

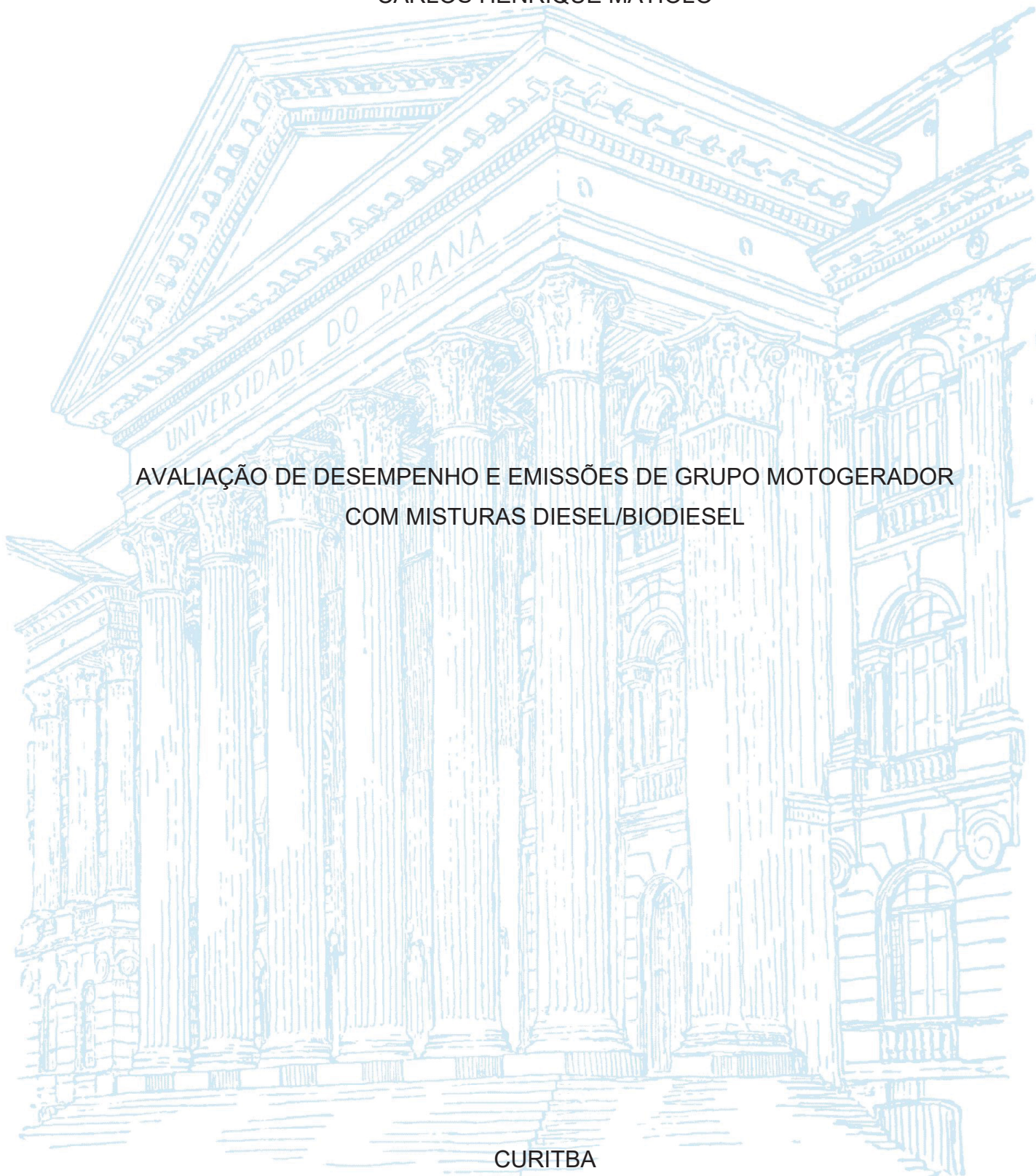
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS HENRIQUE MATIOLO

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E EMISSÕES DE GRUPO MOTOGERADOR  
COM MISTURAS DIESEL/BIODIESEL

CURITIBA

2021



CARLOS HENRIQUE MATIOLO

AVALIAÇÃO DE EMISSÕES E DESEMPENHO DE GRUPO MOTOGERADOR COM  
MISTURAS DIESEL/BIODIESEL

Dissertação submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof PhD. José Viriato Coelho Vargas

Coorientador: Prof Dr. André Bellin Mariano

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M433a

Matiolo, Carlos Henrique

Avaliação de emissões e desempenho de grupo motogerador com misturas diesel/biodiesel [recurso eletrônico] / Carlos Henrique Matiolo. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.

Orientador: José Viriato Coelho Vargas – Coorientador: André Bellin Mariano.

1. Motores de combustão interna. 2. Diesel. 3. Biodiesel. 4. Carbono. 5. Nitrogênio. 6. Enxofre. 7. Ar - Poluição. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vargas, José Viriato Coelho. III. Mariano, André Bellin. IV. Título.

CDD: 621.436

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
MECÂNICA - 40001016040P5

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CARLOS HENRIQUE MATIOLO** intitulada: **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E EMISSÕES DE GRUPO MOTOGERADOR COM MISTURAS DIESEL/BIODIESEL**, sob orientação do Prof. Dr. JOSE VIRIATO COELHO VARGAS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 17 de Agosto de 2021.

JOSE VIRIATO COELHO VARGAS Presidente da Banca Examinadora

JEFERSON AVILA SOUZA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE)

LUCIANO KIYOSHI ARAKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## RESUMO

Nas últimas duas décadas, o governo brasileiro tem implementado medidas que incentivam a produção e o consumo de combustíveis sustentáveis, provenientes de vegetais oleaginosas, óleos residuais, e/ou microalgas, adquirindo no final do processo de produção o biodiesel. A partir disso, entender qual será o comportamento de um motor gerador, com estes novos combustíveis em mistura com o diesel é de extrema importância, para que possa se identificar os impactos gerados no equipamento e no ambiente. Este presente trabalho tem como objetivo analisar o rendimento, emissões e demais propriedades de um motor. O grupo motor gerador a diesel utilizado foi o modelo 12W, da Maqui Geral, com a capacidade de 44kW, o motor a diesel instalado é um MWM D229/4, de aspiração natural, e está acoplado ao gerador WEG GTA 201 AIHV. Para caracterizar o equipamento, foi utilizado primeiramente o combustível B11 (diesel de petróleo adicionado 11% de biodiesel), proveniente do posto gasolina. Em seguida, utilizou-se mais 4 misturas de diesel e biodiesel, previamente preparadas em laboratório, com as seguintes proporções de biodiesel 25%, 50%, 75% e 100% de biodiesel (B25, B50, B70 e B100). Foram aplicadas potências de saída (cargas de energia) de 5kW, 14kW e 24kW, a velocidade de rotação constante de 1800 rpm, através do consumo de energia no NPDEAS, ligando por exemplo: lâmpadas, computadores, compressores e outros equipamentos instalados no laboratório. Os seguintes parâmetros foram medidos experimentalmente: temperatura ambiente, temperatura de exaustão, variação da massa de combustível, emissões e dados de rendimento e potência. A partir destes valores foi possível determinar o consumo de combustível, eficiência mecânica, consumo específico de combustível, eficiência de 1ª lei, eficiência de Carnot e eficiência de 2ª lei, além do percentual de emissão de CO<sub>2</sub> e quantidade de poluentes gerados de CO, NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, em ppm. O B11 foi a mistura com menor consumo. O B25 obteve a maior eficiência de 1ª lei em cargas pequenas, e o B50 na carga maior. Para a eficiência de 2ª lei, só foi possível analisar a menor carga, onde o B11 mostrou o melhor desempenho. Para as emissões, o B25 foi a blenda que menos gerou CO, NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, e o B50 que percentualmente gerou menos CO<sub>2</sub>. Destaca-se como sugestão mais importante para trabalhos futuros, a necessidade de aperfeiçoar a medição da temperatura dos gases de exaustão, para que os resultados de eficiência de Carnot e a eficiência de 2ª lei sejam o mais condizentes possível com a realidade.

Palavras-chave: Motor gerador; Biodiesel; Eficiência de 1ª lei; Eficiência de 2ª lei; Emissões.

