with soybean biodiesel and mineral diesel fuel. **Biomass and bioenergy**, [s. l.], v. 34, n. 4, p. 438–441, 2010.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012. Universidade de São Paulo, [s. l.], 2012.

TURNES, S. R. **Introdução à Combustão-: Conceitos e Aplicações**. [s.l.] : AMGH Editora, 2013.

VALENTE, O. S. et al. Exhaust emissions from a diesel power generator fuelled by waste cooking oil biodiesel. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 431, p. 57–61, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712006729>>

VERGNHANINI FILHO, R. Emissão de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) na combustão industrial. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, [s. l.], v. 1, n. 3, 2017.

VLASSOV, D. Fundamentos de combustão. **VIII Curso de Especialização em Motores e Combustíveis**. Curitiba: UTPR, [s. l.], 2008.

WEI, L. et al. Combustion process and NO<sub>x</sub> emissions of a marine auxiliary diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel blends. **Energy**, [s. l.], v. 144, p. 73–80, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217320315>>

YILMAZ, N.; ATMANLI, A. Experimental evaluation of a diesel engine running on the blends of diesel and pentanol as a next generation higher alcohol. **Fuel**, [s. l.], v. 210, p. 75–82, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236117310360>>

YILMAZ, N.; DAVIS, S. M. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) formation in a diesel engine fueled with diesel, biodiesel and biodiesel/n-butanol blends. **Fuel**, [s. l.], v. 181, p. 729–740, 2016. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84969174916&doi=10.1016%2Fj.fuel.2016.05.059&partnerID=40&md5=5bfb02f1eb7c40280afc0db2>>

4d7cd12e>

YOUNG, L.-H. et al. Effects of biodiesel, engine load and diesel particulate filter on nonvolatile particle number size distributions in heavy-duty diesel engine exhaust. **Journal of Hazardous Materials**, [s. 1.], v. 199, p. 282–289, 2012.

## 8. APÊNDICE

### 8.1. APÊNDICE A - MÉDIA DOS RESULTADOS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA

MOTOGERADOR : 2000 W																
		Entrada de ar (°C)			Bloco motor (°C)			G. Exaustão (°C)			Óleo cárter (°C)			Ambiente (°C)		
B 30	R1	37,7	±	0,38	65,7	±	0,41	310,0	±	0,73	84,9	±	0,85	31,1	±	0,48
	R2	39,8	±	0,43	68,5	±	0,34	317,8	±	0,99	86,8	±	0,74	33,6	±	0,54
	R3	40,6	±	0,39	69,9	±	0,23	319,5	±	0,36	87,6	±	0,66	33,8	±	0,25
	MEDIA	39,4	±	0,40	68,0	±	0,32	315,8	±	0,69	86,4	±	0,75	32,8	±	0,43
B 20	R1	36,0	±	0,44	64,5	±	0,49	313,3	±	0,69	83,8	±	0,72	29,3	±	0,48
	R2	38,4	±	0,37	66,1	±	0,41	315,0	±	0,87	85,0	±	0,79	32,1	±	0,46
	R3	38,8	±	0,37	66,9	±	0,28	318,8	±	0,86	85,9	±	0,75	32,2	±	0,49
	MEDIA	37,7	±	0,39	65,8	±	0,39	315,7	±	0,80	84,9	±	0,75	31,2	±	0,47
B 10	R1	38,0	±	0,63	64,2	±	0,42	321,5	±	0,73	84,8	±	0,53	29,3	±	0,27
	R2	40,6	±	0,80	66,6	±	0,43	331,3	±	2,01	85,9	±	0,86	31,9	±	0,38
	R3	39,8	±	0,49	66,3	±	0,50	324,9	±	0,90	85,3	±	0,85	32,6	±	0,34
	MEDIA	39,5	±	0,64	65,7	±	0,45	325,9	±	1,21	85,3	±	0,75	31,3	±	0,33
B 0	R1	43,1	±	1,32	70,2	±	1,58	341,9	±	1,40	89,5	±	0,77	33,0	±	0,28
	R2	42,3	±	1,37	69,5	±	0,64	340,2	±	1,13	88,5	±	0,64	30,9	±	0,44
	R3	41,0	±	0,63	68,3	±	0,31	338,5	±	0,85	89,0	±	0,42	30,9	±	0,25
	MEDIA	42,2	±	1,11	69,3	±	0,84	340,2	±	1,13	89,0	±	0,61	31,6	±	0,32