## ABSTRACT

In the last two decades, the Brazilian government has implemented measures that encourage the production and consumption of sustainable fuels, from oleaginous vegetables, residual oils, and/or microalgae, acquiring biodiesel at the end of the production process. From this, understanding what the behavior of a motor generator will be, from these new fuels mixed with diesel is extremely important, so it is possible to identify the impacts generated on the equipment and on the environment. This present work aims to analyze the efficiency, emissions, and other properties of an engine. The diesel generator set used was the 12W model, by Maquigeral, with a capacity of 44kW, the diesel engine installed is a MWM D229/4, with natural aspiration, and is coupled to the WEG GTA 201 AIHV generator. To characterize the equipment, firstly was used the B11 (petroleum diesel with 11% biodiesel), from the gas station. Then, another 4 mixtures, previously prepared in the laboratory, of diesel and biodiesel were used with the following proportions of biodiesel 25%, 50%, 75% and 100% biodiesel (B25, B50, B70 and B100). Output power (energy loads) of 5kW, 14kW and 24kW were applied, by constant speed of 1800 rpm, through the energy consumption in the NPDEAS, connecting for example: lamps, computers, compressors, and other mechanical equipment installed in the laboratory. The following parameters were experimentally measured: ambient temperature, exhaust temperature, fuel mass variation, emissions and, efficiency and power data. From the data generated, it was possible to determine fuel consumption, mechanical efficiency, 1st law efficiency, Carnot efficiency and 2nd law efficiency, percentage of CO<sub>2</sub> emission and pollutants generated from CO, NO, NO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in ppm. B11 was the mixture with the best consumption. The B25 achieved better 1st law efficiency in lower loads, and B50 in the high load. For 2nd law efficiency, it was only possible to analyze the smallest load, where the B11 performed better. For emissions, B25 was the blend that generated the least CO, NO, NO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>, and B50, which in percentage generated the least CO<sub>2</sub>. The most important suggestion for future work is the need to improve the measurement of the temperature of exhaust gases, so that the results of Carnot efficiency and 2nd law efficiency are as consistent as possible with reality.

Keywords: Genset; Biodiesel; 1st law efficiency; 2nd law efficiency; Emissions.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – COMPOSIÇÃO CONSUMO FINAL DE ENERGIA POR FONTE NO BRASIL 1970-2018 .....	12
FIGURA 1.2 – DEPENDÊNCIA EXTERNA DE PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS 2009-2018 .....	13
FIGURA 2.1 – SISTEMA IGNIÇÃO CICLO OTTO E CICLO DIESEL .....	16
FIGURA 2.2 – OS 4 TEMPOS DO MOTOR DO MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO.....	17
FIGURA 2.3 – DIAGRAMA TEÓRICO E REAL CICLO DIESEL .....	18
FIGURA 2.4 – ESTIMATIVA DE EFICIÊNCIA TÉRMICA PARA POTÊNCIA MÁXIMA .....	20
FIGURA 2.5 – COMPOSTOS PRESENTES NO DIESEL.....	21
FIGURA 2.6 – EMISSÕES EM FUNÇÃO DA RAZÃO AR/COMBUSTÍVEL.....	26
FIGURA 2.7 – IMPACTOS DAS EMISSÕES COM O USO DE BIODIESEL EM MOTORES RODOVIÁRIOS .....	27
FIGURA 3.1 – DIAGRAMA ESQUEMATICO DA PLANTA DO NPDEAS .....	40
FIGURA 3.2 – GRUPO MOTOGERADOR 44 KW, INSTALADO NO NPDEAS .....	41
FIGURA 3.3 – MISTURAS COMBUSTÍVEIS B25, B50, B75 E B100 PRODUZIDAS PELO NPDEAS DA UFPR. ....	43
FIGURA 3.4 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO APARATO EXPERIMENTAL .....	44
FIGURA 4.1 – MOTOGERADOR LIGADO A REDE COPEL .....	51
FIGURA 4.2 – MODULO CONTROLADOR WOODWARD EASTGEN 3000XT .....	52
FIGURA 4.3 – EMISSÕES DE CO .....	53
FIGURA 4.4 – EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	54
FIGURA 4.5 – EMISSÕES DE NO <sub>2</sub> .....	55
FIGURA 4.6 – EMISSÕES DE NO E NO <sub>x</sub> .....	56
FIGURA 4.7 – CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	57
FIGURA 4.8 – POTÊNCIA EFETIVA, POTÊNCIA INDICA E TAXA DE GERAÇÃO DE CALOR.....	58
FIGURA 4.9– TEMPERATURA DE EXAUSTÃO .....	59
FIGURA 4.10 – CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL .....	60
FIGURA 4.11 – EFICIÊNCIA MECÂNICA.....	61
FIGURA 4.12 – EFICIÊNCIA DE 1ª LEI .....	62

FIGURA 4.13 – EFICIÊNCIA DE CARNOT .....	63
FIGURA 4.14 – EFICIÊNCIA DE 2ª LEI .....	64



## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – ESPECIFICAÇÃO DOS ÓLEOS DIESEL DE USO RODOVIÁRIO ...	23
TABELA 2.2 – PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS DE DIFERENTES ORIGENS.....	24
TABELA 3.1 - DADOS TÉCNICOS GRUPO MOTOGERADOR MAQUIGERAL 12W .....	42
TABELA 3.2 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DAS AMOSTRAS DE .....	43
TABELA 3.3 – CARACTERÍSTICAS DO ANALISADOR DA QUALIDADE DE ENERGIA .....	45
TABELA 3.4 – CARACTERÍSTICAS MULTÍMETRO ICEL MANAUS MD-1700.....	45
TABELA 3.5 – CARACTERÍSTICAS DO TERMÔMETRO INFRAVEMELHO VONDER TIV 6500 .....	46
TABELA 3.6 – CARACTERÍSTICAS MEDIÇÃO TESTO MODELO 350 .....	46

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DO PROJETO DE DISSERTAÇÃO.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA – CICLO DIESEL .....	15
2.1.1	Parâmetros de desempenho e eficiência do motor.....	19
2.2	COMBUSTÍVEIS .....	21
2.2.1	Diesel.....	21
2.2.2	Biodiesel .....	22
2.2.3	Propriedades do diesel e biodiesel .....	23
2.3	EMISSÕES .....	25
2.3.1	Óxidos de carbono .....	27
2.3.2	Óxidos de nitrogênio .....	29
2.3.3	Óxidos de enxofre.....	30
2.4	EFEITOS NA EFICIÊNCIA E EMISSÕES QUANDO APLICADO BODIESEL EM UM MOTOR CICLO DIESEL.....	31
2.5	DESAFIOS .....	37
2.6	OBJETIVOS .....	38
2.6.1	Objetivo Geral .....	38
2.6.2	Objetivos Específicos.....	38
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
3.1	LIGAÇÃO DO GRUPO MOTOGERADOR À REDE COPEL/PR .....	39
3.2	DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL.....	39
3.2.1	O motogerador do npdeas .....	39
3.2.2	Diesel, Biodiesel e suas misturas .....	42
3.2.3	Instrumentos para aquisição dos dados.....	44
3.3	CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE EMISSÕES E DESEMPENHO DO SISTEMA ALIMENTADO POR DIFERENTES MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS.....	46
3.3.1	Caracterização das emissões .....	46
3.3.2	Parâmetros de desempenho do motor.....	47
3.3.3	Rendimentos .....	47
3.4	ANÁLISE DE INCERTEZAS .....	49

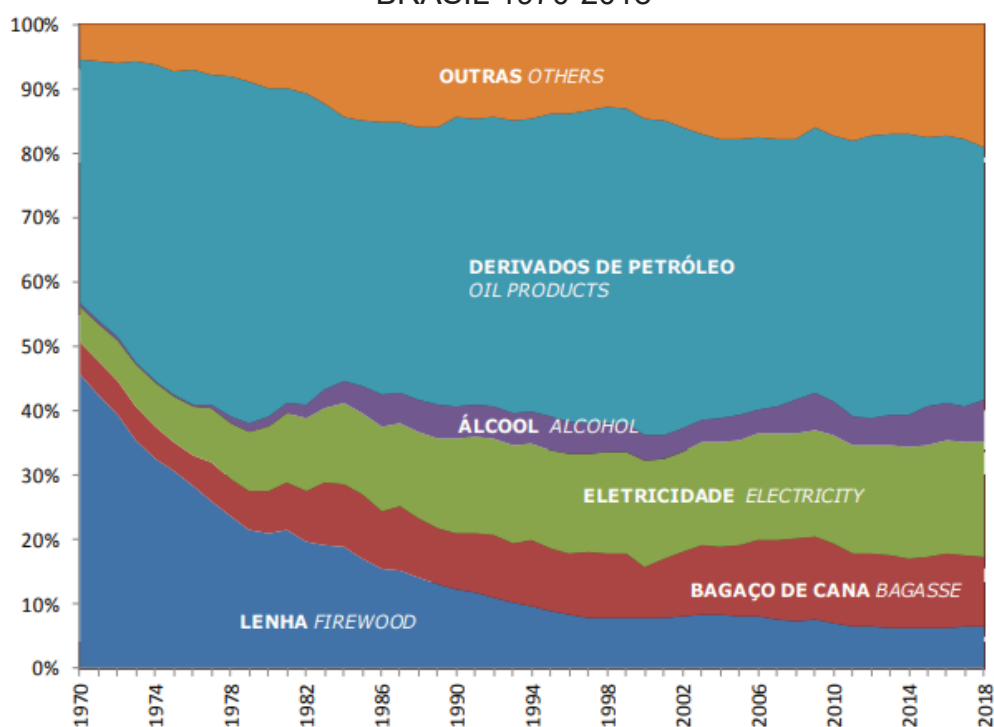
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>51</b>
4.1	LIGAÇÃO DO GRUPO MOTOGERADOR À REDE COPEL/PR .....	51
4.2	DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL.....	52
4.3	CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE EMISSÕES E DESEMPENHO DO SISTEMA ALIMENTADO POR DIFERENTES MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS.....	53
4.3.1	Emissões .....	53
4.3.1.1	<i>Óxidos de carbono</i> .....	53
4.3.1.2	<i>Óxidos de Nitrogênio</i> .....	54
4.3.2	Consumo de combustível.....	56
4.3.3	Potência efetiva, potência indica e taxa de geração de calor .....	57
4.3.4	Temperatura dos gases de exaustão.....	59
4.3.5	Eficiência.....	60
4.3.5.1	<i>Consumo específico de combustível</i> .....	60
4.3.5.2	<i>Eficiência mecânica</i> .....	61
4.3.5.3	<i>Eficiência de 1ª lei, Eficiência de Carnot e Eficiência de 2ª lei</i> .....	62
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>65</b>
5.1	CONCLUSÃO .....	65
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	66
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>
	<b>APENDICE A – CERTIFICADOS DE ANÁLISE DO LACAUT.....</b>	<b>71</b>
	<b>APENDICE B – RESULTADO DE ANÁLISE DO CEPESQ.....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXO A – RESULTADO DOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Conforme apresentado pelo Ministério de Minas e Energia através do Balanço Energético Nacional (BEN) do ano de 2019, referente ao ano base de 2018, os derivados de petróleo nos últimos 30 anos sempre foram a fonte energética de maior utilização, com os produtos de maior destaque em 2018 sendo o diesel (16,7%) e a gasolina (8,4%), como consta os dados na figura 1.1. Neste mesmo período, ocorreu a diminuição do uso de lenha e um aumento contínuo da energia elétrica, cujo crescimento está atrelado às ações regulatórias, nas quais dão a possibilidade de ser compensado pelo excedente de energia produzida por sistemas de menor capacidade instalada (BRASIL. BEN, 2019).

FIGURA 1.1 – COMPOSIÇÃO CONSUMO FINAL DE ENERGIA POR FONTE NO BRASIL 1970-2018



FONTE: Brasil (2018)

Através do Anuário Estatístico de 2019 da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustível (ANP), observa-se que mesmo havendo um superávit no comércio internacional de petróleo e derivados, ainda há uma dependência externa no que diz respeito aos subprodutos obtidos no refino de petróleo (figura 1.2), sendo o principal

importado o diesel. Além disso, com base no mesmo relatório, pode-se observar que a produção de biodiesel nos últimos 10 anos teve um aumento de 337,5%, através do RenovaBio, a política nacional de biocombustíveis, instituída pela Lei nº 13.576/2017, sendo sua principal frente a adequação dos biocombustíveis na matriz energética nacional.

FIGURA 1.2 – DEPENDÊNCIA EXTERNA DE PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS 2009-2018

ESPECIFICAÇÃO	DEPENDÊNCIA EXTERNA DE PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS (MIL M <sup>3</sup> /DIA)									
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Produção de petróleo (a) <sup>1</sup>	322,6	339,8	348,6	341,7	336,1	373,0	401,8	414,5	434,5	428,3
Importação líquida de petróleo (b) <sup>2</sup>	-21,1	-46,5	-43,4	-37,6	1,6	-19,7	-65,6	-98,2	-134,7	-149,0
Importação líquida de derivados (c)	2,1	37,2	46,0	33,6	45,3	47,6	33,5	45,0	63,8	53,2
Consumo aparente (d)=(a)+(b)+(c)	303,7	330,5	351,3	337,6	383,1	400,9	369,7	361,3	363,5	332,5
Dependência externa (e)=(d)-(a)	-18,9	-9,3	2,7	-4,1	46,9	27,9	-32,1	-53,2	-70,9	-95,8
<b>Dependência externa (e)/(d) %</b>	<b>-6,2</b>	<b>-2,8</b>	<b>0,8</b>	<b>-1,2</b>	<b>12,3</b>	<b>7,0</b>	<b>-8,7</b>	<b>-14,7</b>	<b>-19,5</b>	<b>-28,8</b>

FONTE: Brasil, ANP (2019)

Desta forma, para minimizar o uso de combustíveis fósseis derivados do petróleo, que além de serem finitos, diminuem o superávit da dependência externa de petróleo, caminhos alternativos devem ser estudados, através de linhas sustentáveis, como por exemplo, a geração de combustível através de vegetais oleaginosos, óleos residuais ou microalgas, tendo como um dos principais produtos o biodiesel (FERNANDES, 2015). Assim, a lei Nº 13.236 sancionada em 23 de março 2016, fomenta o desenvolvimento da indústria de biocombustíveis, obrigando o uso de biodiesel no diesel vendido ao consumidor, devendo ser adicionado 10% de biodiesel em até 36 meses da data de promulgação, e após este período pode ser adicionado até 15% de biodiesel.

Com o intuito de diminuir o consumo de derivados de petróleo, aumentar a tecnologia nacional de biocombustíveis e ter geração de energia sustentável, o Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável da Universidade Federal do Paraná (NPDEAS -UFPR) em parceria com o programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico da Companhia Paranaense de Energia - COPEL, por meio do projeto "Impacto e Análise do Uso de Biodiesel na Minirrede", PD 2866-0470 / 2017, regulamentado pela ANEEL, foram realizados experimentos para identificar o comportamento de misturas com maiores percentuais de biodiesel no diesel em

motogeradores, obtendo parâmetros como: desempenho mecânico e térmico, eficiências de 1ª lei e 2ª lei, e emissões de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO e NO<sub>2</sub>.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO PROJETO DE DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1 foram apresentadas a contextualização e a motivação para elaboração da dissertação de mestrado, bem como a organização e escopo deste projeto de dissertação. Já no Capítulo 2, será realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de esclarecer conceitos básicos sobre o motor a diesel, combustíveis diesel e biodiesel e suas propriedades, as emissões geradas por ambos os óleos, e ao final deste capítulo apresentar o estado da arte. No Capítulo 3 está descrita a metodologia que foi implementada no procedimento experimental do trabalho. No Capítulo 4 estão descritos os resultados obtidos através dos experimentos realizados. No Capítulo 5, traz as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de esclarecer conceitos sobre um motor de combustão interna, seus parâmetros termodinâmicos, o uso de diferentes misturas de diesel e biodiesel, e as emissões que são geradas. Por fim, será exposto trabalhos relevantes que já foram estudados anteriormente, que são pertinentes a esta dissertação.

### 2.1 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA – CICLO DIESEL

O conceito de motor surge do princípio de trabalho, que é a medição da energia que se transfere por meio da realização de uma força ao longo de uma distância percorrida. A partir disso, o conceito de energia mecânica pode ser introduzido, sendo essa a energia gerada através do trabalho que um corpo realiza e que pode ser transferida para outros corpos. Desta forma, foi criada uma máquina que transforma qualquer tipo de energia em energia mecânica, tal equipamento denomina-se motor. Um motor tem a possibilidade de ter como energia primaria diferentes segmentos, podendo ser pneumático, hidráulico, elétrico, e a combustão, por exemplo (HALLIDAY, 2012; BRUNETTI, 2012a).