MOTOGERADOR : 1250 W												
		Entrada de ar (°C)		Bloco motor (°C)		G. Exaustão (°C)		Óleo cárter (°C)		Ambiente (°C)		
		Temp.	±	Temp.	±	Temp.	±	Temp.	±	Temp.	±	
B 30	R1	36,1	± 0,30	60,3	± 0,39	236,8	± 0,51	79,2	± 0,62	30,7	± 0,48	
	R2	37,8	± 0,27	61,6	± 4,79	238,6	± 0,49	80,0	± 6,18	32,6	± 0,35	
	R3	38,9	± 0,29	63,9	± 0,44	241,1	± 0,73	81,6	± 0,61	33,7	± 0,33	
	MEDIA	37,6	± 0,29	61,9	± 1,87	238,8	± 0,58	80,3	± 2,47	32,3	± 0,39	
B 20	R1	34,5	± 0,30	58,4	± 0,40	237,6	± 0,49	77,6	± 0,57	28,5	± 0,39	
	R2	36,2	± 0,25	59,8	± 0,46	242,7	± 0,91	79,3	± 0,53	30,8	± 0,37	
	R3	37,6	± 0,27	61,6	± 0,38	245,3	± 0,79	80,1	± 0,54	32,2	± 0,35	
	MEDIA	36,1	± 0,27	59,9	± 0,41	241,9	± 0,73	79,0	± 0,54	30,5	± 0,37	
B 10	R1	37,2	± 0,94	59,8	± 0,69	249,4	± 0,81	79,4	± 0,46	28,8	± 0,25	
	R2	37,0	± 0,26	59,9	± 0,40	252,1	± 0,67	79,0	± 0,58	30,9	± 0,31	
	R3	38,6	± 0,62	61,7	± 4,77	263,9	± 0,56	80,9	± 0,44	32,3	± 0,28	
	MEDIA	37,3	± 0,52	58,6	± 3,10	255,1	± 1,00	77,7	± 0,56	31,0	± 0,31	
B 0	R1	40,4	± 0,92	63,7	± 0,54	263,2	± 0,68	82,8	± 0,58	32,2	± 0,28	
	R2	40,5	± 0,61	63,0	± 5,08	267,3	± 1,29	82,6	± 0,69	33,3	± 0,20	
	R3	37,9	± 0,63	60,9	± 0,74	253,9	± 2,91	79,5	± 6,04	30,3	± 0,29	
	MEDIA	39,6	± 0,72	62,5	± 2,12	261,5	± 1,63	81,7	± 2,43	32,0	± 0,26	

MOTOGERADOR : 500 W												
		Entrada de ar (°C)		Bloco motor (°C)		G. Exaustão (°C)		Óleo cárter (°C)		Ambiente (°C)		
		Temp.	±	Temp.	±	Temp.	±	Temp.	±	Temp.	±	
B 30	R1	35,1	± 0,25	57,0	± 4,48	208,4	± 0,56	76,4	± 0,47	29,6	± 0,43	
	R2	37,8	± 0,29	60,5	± 4,87	210,4	± 0,80	79,0	± 0,64	32,9	± 0,43	
	R3	39,8	± 0,62	62,7	± 0,36	220,4	± 4,86	79,4	± 0,51	33,4	± 0,33	
	MEDIA	37,5	± 0,39	60,1	± 3,24	213,1	± 2,07	78,3	± 0,54	32,0	± 0,39	
B 20	R1	33,8	± 0,28	56,7	± 0,65	210,9	± 0,85	75,4	± 0,45	28,1	± 0,41	
	R2	36,2	± 0,27	58,5	± 0,38	215,6	± 1,66	77,1	± 0,46	31,3	± 0,44	
	R3	37,3	± 0,25	59,9	± 0,41	215,6	± 1,86	78,2	± 0,47	32,1	± 0,44	
	MEDIA	35,8	± 0,27	58,4	± 0,48	214,0	± 1,46	76,9	± 0,46	30,5	± 0,43	
B 10	R1	36,2	± 0,48	57,4	± 0,52	218,1	± 1,19	77,2	± 0,47	29,3	± 0,25	
	R2	37,9	± 0,72	59,2	± 0,60	223,0	± 0,86	77,5	± 0,75	31,5	± 0,46	
	R3	37,7	± 0,36	60,0	± 0,53	230,0	± 0,97	78,6	± 0,47	32,1	± 0,23	
	MEDIA	37,3	± 0,52	58,9	± 0,55	223,7	± 1,00	77,7	± 0,56	31,0	± 0,31	
B 0	R1	38,9	± 0,70	60,6	± 0,53	236,0	± 0,71	78,9	± 6,13	31,6	± 0,22	
	R2	37,8	± 0,5	59,2	± 0,4	227,5	± 0,9	78,2	± 3,3	30,8	± 0,30	
	R3	36,6	± 0,23	57,8	± 0,31	219,0	± 1,13	77,5	± 0,47	30,0	± 0,38	
	MEDIA	37,8	± 0,47	59,2	± 0,42	227,5	± 0,92	78,2	± 3,30	30,8	± 0,30	