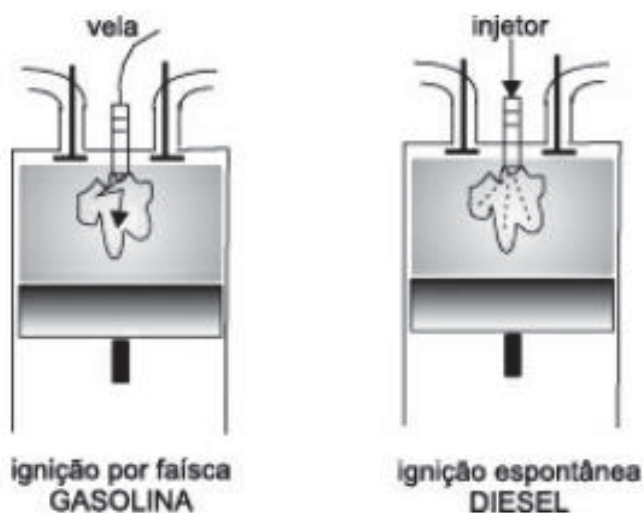
Os motores à combustão são aqueles que por meio de um ou mais combustíveis transformam a energia térmica em energia mecânica. O principal fator físico-químico desta transferência, como o nome já indica, é a combustão, uma reação química exotérmica entre um combustível e um comburente, podendo este ser o oxigênio presente no ar. Além de liberar calor, a reação de queima tem como principais produtos as seguintes substâncias: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, hidrocarbonetos e materiais particulados. O combustível a ser queimado pode ser de origem fóssil, tal como gasolina, óleo diesel, óleo combustível, gás natural, carvão mineral, ou pode ser oriundo de fontes renováveis, tais como biometanol, biodiesel, metanol, hidrogênio, lenha (RENDEIRO *et al*, 2008).

Os motores de combustão interna apresentam três partes principais: cabeçote, bloco e cartes. O cabeçote tem a função de selar os cilindros, além disso acomodam as seguintes partes do motor: válvulas de admissão e escape, bicos injetores e canais de circulação do líquido de arrefecimento. Dependendo da forma que foi elaborado o motor, os cabeçotes podem ser individuais, quando são um para cada cilindro, ou

múltiplos, quando um único cabeçote cobre mais de um cilindro ou todos eles. No bloco do motor se alojam os conjuntos de cilindros, que é composto pelas seguintes partes: pistões com anéis de segmento, camisas, bielas, árvore de manivelas, comando de válvulas, mancais e buchas. Quando os blocos são fabricados, em sua grande maioria, a sua composição é de ferro fundido e usinado para aguentar as altas temperaturas do processo de combustão. O cárter fecha o bloco na sua parte inferior e serve como depósito para o óleo lubrificante do motor, geralmente é fabricado de chapa dura prensada (TAYLOR, 1971 e VARELLA, 2010).

Dentre eles, se destaca o motor de ignição por compressão (ciclo Diesel) e o motor de ignição por centelha (Ciclo Otto). No ciclo diesel, a sua operação ocorre da seguinte forma: o pistão comprime o ar, até que ele atinja uma temperatura de autoignição, neste momento injeta-se o combustível que reage espontaneamente com o oxigênio presente no ar superaquecido, acarretando a reação de combustão. O ciclo Otto se diferencia, pois, a mistura ar-combustível são postas na câmara de combustão juntas e a ignição é realizada através de centelha. (MARTINS, 2006). A figura 2.1 ilustra a estrutura do sistema de um motor ciclo diesel e ciclo Otto.

FIGURA 2.1 – SISTEMA IGNIÇÃO CICLO OTTO E CICLO DIESEL



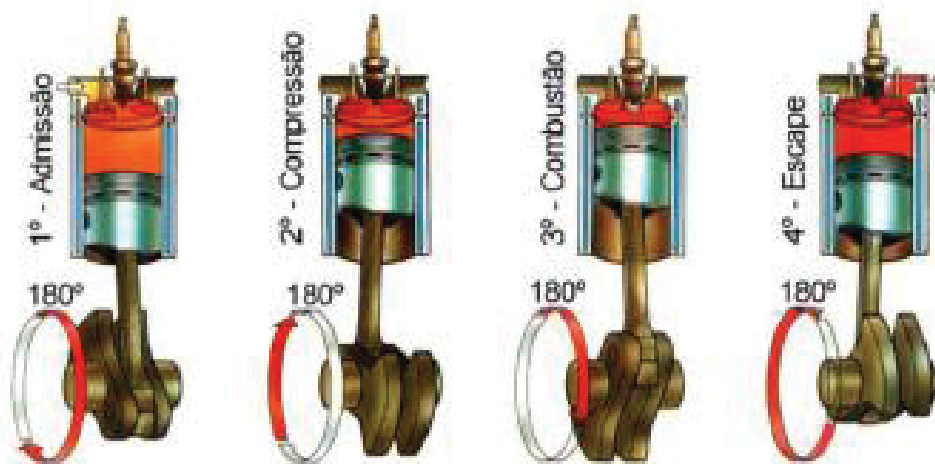
Fonte: Filippo Filho (2014)

Dentre os motores ciclo diesel, o motor de 4 tempos é o de maior uso e aplicação. A explicação para tal fato se dá pois são mais eficientes e menos poluentes comparados a outras formulações (TAYLOR, 1971). Essa nomenclatura é dada pois



há 4 estágios característicos, onde o virabrequim precisa realizar duas voltas para que o motor complete o ciclo de combustão. Como pode ser observado pela figura 2.2.

FIGURA 2.2 – OS 4 TEMPOS DO MOTOR DO MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO



Fonte: Brunetti (2012a)

Conforme apresentado por OBERT (1971), os 4 tempos do motor de combustão interna são:

1) Admissão - neste instante o pistão desloca-se do ponto morto superior (PMS), para o ponto morto inferior (PMI), e abre-se a válvula de admissão onde o cilindro é preenchido por ar. O PMS e PMI se referem aos pontos extremos do pistão, caracterizando os volumes máximos e mínimos.

2) Compressão - neste instante, o pistão desloca-se do PMI para o PMS, comprimindo o ar, trazendo um aumento na temperatura e ela será maior do que o mínimo para a autoignição do combustível.

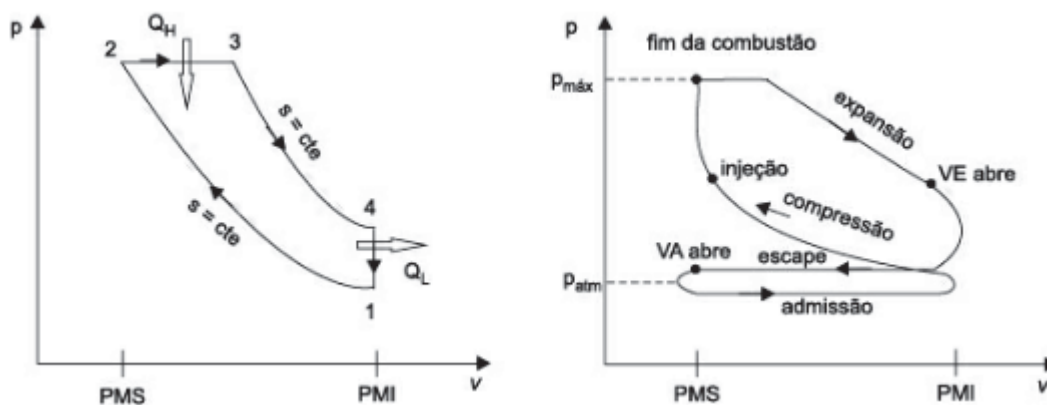
3) Expansão - se injeta o combustível no ar quente, iniciando o processo de combustão espontânea. A combustão provoca o aumento da pressão, que permite deslocar o pistão para o PMI. Nesta etapa se realiza o trabalho positivo do motor.

4) Escape - Com a válvula de escape aberta, o pistão desloca-se do PMI ao PMS, emburrando os gases de combustão para fora do cilindro, reiniciando o ciclo.

O ciclo real de combustão do motor apresentado é complexo pelas ações físicas e químicas presentes. Porém, com algumas aproximações e ferramentas é

possível realizar a análise termodinâmica dos motores ciclo diesel. A figura 2.3 apresenta o comparativo do ciclo padrão ar com o ciclo real. É a partir do ciclo padrão ar que são feitas as imposições que simplificam o processo de combustão num motor de combustão interna.

FIGURA 2.3 – DIAGRAMA TEÓRICO E REAL CICLO DIESEL



Fonte: Filippo Filho (2014)

Para Brunetti (2012a) o diagrama do ciclo diesel real pode ser descrito da seguinte maneira:

1) Admissão: com a válvula de admissão aberta, de tal forma que o cilindro esteja em contato com o ambiente. A pressão em seu interior mantém-se um pouco menor que a pressão atmosférica, dependendo da perda de carga no sistema de admissão, succionada pelo movimento do pistão.

2) Compressão: atinge-se uma pressão final mais elevada em decorrência da maior taxa de compressão necessária para se ultrapassar a temperatura de autoignição do combustível. Entre 1 e 2, inicia-se a injeção de combustível, antes mesmo do fim da compressão.

3) Combustão e Expansão: com a injeção de combustível de forma controlada até o final da combustão. Por consequência dessa injeção controlada e da expansão simultânea, a pressão, que pela combustão deveria aumentar e pela expansão diminuir, mantém-se aproximadamente constante, formando um patamar no diagrama.

4) Escape: ao final da etapa 3-4 um pouco antes de chegar no PMI, abre-se a válvula de escape e os gases, por conta da alta pressão, escapam rapidamente até alcançar uma pressão próxima da atmosférica. O pistão desloca-se do PMI para o

PMS expelindo os gases queimados contidos no cilindro, e a pressão mantém-se ligeiramente maior que a atmosférica. Alcançado o PMS reinicia-se o ciclo pela etapa de admissão.

### 2.1.1 Parâmetros de desempenho e eficiência do motor

Embora existam diferentes, formas de tratar o desempenho e eficiência de um motor a diesel, especificamente nesta seção serão vistos apenas os conceitos que serão pertinentes para entendimento dos próximos capítulos. Alguns parâmetros são fundamentais para conhecer a eficiência de um motor, como exemplo: consumo de combustível, potências, taxa de geração de calor, temperaturas da fonte quente e fonte fria. A partir disso, tomando medições em diferentes cargas, pode-se plotar curvas do consumo específico, eficiência mecânica, térmica, máxima, entre outras, caracterizando o equipamento.

Dentre as potências existentes, as mais relevantes são a potência efetiva,  $P_e$ , a potência indicada,  $P_i$ , e a potência térmica, neste trabalho chamada de taxa de geração de calor,  $\dot{Q}$ . A potência efetiva é potência que o motor gerou, menos a que ele próprio consumiu, ou seja, a potência disponível para eixo do motor. Já a potência indicada representa toda a energia gerada que se transformou em trabalho. A taxa de geração de calor, é proveniente da combustão da mistura ar-combustível, e representa a capacidade térmica do motor, ou seja, é o calor fornecido por unidade de tempo pela queima do combustível (HEYWOOD, 1988 e FILIPPO FILHO, 2014).

O consumo específico de combustível (sfc) mensura a quantidade de combustível necessária para produzir uma unidade de potência, neste trabalho apresentado em g/KW.h, o sfc é um parâmetro importante pois quanto menor for seu valor maior será eficiência do motor. Outro parâmetro importante é eficiência mecânica do motor,  $\eta_m$ , ela é a razão entre potência efetiva e potência indicada do motor. Com este parâmetro, pode se analisar quanto do trabalho se perdeu para as forças de atrito (TAYLOR, 1971 e FILIPPO FILHO, 2014).

Como nem todo o calor é transformado em trabalho, uma parte é cedida à fonte fria e outra parte pode não chegar a se converter, uma vez que a combustão não é completa, desta forma se determina a eficiência térmica, ou eficiência de 1ª lei ( $\eta_1$ ). Com a eficiência de 1ª lei pode-se analisar quantos por cento da potência térmica

disponível na máquina é possível gerar trabalho. Já a eficiência de Carnot ( $\eta_C$ ), pode ser vista como a eficiência térmica máxima que uma máquina pode alcançar (HEYWOOD, 1988 e BEJAN, 2016). Na figura 2.4, apresenta uma estimativa entre a razão de temperatura das fontes fria e quente, a eficiência de 1ª lei para um motor ciclo diesel, com sua respectiva eficiência de Carnot.

FIGURA 2.4 – ESTIMATIVA DE EFICIÊNCIA TÉRMICA PARA POTÊNCIA MÁXIMA

Temperature ratio, $T_-/T_+$	Diesel cycle	Carnot cycle
0.05	0.763	0.95
0.10	0.672	0.90
0.15	0.603	0.85
0.20	0.545	0.80
0.25	0.493	0.75
0.30	0.447	0.70
0.35	0.404	0.65
0.40	0.364	0.60
0.45	0.326	0.55
0.50	0.291	0.50
0.55	0.256	0.45
0.60	0.224	0.40
0.65	0.193	0.35
0.70	0.163	0.30
0.75	0.134	0.25
0.80	0.105	0.20
0.85	0.078	0.15
0.90	0.051	0.10
0.95	0.025	0.05
1.00	0.000	0.00

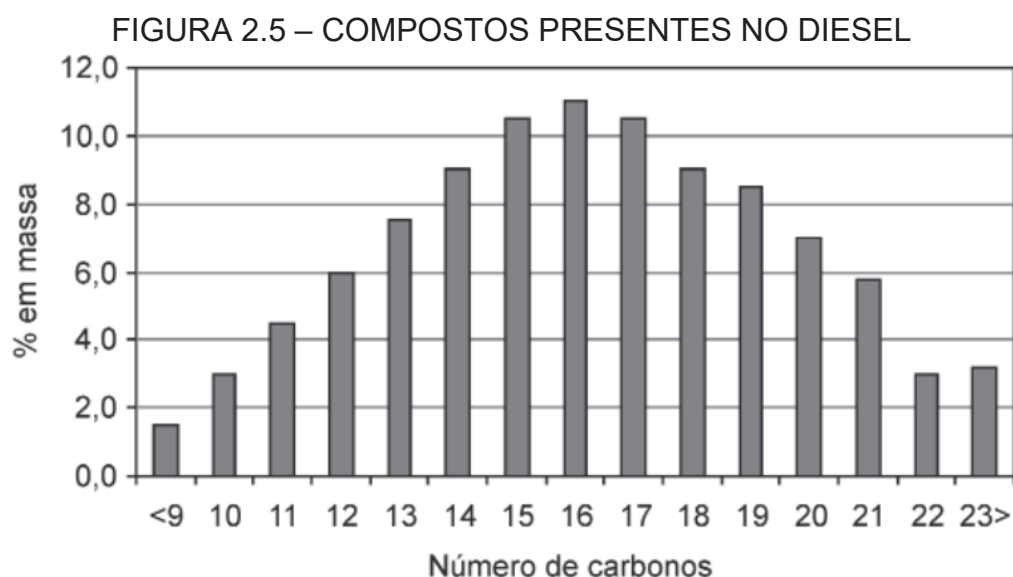
Fonte: Adaptado de LEFF (1986)

A eficiência da 2ª lei da termodinâmica ( $\eta_{II}$ ) é representada, de forma simplificada, a partir do funcionamento do motor térmico em contato com dois reservatórios de temperatura distintas. A função do dispositivo (o sistema fechado) é produzir trabalho absorvendo calor de um reservatório de alta temperatura e rejeitando o calor para um reservatório de baixa temperatura. A ocorrência simultânea de absorção e rejeição de calor é uma consequência do segundo lei da termodinâmica. O teorema do trabalho perdido, é uma característica integrante deste desenho, pois o trabalho destruído aumenta em proporção ao afastamento do limite de operação reversível. A “eficiência” do dispositivo de produção de trabalho está relacionada à destruição do trabalho disponível dentro do dispositivo. (BEJAN, 2016).

## 2.2 COMBUSTÍVEIS

### 2.2.1 Diesel

O óleo diesel é um derivado do petróleo líquido, proveniente da sua destilação a temperaturas entre 120°C e 400°C. Composto por hidrocarbonetos com cadeias carbônicas de 8 a 16 cadeias carbônicas. A molécula de maior importância presente neste combustível é o composto  $C_{16}H_{34}$ , como pode ser visualizado pela figura 2.5. Em sua mistura o diesel tem a possibilidade de ter compostos parafínicos (cadeia aberta), naftênicos (cadeia fechada) ou aromáticos (SZKLO e ULLER, 2008).



FONTE: Szklo e Uller (2008).

A produção de óleo diesel é se origina de dois subprodutos da destilação, obtendo diesel leve e pesado. No diesel pesado é preciso realizar mais processos dentro da refinaria para poder atender as especificações de comercialização. Tanto o óleo leve, proveniente na coluna de destilação, quanto o óleo oriundo de outros processos na refinaria, possuem altos teores de enxofre, compostos nitrogenados e alguns compostos com oxigênio, além de grande percentual de moléculas com duplas ligações. (FAHIM, ALSAHAF, e ELKILANI, 2012 e BRASIL, 2021).

Na composição final do óleo diesel, quando está pronto para ser enviado a consumo, as composições de diesel leve e pesados são balanceadas, de maneira que as propriedades do combustível estejam dentro das especificações, permitindo o desempenho esperado nos motores (BRUNETTI, 2012a e OBERT, 1971).