## 8.2. APÊNDICE B - MÉDIA DOS RESULTADOS DE ANÁLISE DE GASES EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA

MOTOGERADOR : 2000 W																			
gases	O2		CO		NOx			NO		NO2		SO2		TF		Bomba			
	unid	%	ppm															°C	l/min
B 30	R1	15,3 ± 0,04	534,1 ± 4,61	215,5 ± 1,56	198,5 ± 1,37	17,0 ± 0,91	7,1 ± 0,13	32,9 ± 4,60	0,97 ± 0,003										
	R2	15,3 ± 0,03	491,7 ± 2,65	217,3 ± 2,22	201,3 ± 1,47	16,3 ± 0,83	7,4 ± 0,11	35,4 ± 3,73	0,97 ± 0,004										
	R3	15,2 ± 0,03	489,0 ± 3,04	219,9 ± 3,26	202,7 ± 3,11	17,2 ± 0,94	9,9 ± 0,07	36,0 ± 3,65	0,97 ± 0,003										
	MEDIA	15,3 ± 0,03	504,9 ± 3,44	217,6 ± 2,34	200,8 ± 1,99	16,9 ± 0,89	7,2 ± 0,10	34,8 ± 3,99	0,97 ± 0,003										
B 20	R1	15,5 ± 0,04	549,4 ± 3,93	213,5 ± 4,13	191,2 ± 3,37	22,3 ± 0,83	1,4 ± 1,02	44,2 ± 4,20	44,2 ± 0,005										
	R2	15,4 ± 0,04	537,5 ± 3,39	216,5 ± 4,14	196,7 ± 3,58	19,8 ± 0,71	7,1 ± 1,05	34,3 ± 0,11	34,3 ± 0,004										
	R3	15,5 ± 0,04	513,7 ± 2,61	217,3 ± 3,51	197,7 ± 3,45	19,6 ± 0,39	10,0 ± 1,04	35,0 ± 0,05	35,0 ± 0,001										
	MEDIA	15,4 ± 0,00	533,5 ± 0,54	215,8 ± 0,30	195,2 ± 0,08	20,6 ± 0,19	4,2 ± 0,01	37,9 ± 1,94	37,9 ± 0,001										
B 10	R1	17,1 ± 0,04	410,6 ± 13,78	151,0 ± 7,37	136,1 ± 6,47	14,9 ± 0,96	7,9 ± 1,03	43,0 ± 1,57	0,97 ± 0,01										
	R2	17,1 ± 0,06	399,7 ± 4,81	154,6 ± 14,58	140,9 ± 12,52	13,7 ± 2,22	3,9 ± 1,70	43,2 ± 3,27	0,97 ± 0,01										
	R3	17,0 ± 0,02	428,2 ± 2,86	160,6 ± 0,87	143,7 ± 0,85	16,8 ± 0,20	7,5 ± 0,62	54,5 ± 0,77	0,97 ± 0,01										
	MEDIA	17,0 ± 0,04	412,8 ± 7,15	155,4 ± 7,61	140,2 ± 6,61	15,2 ± 1,13	6,4 ± 1,12	46,9 ± 1,87	0,97 ± 0,01										
B 0	R1	17,3 ± 0,04	354,9 ± 3,08	146,5 ± 3,73	132,3 ± 3,38	14,2 ± 0,41	14,1 ± 0,95	46,8 ± 2,00	0,97 ± 0,007										
	R2	17,2 ± 0,03	369,4 ± 3,53	155,5 ± 2,24	141,1 ± 1,61	14,4 ± 0,68	18,1 ± 0,57	41,1 ± 1,99	0,97 ± 0,007										
	R3	17,2 ± 0,03	378,4 ± 2,55	156,4 ± 2,49	140,4 ± 2,09	15,9 ± 0,47	17,4 ± 0,91	46,4 ± 3,79	0,97 ± 0,007										