### 2.2.2 Biodiesel

Por conta da grande dependência do mercado internacional de petróleo, a necessidade do desenvolvimento de diferentes setores do país, tais como: agricultura e economia, além dos tópicos que são levantados em relação ao uso incessante de combustíveis fósseis. Trouxe a necessidade do desenvolvimento de novas fontes de energia. Para atender essas demandas, há os biocombustíveis, que tem sua principal origem óleos vegetais, gorduras animais ou produtos residuais, como o metano gerado em aterros sanitários. (ANP, 2020).

No ano de 2004, o Governo Federal brasileiro iniciou as pesquisas com biodiesel. Porém, somente a partir de 2005 que começou de fato a comercialização desse combustível. Quando foi imposto que em todo diesel comercializado deveria ter 2% de biodiesel na mistura. Houve outro avanço em 2016 com a lei nº 13.263, que dispõe sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional. Isso resultou em aumentos graduais no percentual de biodiesel na mistura. Em 2020, já estava programado para ter um aumento percentual para 12%. Porém, com a conjuntura atual do país, foi necessário retroceder para o combustível B11 (ANP, 2021 e BRASIL, 2016).

O principal processo para obter biodiesel, se dá pela reação química de transesterificação, onde os triglicerídeos presentes nas matérias primas citadas, reagem com álcool gerando o éster de ácidos graxos e glicerina. Estes ésteres apresentam características físico-químicas muito próximas ao diesel, mas para ser comercializado passam por um processo de purificação. Ao final, estando nos padrões indicados por lei, o biodiesel pode ser comercializado. (MENEGETTI *et al*, 2013; BRASIL. MME, 2020b)

Uma das suas formas de obtenção é a partir do processo químico denominado transesterificação, no qual os triglicerídeos (TAG) presentes nos óleos, gordura animal ou produtos residuais, em presença de um catalisador, reagem com álcool de cadeia curta gerando o éster de ácidos graxos e a glicerina (ANP, 2020; MENEGETTI *et al*, 2013).

Estes ésteres de ácidos graxos formados na reação, somente podem ser comercializados como biodiesel, após passarem por processos de purificação para se adequarem às especificações de exigência de qualidade. Estes processos abrangem as etapas de limpeza e de secagem. A primeira etapa é subdividida em duas, na qual

o éster é lavado com água ácida para a retirada dos sais e em seguida, realiza-se uma segunda lavagem, somente com água, para a retirada das impurezas restantes. Após esta limpeza, o éster segue para a etapa da secagem, e então, são realizadas as análises de qualidade. Ao final de todo este processo, o biodiesel segue para o centro de distribuição, no qual é adicionado ao diesel e pode ser comercializado (ANP, 2019; BRASIL. BIOCOMBUSTÍVEIS, 2020b).

### 2.2.3 Propriedades do diesel e biodiesel

A qualidade do combustível é um dos principais fatores que afetam o desempenho dos motores de combustão interna. Este fator está relacionada com seu conjunto de propriedades físicas e químicas (SZLOK, 2008). Para garantir a qualidade de combustíveis, padrões de qualidade são estabelecidos. Objetivando fixar teores limites dos contaminantes que não venham prejudicar a qualidade das emissões de gases na queima, bem como o desempenho, a integridade do motor e a segurança no transporte e manuseio (LÔBO, FERREIRA E CRUZ, 2009). Na Tabela 2.1 é apresentado um comparativo de algumas especificações estabelecidas pela ANP para o diesel e biodiesel, e suas propriedades químicas e físicas.

TABELA 2.1 – ESPECIFICAÇÃO DOS ÓLEOS DIESEL DE USO RODOVIÁRIO

Característica	Unidade	Limite	
		Tipo A e B	
		S10	S500
Teor de biodiesel	% volume	10%	10%
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	815,0 a 850,0	815,0 a 865,0
Ponto de fulgor, mín.	°C	38	N/A
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,0 a 4,5	2,0 a 5,0
Número de cetano, mín.		48	42

Fonte: Adaptada de ANP (2021).

As características do diesel que estão presentes no mercado vão depender do tipo de petróleo utilizado na sua produção nas refinarias, e da origem da matéria orgânica do biodiesel que é aplicado nas misturas. Por exemplo, diferenças de concentrações dos ácidos graxos constituintes dos óleos vegetais, determinam as variações de propriedades como cetano, calor específico, densidade, viscosidade,

reatividade química, ponto de fusão, ponto de fulgor, entre outros (ALBUQUERQUE *et al.*, 2009). Segue abaixo na tabela 2.2, um comparativo das propriedades dos combustíveis, provenientes de distintas matérias orgânicas, comparadas ao diesel de petróleo.

TABELA 2.2 – PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS DE DIFERENTES ORIGENS

Óleo	Número de cetano	Poder Calorífico (kJ/kg)	Viscosidade Cinemática (@37,8 °C, m <sup>2</sup> /s)	Ponto de Fulgor (°C)
Milho	37,6	39500	34,9	277
Algodão	41,8	39468	33,5	234
Linhaça	34,6	39307	27,2	241
Soja	37,9	39623	32,6	254
Girassol	37,1	39575	37,1	274
Diesel	47	45343	2,7	52

Fonte: Adaptado de Knothe *et al* (2006)

Os motores ciclo diesel tem a necessidade do combustível, quando injetado, realizar autoignição, tal parâmetro é medido pelo número de cetano (NC). Para a determinação da cetanagem de um combustível é utilizado um motor com razão de compressão variável. Inicialmente é imposto uma razão de compressão baixa, e eleva-se até o momento que a combustão acontece, especificamente, no PMS, e esta condição é comparada com uma mistura de um combustível de referência (MARTINS, 2011).

O principal combustível de referência para determinação do NC é o hexadecano (C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>), este composto tem como seu nome cetano. Este composto se caracteriza por ter uma cadeia linear longa e excelente capacidade calorificado, atribuído um valor de 100. Valores de NC elevados ou muito baixos podem acarretar problemas operacionais do motor. Se o NC for muito elevado, a combustão pode ocorrer com combustível e o ar ainda se misturando, resultando em uma combustão incompleta, e na emissão de fumaça. Já para um NC baixo, podem ocorrer falhas no funcionamento do motor, trepidação, aumento excessivo da temperatura do ar, aquecimento lento do motor ao ser acionado (LÔBO; FERREIRA e CRUZ, 2009).

A maioria dos fabricantes de motores e as regulamentações, nacionais e internacionais, trazem padrões mínimos de cetano para o diesel entre 40 e 50. O



biodiesel, seja ele de origem de óleos vegetais ou gordura animal, consegue ter estes níveis mínimos pois cadeias carbônicas ácidos graxos são longas lineares e não ramificadas, trazendo a similaridade necessária para o diesel convencional (LÔBO, FERREIRA E CRUZ, 2009).

Além do número de cetano, outra propriedade que influencia diretamente a eficiência do motor ciclo diesel é o poder calorífico dos combustíveis. Parâmetro utilizado em cálculos de eficiência e rendimento dos motores de ciclo diesel, que influencia diretamente o consumo de combustível do motor. Os calores de combustão dos ésteres de ácidos graxos estão na faixa de 1300 a 3500 kcal/mol. Em comparação ao calor de combustão do cetano que é de 2559,1 kcal/mol, demonstrando que os ésteres têm a capacidade de fornecer o calor de combustão suficiente ao motor ciclo diesel (MONTEIRO *et al*, 2013 e MARTINS. 2006).

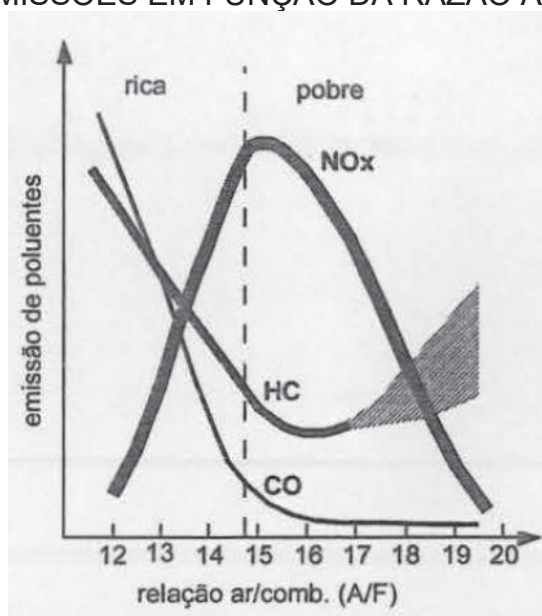
A viscosidade cinemática é o quociente entre a viscosidade absoluta e a massa específica, mas fisicamente ele é a medida da resistência da vazão de um líquido associado à fricção ou atrito interno de uma parte do fluido que escoa sobre outra. A viscosidade tem um papel importante na lubricidade do motor, quanto maior seus teores mais lubrificadas estarão as partes internas do motor. Entretanto, a viscosidade alta afeta a atomização (formação de gotículas grandes) do combustível no momento de sua injeção na câmara de combustão, além disso causa perda de carga na bomba injetora e linhas prejudicando a eficiência de injeção. Os combustíveis provenientes de matéria orgânica, isto é, biodiesel, têm seus valores de viscosidade superior ao do combustível diesel proveniente do petróleo. (BRUNETTI, 2012a e KNOTHE *et al*, 2006).