	MEDIA	17,3 ± 0,00	367,5 ± 0,40	152,8 ± 0,65	138,0 ± 0,75	14,8 ± 0,12	16,1 ± 0,19	44,7 ± 0,85	0,97 ± 0,007										
MOTOGERADOR : 1250 W																			
gases	O2		CO		NOx			NO		NO2		SO2		TF		Bomba			
	unid	%	ppm															°C	l/min
B 30	R1	16,8 ± 0,03	785,0 ± 7,44	131,3 ± 2,48	90,2 ± 1,45	41,1 ± 1,20	1,7 ± 0,93	32,0 ± 0,16	0,97 ± 0,005										
	R2	16,8 ± 0,16	761,3 ± 6,58	124,1 ± 6,97	81,0 ± 10,74	37,9 ± 6,03	0,0 ± 0,15	33,4 ± 0,22	0,97 ± 0,007										
	R3	16,8 ± 0,32	735,4 ± 4,83	135,8 ± 4,51	93,9 ± 2,90	41,9 ± 1,86	3,6 ± 1,15	35,6 ± 0,07	0,97 ± 0,003										
	MEDIA	16,8 ± 0,12	760,6 ± 1,08	130,4 ± 1,84	88,4 ± 4,08	40,3 ± 2,14	0,9 ± 0,39	33,7 ± 0,06	0,97 ± 0,002										
B 20	R1	17,0 ± 0,04	812,1 ± 7,37	134,6 ± 2,81	91,5 ± 1,71	43,1 ± 1,24	0,0 ± 0,00	42,8 ± 3,13	0,97 ± 0,005										
	R2	16,9 ± 0,03	826,5 ± 7,34	127,1 ± 4,29	83,4 ± 2,50	43,7 ± 1,92	0,0 ± 0,00	32,6 ± 0,13	0,97 ± 0,005										
	R3	17,0 ± 0,03	788,0 ± 4,51	134,4 ± 0,96	91,5 ± 0,96	42,9 ± 0,10	3,7 ± 0,24	34,7 ± 0,02	0,97 ± 0,005										
	MEDIA	16,9 ± 0,03	808,9 ± 6,41	132,0 ± 2,69	88,8 ± 1,72	43,2 ± 1,08	1,2 ± 0,08	36,7 ± 1,09	0,97 ± 0,005										
B 10	R1	18,2 ± 0,02	606,0 ± 8,15	88,7 ± 2,97	61,6 ± 1,43	27,0 ± 1,65	4,4 ± 1,34	41,6 ± 2,06	0,98 ± 0,005										
	R2	18,1 ± 0,02	616,3 ± 7,42	96,3 ± 3,46	67,7 ± 3,36	28,6 ± 2,03	4,6 ± 1,25	42,9 ± 2,26	0,97 ± 0,006										
	R3	18,0 ± 0,02	626,6 ± 6,69	103,9 ± 3,95	73,8 ± 5,28	30,1 ± 2,40	4,8 ± 1,17	44,1 ± 2,46	0,97 ± 0,008										
	MEDIA	18,1 ± 0,02	616,3 ± 7,42	96,3 ± 3,46	67,7 ± 3,36	28,6 ± 2,03	4,6 ± 1,25	42,9 ± 2,26	0,97 ± 0,006										
B 0	R1	18,4 ± 0,02	565,8 ± 7,88	79,4 ± 2,66	56,7 ± 1,75	22,7 ± 0,99	13,2 ± 1,84	43,0 ± 1,75	0,97 ± 0,008										
	R2	18,4 ± 0,03	589,3 ± 5,15	82,7 ± 3,12	57,3 ± 2,00	25,5 ± 1,27	12,3 ± 2,34	41,0 ± 1,77	0,97 ± 0,007										
	R3	18,3 ± 0,04	638,7 ± 7,62	85,8 ± 2,93	58,6 ± 1,72	27,2 ± 1,27	13,1 ± 1,79	39,6 ± 1,71	0,97 ± 0,007										
	MEDIA	18,3 ± 0,03	597,9 ± 6,88	82,6 ± 2,90	57,5 ± 1,82	25,1 ± 1,17	12,8 ± 1,99	41,2 ± 1,74	0,97 ± 0,007										