### 2.3 EMISSÕES

Aos motores de combustão interna, adota-se o termo emissões para indicar os produtos considerados nocivos ao homem e meio ambiente. No processo de combustão, a reação química completa produz CO<sub>2</sub>, e H<sub>2</sub>O. Entretanto, quando os motores estão operando a combustão não é completa, havendo a formação de outros compostos, como por exemplo CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> etc. As proporções desses gases liberados dependem do combustível, das condições de funcionamento do motor e a qualidade da mistura ar-combustível (TRAVISS, 2012).

A análise dos produtos de combustão é importante no estudo dos motores de combustão interna por três pontos. Primeiramente, avaliar a eficiência do processo de combustão, medindo as concentrações de gases supracitados. Aferir a composição dos reagentes da combustão a partir dos gases de escape. E por último, determinar a concentração de gases poluentes, limitados pelas legislações de emissões (BRUNETTI, 2012b). A quantidade de emissão dos poluentes é influenciada, em grande parte, pela riqueza da mistura injetada na câmara de combustão, conforme apresentado pela figura 2.6. O gráfico representa, qualitativamente, as emissões de poluentes de um motor trabalhando à temperatura normal de funcionamento, ou seja, quente.

FIGURA 2.6 – EMISSÕES EM FUNÇÃO DA RAZÃO AR/COMBUSTÍVEL



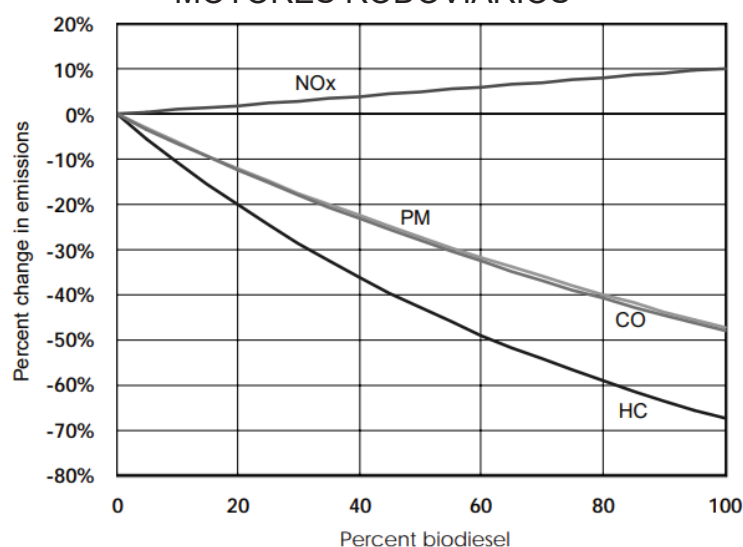
Fonte: MARTINS (2006)

A partir do que está apresentado na figura 2.6. Para misturas pobres é gerado pequenas parcelas de CO, sendo esta aumentada com o enriquecimento da mistura. No que diz respeito aos hidrocarbonetos não queimados (HC), a sua emissão também aumenta com a riqueza da mistura, mas não tão intensamente como no caso do CO. O nível de produção de NOx diminui para misturas pobres e ricas, sendo o máximo de emissão coincidente com misturas estequiométricas ou levemente pobres.

A atividade de transporte é das mais responsáveis pela poluição atmosférica, paralelamente com a produção de energia e indústria. As quantidades dos compostos poluentes emitidos pelos escapes dos veículos são dependentes do desenho do motor

e das condições de utilização (TRAVISS, 2012). Para Martins (2006), em um motor Diesel gera  $\text{NO}_x$ , CO e HC na seguinte ordem de magnitude:  $\text{NO}_x$  de 50 a 1000 ppm ( $5\text{g}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ), CO de 100 a 500 ppm ( $200\text{g}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ), e HC aproximadamente 400 ppm ( $25\text{g}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ). Contudo, quando utilizado na mistura do diesel percentuais de biodiesel, pode haver variações nas quantidades dos gases de emissões, conforme apresentado pela figura 2.7.

FIGURA 2.7 – IMPACTOS DAS EMISSÕES COM O USO DE BODIESEL EM MOTORES RODOVIÁRIOS



Fonte: Agência de proteção Ambiental dos Estados Unidos (2002)

Como pode ser visto pela imagem acima, os percentuais de CO, HC e material particulado diminuem com a o uso de biodiesel, entretanto os percentuais de  $\text{NO}_x$  tendem a subir. Além disso, com o uso do biodiesel os teores de enxofre diminuem. Para LEITE *et al* (2019) a matéria orgânica utilizada no processo de transesterificação não contém tal composto, diferente do diesel proveniente do petróleo, que tem altas concentrações de componentes sulfurados.

### 2.3.1 Óxidos de carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás tóxico, inodoro e incolor, ele é gerado a partir da queima incompleta de combustível fóssil ou de biomassa. Este gás quando exposto ao ser humano tem efeitos colaterais gravíssimos, pois quando em contato, ele entra na corrente sanguínea, diminuindo a capacidade de transporte de oxigênio

(O<sub>2</sub>) pelo sangue, devido ao fato de se ligar as hemoglobinas e as impede de carregar o oxigênio para o corpo. O contato com este gás nocivo pode causar dor de cabe, tontura, e distúrbios visuais pode causar tontura, dor de cabeça e distúrbios visuais (HINRICHS *et al*, 2014)

O CO é formado durante a combustão e devido à dissociação do CO<sub>2</sub>, resultante das elevadas temperaturas na câmara. Uma outra origem do CO é a queima de misturas, pois assim dá-se a combustão incompleta do carbono representando assim uma relativa redução de eficiência. A produção do CO é controlada principalmente pela riqueza da mistura. Em misturas ricas, é evidente que, não havendo suficiente oxigênio para oxidar todos os átomos de carbono, ocorre a produção de CO. Os motores do ciclo Diesel, que funcionam com excesso de ar, emitem relativamente pouco CO (em geral, menos de 300 ppm a plena carga) (HEYWOOD,1988 e TURNS, 2012).

Para Martins (2006) a mais importante equação de oxidação do CO no processo de combustão é:



Martins (2006) ainda afirma que esta reação de oxidação é lenta e dependente da temperatura. Quando a válvula de escape se abre, reduzindo subitamente a pressão, e induzindo a uma queda da temperatura, pode ocorrer da temperatura não ser suficientemente e reação não se realizar.

O dióxido de carbono é um dos produtos primários de qualquer combustão de hidrocarbonetos. É um gás inodoro e incolor sem efeito direto na saúde humana. Entretanto, para Solomon *et al* (2009), o acúmulo desse gás na atmosfera é um dos principais responsáveis pelo fenômeno do aquecimento global. Para limitar a emissão de CO<sub>2</sub> o recurso é investir na redução do consumo de combustível fóssil pelos motores, buscando-se sistemas cada vez mais atraentes em termos de eficiência térmica, mecânica e volumétrica.

Como já explicado anteriormente, na combustão de um hidrocarboneto ocorre primeiramente a quebra do combustível formando CO, seguida pela oxidação do CO em CO<sub>2</sub>. Como se trata de um produto de combustão incompleta, o CO é função da relação ar-combustível e do nível de homogeneização da mistura. Ou seja, a formação de CO<sub>2</sub> está diretamente relacionada com a eficiência da combustão.

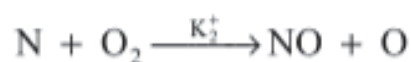
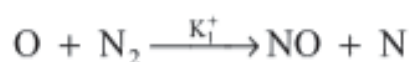
Considerando um motor em bom estado de funcionamento, a emissão de CO<sub>2</sub> é máxima quando a mistura ar/combustível é estequiométrica (BRUNETTI, 2012b).