MOTOGERADOR : 500 W																	
gases		O2		CO		NOx		NO		NO2		SO2		TF		Bomba	
B 30	unid	%		ppm										°C		l/min	
	R1	17,5	0,03	924,3	7,54	90,8	3,66	48,9	2,42	41,9	1,55	1,7	2,24	30,9	0,17	0,98	0,005
	R2	17,5	0,02	826,1	9,52	100,8	2,88	56,5	1,81	44,3	1,20	0,2	0,44	34,4	0,16	0,97	0,003
	R3	17,7	0,02	772,5	11,01	101,9	4,47	61,0	2,88	40,9	1,77	6,2	1,75	35,6	0,10	0,97	0,003
	MEDIA	17,6	0,00	841,0	1,42	97,8	0,65	55,5	0,44	42,4	0,23	0,9	0,90	33,7	0,03	0,97	0,001
B 20	R1	17,6	0,03	958,8	8,19	91,7	4,74	47,6	2,84	44,1	2,35	0,0	0,00	35,1	2,87	0,97	0,005
	R2	17,6	0,03	950,4	9,16	92,9	3,50	50,1	1,70	42,9	2,18	1,3	1,20	33,4	0,19	0,97	0,005
	R3	17,6	0,02	936,6	7,07	95,0	3,68	53,5	1,59	41,6	2,55	7,8	2,60	35,1	0,04	0,97	0,003
	MEDIA	17,6	0,03	948,6	8,14	93,2	3,97	50,4	2,04	42,8	2,36	0,7	1,27	34,5	1,04	0,97	0,004
B 10	R1	18,6	0,03	714,0	18,80	58,4	4,41	31,9	2,35	26,5	2,19	2,0	1,21	35,1	2,36	0,97	0,005
	R2	18,5	0,02	702,0	11,66	69,7	2,36	39,8	1,24	29,9	1,53	1,1	1,06	39,7	1,84	0,97	0,007
	R3	18,5	0,03	682,6	32,91	67,1	4,22	37,3	1,50	29,8	2,81	1,5	1,14	44,2	0,91	0,97	0,007
	MEDIA	18,5	0,03	699,5	21,1	65,1	3,7	36,3	1,7	28,7	2,2	1,5	1,1	39,7	1,7	0,97	0,006
B 0	R1	18,9	0,04	648,1	11,07	49,2	4,99	30,7	2,51	18,6	2,64	14,5	3,05	34,7	2,26	0,97	0,008
	R2	18,9	0,51	661,2	165,3	55,8	12,76	32,1	7,03	23,7	5,74	17,1	2,60	38,7	0,57	0,97	0,007
	R3	18,9	0,23	654,7	77,13	52,5	3,89	31,4	2,26	21,1	1,55	15,8	0,23	36,7	0,85	0,97	0,000
	MEDIA	18,9	0,19	654,7	63,19	52,5	3,95	31,4	2,19	21,1	1,78	15,8	0,23	36,7	0,74	0,97	0,004

### 8.3. APÊNDICE C - MÉDIA DOS RESULTADOS DE VOLTAGEM E CORRENTE EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA

MOTOGERADOR : 2000 W						
	unid	VOLTAGEM		CORRENTE		POTÊNCIA
		V		A		W
B 30	R1	209,6	± 0,89	9,5	± 0,01	1990,6 ± 8,30
	R2	206,5	± 0,78	9,6	± 0,02	1983,1 ± 7,69
	R3	205,9	± 0,76	9,6	± 0,01	1976,9 ± 7,15
	MEDIA	207,3	± 0,81	9,6	± 0,01	1983,5 ± 7,71
B 20	R1	209,8	± 0,58	9,6	± 0,04	2009,3 ± 7,46
	R2	208,9	± 0,62	9,5	± 0,02	1985,0 ± 6,02
	R3	207,9	± 0,66	9,6	± 0,01	1995,8 ± 6,33
	MEDIA	208,9	± 0,62	9,6	± 0,02	1996,7 ± 6,60
B 10	R1	209,0	± 0,58	9,6	± 0,04	2001,7 ± 7,69
	R2	210,9	± 0,62	9,5	± 0,02	2004,1 ± 7,15
	R3	206,5	± 0,66	9,6	± 0,01	1982,2 ± 7,15
	MEDIA	208,8	± 0,62	9,6	± 0,02	1996,0 ± 7,46
B 0	R1	208,3	± 0,54	9,6	± 0,03	1997,7 ± 6,02
	R2	207,9	± 0,62	9,7	± 0,00	2016,4 ± 5,94
	R3	208,3	± 0,68	9,7	± 0,03	2019,2 ± 6,22
	MEDIA	208,2	± 0,61	9,7	± 0,02	2011,1 ± 6,06
MOTOGERADOR : 1250 W						
	unid	VOLTAGEM		CORRENTE		POTÊNCIA
		V		A		W
B 30	R1	221,5	± 0,63	5,6	± 0,03	1242,3 ± 5,42
	R2	222,4	± 1,16	5,6	± 0,04	1247,6 ± 5,86
	R3	221,7	± 1,17	5,6	± 0,04	1247,0 ± 6,10
	MEDIA	221,9	± 0,99	5,6	± 0,04	1245,7 ± 5,79
B 20	R1	222,6	± 0,87	5,7	± 0,03	1267,1 ± 5,69
	R2	224,0	± 1,08	5,6	± 0,04	1256,7 ± 6,64
	R3	222,8	± 1,00	5,7	± 0,04	1267,2 ± 6,22
	MEDIA	223,1	± 0,98	5,7	± 0,03	1263,7 ± 6,18
B 10	R1	217,8	± 0,87	5,7	± 0,03	1239,7 ± 6,35
	R2	223,3	± 1,08	5,6	± 0,04	1252,6 ± 5,69
	R3	219,7	± 1,00	5,7	± 0,04	1249,5 ± 6,64
	MEDIA	220,2	± 0,98	5,7	± 0,04	1247,3 ± 6,22
B 0	R1	222,6	± 0,70	5,6	± 0,04	1251,8 ± 7,59
	R2	223,6	± 0,52	5,7	± 0,01	1275,2 ± 3,50
	R3	222,8	± 0,45	5,6	± 0,05	1256,6 ± 9,89
	MEDIA	223,0	± 0,56	5,7	± 0,03	1261,2 ± 6,99

MOTOGERADOR : 500 W						
	unid	VOLTAGEM		CORRENTE		POTÊNCIA
		V		A		W
B 30	R1	216,8	± 0,59	± 0,04		515,7 ± 8,21
	R2	214,8	± 1,54	± 0,02		515,8 ± 4,11
	R3	216,3	± 1,59	± 0,05		505,3 ± 8,01
	MEDIA	216,0	± 1,24	± 0,04		512,3 ± 6,78
B 20	R1	216,3	± 0,93	± 0,02		520,0 ± 3,83
	R2	218,0	± 1,45	± 0,04		506,9 ± 7,06
	R3	216,3	± 1,39	± 0,02		517,7 ± 5,00
	MEDIA	216,9	± 1,26	± 0,03		514,8 ± 5,29
B 10	R1	216,3	± 1,45	± 0,02		514,7 ± 3,83
	R2	218,0	± 1,39	± 0,04		517,4 ± 7,06
	R3	216,3	± 1,37	± 0,02		524,8 ± 5,00
	MEDIA	216,9	± 1,40	± 0,02		515,0 ± 2,93
B 0	R1	216,9	± 1,00	± 0,01		499,0 ± 2,51
	R2	214,3	± 0,74	± 0,00		492,9 ± 1,90
	R3	216,3	± 0,78	± 0,04		480,7 ± 8,13
	MEDIA	215,8	± 0,84	± 0,02		490,9 ± 4,18

#### 8.4. APÊNDICE D - MÉDIA DOS RESULTADOS DE MASSA CONSUMIDA NO MOTOR EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA

CONSUMO COMBUSTÍVEL				
Pot	2000	1250	500	
	CONSUMO COMBUSTÍVEL g/((15)min			
R1	126,4	98,2	83,2	B 30
R2	126,6	96,8	82,6	
R3	130,5	97,8	78,1	
MEDIA	127,8	97,6	81,3	
R1	132,4	99,0	85,1	B 20
R2	130,8	97,0	81,5	
R3	131,7	98,1	82,4	
MEDIA	131,6	98,0	83,0	
R1	129,7	98,0	83,7	B 10
R2	127,8	103,0	79,1	
R3	123,5	96,5	80,0	
MEDIA	127,0	99,2	80,9	
R1	125,0	98,0	85,1	B 0
R2	131,1	92,4	83,1	
R3	131,2	96,6	83,6	
MEDIA	129,1	95,7	83,9	

CONSUMO ESPECÍFICO COMBUSTÍVEL				
Pot	2000	1250	500	
B 30	253,9961	316,1892	645,2951	R1
	255,3601	310,3454	640,516	R2
	264,0511	313,7053	618,3002	R3
	257,7911	313,4093	634,816	MEDIA
B 20	263,5783	312,5135	654,6722	R1
	263,5765	308,7496	643,1766	R2
	263,9518	309,6618	636,6713	R3
	263,7021	310,3126	644,8661	MEDIA
B 10	259,1842	316,2055	650,5013	R1
	255,071	328,9034	611,5428	R2
	249,2177	308,9236	609,7067	R3
	254,5084	318,0247	628,5704	MEDIA
B 0	250,2933	313,1577	682,2086	R1
	260,0713	289,8474	674,34	R2
	259,9072	307,4961	695,6688	R3
	256,7788	303,4211	683,9684	MEDIA

## 8.5. APÊNDICE E – MÉDIA RESULTADOS DE MATERIAL PARTICULADO E BLACK CARBON EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA

	P. F.	P. F. + M. P	M. P. (g)	M.P. (µg)	Pot. (W)	Comb.	Exp	A. F. (cm2)	R1 (%)	R2 (%)	R3 (%)	V (M3)	BC (ug m-3)	BC (ug m-3)	BC (ug m-3)
1	0,091198	0,093905	0,002707	2707,00	500	Diesel	R1	5,31	8,8	9,1	7,5	1,00	114,96	112,81	124,79
5	0,090347	0,092756	0,002409	2409,00	500	Diesel	R2	5,31	23,6	23,2	26,0	1,00	49,69	50,72	44,05
9	0,090120	0,093568	0,003448	3448,00	500	Diesel	R3	5,31	25,4	26,6	25,1	1,00	45,38	42,76	46,07
11	0,092155	0,095201	0,003046	3046,00	500	B10	R1	5,31	19,1	19,6	22,1	1,00	62,92	61,25	53,68
15	0,091447	0,093998	0,002551	2551,00	500	B10	R2	5,31	19,7	21,2	19,0	1,00	60,92	56,26	63,26
20	0,091190	0,093875	0,002685	2685,00	500	B10	R3	5,31	16,4	20,3	14,8	1,00	73,01	59,00	79,98
24	0,092136	0,095275	0,003139	3139,00	500	B20	R3	5,31	19,7	20,7	20,2	1,00	60,92	57,76	59,31
26	0,092373	0,096488	0,004115	4115,00	500	B20	R1	5,31	18,6	20,6	20,8	1,00	64,65	58,07	57,46
30	0,092791	0,096553	0,003762	3762,00	500	B20	R2	5,31	20,7	21	19,8	1,00	57,76	56,86	60,59
31	0,09341	0,097711	0,004301	4301,00	500	B30	R1	5,31	22,9	23,1	23,3	1,00	51,51	50,98	50,46
34	0,089209	0,092038	0,002829	2829,00	500	B30	R2	5,31	16,8	18,7	18,3	1,00	71,39	64,30	65,71
39	0,090816	0,093165	0,002349	2349,00	500	B30	R3	5,31	17	17,2	20,2	1,00	70,60	69,82	59,31
2	0,090323	0,091955	0,001632	1632,00	1250	Diesel	R1	5,31	14,3	17,2	14,8	1,00	82,32	69,82	79,98
4	0,091384	0,092897	0,001513	1513,00	1250	Diesel	R2	5,31	16,0	14,6	14,5	1,00	74,68	80,90	81,37
8	0,091019	0,093863	0,002844	2844,00	1250	Diesel	R3	5,31	14,6	21,3	15,8	1,00	80,90	55,97	75,53
12	0,091403	0,09351	0,002107	2107,00	1250	B10	R1	5,31	17,2	19,8	17,4	1,00	69,82	60,59	69,05
14	0,090706	0,093083	0,002377	2377,00	1250	B10	R2	5,31	14,8	13,9	15,4	1,00	79,98	84,27	77,27
18	0,090471	0,092006	0,001535	1535,00	1250	B10	R3	5,31	11,1	13,5	16,7	1,00	99,64	86,27	71,79
22	0,089734	0,091855	0,002121	2121,00	1250	B20	R3	5,31	14,6	16,5	17	1,00	80,90	72,60	70,60
27	0,092236	0,094563	0,002327	2327,00	1250	B20	R1	5,31	15,7	15,9	16,5	1,00	75,96	75,10	72,60
29	0,088458	0,091443	0,002985	2985,00	1250	B20	R2	5,31	16,6	16,2	17,5	1,00	72,20	73,84	68,67
32	0,090507	0,093429	0,002922	2922,00	1250	B30	R1	5,31	14,6	16,2	15	1,00	80,90	73,84	79,06
35	0,08956	0,092301	0,002741	2741,00	1250	B30	R2	5,31	15,6	16,5	18,4	1,00	76,39	72,60	65,36
37	0,091033	0,093076	0,002043	2043,00	1250	B30	R3	5,31	12,6	17,7	18,7	1,00	91,00	67,91	64,30
3	0,090837	0,091867	0,001030	1030,00	2000	Diesel	R1	5,31	3,2	3,1	3,3	1,00	154,00	153,82	154,05
6	0,089895	0,09109	0,001195	1195,00	2000	Diesel	R2	5,31	6,6	4,0	3,7	1,00	132,02	151,86	153,23
7	0,090574	0,091307	0,000733	733,00	2000	Diesel	R3	5,31	3,5	2,3	6,4	1,00	153,82	143,91	133,66
13	0,091275	0,092849	0,001574	1574,00	2000	B10	R1	5,31	4,6	4,1	4,2	1,00	148,05	151,31	150,72
16	0,090865	0,092357	0,001492	1492,00	2000	B10	R2	5,31	4,1	5,1	3,7	1,00	151,31	144,27	153,23
19	0,091524	0,092612	0,001088	1088,00	2000	B10	R3	5,31	3,2	4,4	6	1,00	154,00	149,44	136,96
21	0,090586	0,09236	0,001774	1774,00	2000	B20	R2	5,31	3,8	5	5,5	1,00	152,83	145,05	141,06
23	0,090272	0,091782	0,001510	1510,00	2000	B20	R3	5,31	3,5	2,9	3,9	1,00	153,82	152,98	152,37
28	0,091957	0,093701	0,001744	1744,00	2000	B20	R1	5,31	4,1	3,9	4,3	1,00	151,31	152,37	150,09
33	0,090257	0,091885	0,001628	1628,00	2000	B30	R1	5,31	2,7	3,8	4,8	1,00	151,28	152,83	146,58
36	0,08884	0,090278	0,001438	1438,00	2000	B30	R2	5,31	2,9	3,3	3,6	1,00	152,98	154,05	153,56
38	0,090166	0,091367	0,001201	1201,00	2000	B30	R3	5,31	2,6	4,8	3,3	1,00	150,03	146,58	154,05
25	0,092303	0,092324	0,000021	21,00	Br (B20)			5,31	100			1,00	2,46		
40	0,090574	0,090624	0,000050	50,00	Br (B30)			5,31	100			1,00	2,46		

## 9. ANEXO

### 9.1. ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO MOTOGERADOR

Motogerador TD 2500 CS	
Tipo do motor	Monocilíndrico refrigerado a Ar
Combustível	Diesel
Volume câmara combustão	211 cm <sup>3</sup>
Número de cilindros	1
Rotação nominal	3600 RPM
Sistema de partida	Manual Retrátil
Sistema de refrigeração	Ar
Capacidade de combustível	2,5 l
Capacidade de óleo	0,75 l
Filtro de ar	Seco Duplo Elemento
Frequência nominal	60 Hz
Regulador de tensão	Capacitor
Potência nominal	3,13 kW
Potência máxima	3,51 kW
Potência nominal	2,0 Kw
Potência máxima	2,2 Kw
Tensão de saída nominal	127 V e 220 V
Corrente nominal	18,2 A / 9,1 A
Numero de fases	Monofásico
Fator de potencia $\cos \phi$	1
Numero de tomadas	2x110 V e 1x220 V
Saida cc	12 V / 8,3 A
Nível de ruído a 7m dist.	75 db

**Fonte :**Manual TOYAMA

## 9.2. ANEXO B - ANALISADOR DE GASES TESTO-350

Parâmetro	Range	Resolução	exatidão
O <sub>2</sub>	0...25vol. %	0.01vol. %	±0,2 % vol
CO	0...10000 ppm	1 ppm	±2 ppm
NO	0...4000 ppm	1 ppm	±5 ppm
NO <sub>2</sub>	0...500 ppm	0.1 ppm	±5 ppm
SO <sub>2</sub>	0...5000 ppm	1 ppm	±5 ppm
Velocidade de fluxo	0...40m/s	0.1m/s	±0,1 l/min
Tipo K (NiCr-Ni)	-200 to 1370°C	0.1°C	±0,4°C

**Fonte:** Adaptado Manual Testo-350

## 9.3. ANEXO C - ALICATE WATTÍMETRO

Alicate wattímetro: IMIMIPA ET- 4055			
Parâmetro	Range	Resolução	Exatidão
Tensão AC [V- True RMS]	150V	0,1	± 1,2 % +5
	300V		
	600V		
Corrente AC [A- True RMS]	50A	0,1 A	± 2 % +5
	250A	0,1 A	
	1000A	1 A	
Frequência [Hz]	40 a 80	0,01	± 1,2 % +5
Potencia Ativa [ $W = V \times A \times \cos F$ ]	<100Kw	0,01	± 3 % +5
Temperatura de operação 23 ± 5°C			
Umidade relativa: 45 a 75 %			

**Fonte:** Manual Imimipa