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) tem um odor ligeiramente irritante, é incolor e mais denso do que o ar. Mesmo sendo um constituinte natural do ar, em elevadas concentrações pode se tornar perigoso. As emissões de CO<sub>2</sub> são provenientes principalmente da queima de combustíveis fósseis, podendo ser gerado também no processo de respiração aeróbica dos seres vivos (IPCC, 2005).

### 2.3.2 Óxidos de nitrogênio

Óxidos de nitrogênio, ou simplesmente NO<sub>x</sub>, é o termo geral que identifica a soma de monóxido de nitrogênio (NO) na proporção aproximada de 90% e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). Quando na atmosfera, o NO rapidamente se transforma em NO<sub>2</sub> e as taxas de emissão em massa de NO<sub>x</sub> são sempre calculadas considerando-se tanto o NO como o NO<sub>2</sub>, como exclusivamente NO<sub>2</sub> (MARTINS, 2006).

Para Heywood (1988) existem duas fontes de geração do NO<sub>x</sub>: uma delas é formado pela reação entre o nitrogênio presente no combustível e o oxigênio do ar. Já a segunda é o NO<sub>x</sub> do ar, formado pela oxidação do nitrogênio presente no ar, por meio de dois mecanismos de formação: o NO<sub>x</sub> térmico, descrito inicialmente por Zeldovich (1947), e o NO<sub>x</sub> imediato ou prompt, formado na região da frente de chama. A grandeza determinante para a formação do NO<sub>x</sub> é a temperatura. O mecanismo de Zeldovich é descrito de forma simplificada por três equações:



2.2

A primeira reação deve conter muito mais calor para acontecer, a temperatura dos gases precisam estar entre 2000 e 5000 Kelvin (K). Já a segunda e terceira reação ocorrem na faixa de 300 a 3000 K. Todavia, essas equações são muito mais ativas acima de 2.000 K, mas praticamente cessam abaixo desta temperatura. Também se

deve considerar que a quantidade de oxigênio e nitrogênio disponíveis na câmara, bem como a temperatura, dependem da proporção entre os reagentes (BRUNETTI, 2012b). Dessa forma, as tecnologias empregadas na câmara de combustão para redução de  $\text{NO}_x$ , são basicamente métodos que reduzem a temperatura de chama na combustão (MARTINS, 2006).

O  $\text{NO}$  é incolor, já o  $\text{NO}_2$ , por absorver a luz solar, possui uma coloração marrom, característica do smog. Toda emissão de  $\text{NO}_x$  origina-se como  $\text{NO}$ , que sob a ação de luz solar se transforma em  $\text{NO}_2$  e tem papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos, como o ozônio ( $\text{O}_3$ ) ou ácidos nítricos. O primeiro composto, principal causadora de irritações de pele, olhos, mucosas e dos alvéolos pulmonares. Já o segundo é um dos principais agentes causadores da chuva ácida (CLEMENTE, 2000; HINRICHS *et al*, 2014).

### 2.3.3 Óxidos de enxofre

Os óxidos de enxofre produzidos durante a emissão têm sua denominação similar aos de nitrogênio. Aqui, os dois óxidos considerados relevantes,  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ , também são chamados, quando combinados, de  $\text{SO}_x$ . O  $\text{SO}_2$  oriundo da combustão do diesel, é produto da combustão/oxidação do enxofre contido no diesel na forma de impureza. A concentração resultante de compostos de enxofre nos produtos de combustão é função da porcentagem de enxofre contida no combustível e da razão ar-combustível. Esta reação acontece em temperaturas relativamente baixas, durante o desligamento e o aquecimento do motor. O enxofre também causa desgaste e maior sensibilidade à detonação (CORRO, 2002 e PEIXOTO, 2012).

Os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), na forma de  $\text{SO}_2$  é um gás incolor, com odor bastante forte. Resulta, principalmente, de fontes antropogênicas como a queima de combustíveis que contêm enxofre (óleo diesel, óleo combustível industrial e gasolina). Além de serem danosos por si só, em baixas temperaturas, parte do  $\text{SO}_2$  se oxida para  $\text{SO}_3$  que reage com o vapor de água formando ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Os compostos sulfurados na atmosfera são prejudiciais não apenas à saúde humana, como também à vegetação e à resistência dos materiais. No ambiente pode levar à formação de chuva ácida, além da formação de smog fotoquímico. (BRASIL. MMA, 2020a e PEIXOTO, 2012).

## 2.4 EFEITOS NA EFICIÊNCIA E EMISSÕES QUANDO APLICADO BIODIESEL EM UM MOTOR CICLO DIESEL

Nesta seção, serão apresentados os estudos de maior impacto científico encontrados na literatura. Os trabalhos apresentados visam exemplificar experimentos que trazem dados de rendimentos, eficiência e emissões em um motorgerador com aplicação de diesel, biodiesel e suas misturas. É importante mencionar que são citados alguns exemplos, pois existem muitos trabalhos experimentais, com diferentes aplicabilidades, a partir de motores diesel tendo em vista o uso biodiesel de diferentes origens. Portanto, foram selecionados os mais relevantes para esta pesquisa.

Ramadhas, Muraleedharan e Jayaraj (2005) indicam o uso na produção de biodiesel a partir de óleos vegetais não comestíveis, não refinados, devido ao seu alto valor ácido. As propriedades importantes dos ésteres metílicos do óleo de semente de borracha são comparadas com outros ésteres e diesel. Eles comparam o óleo de semente de borracha pura com o diesel e biodiesel aplicando em um motor de ignição por compressão. Desempenho e as características de emissão do motor foram analisados. Eles observaram que com misturas mais baixas de biodiesel, aumenta a eficiência térmica do freio e reduzem o consumo de combustível. As emissões de gases de escape são reduzidas com o aumento da concentração de biodiesel. Os resultados experimentais comprovaram que o uso de biodiesel (produzido a partir do óleo de semente de borracha não refinado) em motores de ignição por compressão é uma alternativa viável ao diesel.

GÖKALP *et al* (2008) apresenta análises comparativas de energia e exergia de um combustível diesel, combustível marítimo e quatro diferentes combustíveis com biodiesel para um motor diesel de injeção direta de quatro cilindros e quatro tempos. O motor foi usado para obter os dados experimentais em condições de plena carga para velocidade constante de 1600 rpm. Em seu estudo, para todos os combustíveis, a eficiência mecânica variou entre 0,80 a 0,86. Já a eficiência de primeira lei apresentou os melhores resultados para o combustível com 50% diesel e 50% biodiesel, com valores máximos e mínimos de 0,37 e 0,40, respectivamente. O diesel teve resultado de eficiência de primeira lei entre 0,34 e 0,37. Verificou-se que as eficiências de primeira e segunda lei aumentaram com a adição de biodiesel e a destruição de exergia mínima foi obtida com combustíveis 100% biodiesel. Por outro

lado, a exergia do escapamento foi inversamente proporcional à adição de biodiesel. Também é demonstrado com uma extensa análise de emissões que a adição de combustíveis biodiesel ao combustível diesel padrão aumenta as características de emissão dos motores diesel.

Kegl (2011) trata em seu artigo a influência do biodiesel nas características de combustão do motor. O combustível considerado é o biodiesel puro de óleo de colza. O motor considerado é um motor diesel de ônibus com sistema M de injeção. As características do motor são obtidas por meio de experimentos e simulação numérica. Os resultados obtidos com o biodiesel são comparados aos obtidos com o diesel mineral em diversos regimes operacionais. Desta forma, são analisadas as influências do uso de biodiesel na pressão de injeção, tempo de injeção, retardo de ignição, pressão e temperatura do gás no cilindro, taxa de liberação de calor, temperatura dos gases de escape, emissões prejudiciais, consumo específico de combustível e potência do motor. Além disso, são determinadas as relações entre as propriedades do combustível, características de injeção e combustão, emissões prejudiciais e outros desempenhos do motor. Atenção especial é dada às possíveis explicações da maior emissão de NO<sub>x</sub>, apesar da menor temperatura do gás no cilindro.

Neste estudo Thaiyasuit, Pianthong e Milton (2011), analisam a eficiência de combustão e o desempenho de um motor com biodiesel produzido a partir de óleo da semente da borracha (RSO) foram comparados com o diesel de petróleo. Os resultados experimentais mostram que o biodiesel RSO resultou em melhor combustão do que o diesel de petróleo em rotações de motor baixas a médias (1300-1900 rpm). Nessa faixa, a eficiência de combustão e a eficiência de conversão de combustível de freio do biodiesel RSO foram 1,03% e 7,33% maiores, respectivamente, do que as do diesel de petróleo. No entanto, a emissão de NO<sub>x</sub> foi 39,5% maior. Nesta faixa de velocidade mais alta, o desempenho caiu abaixo daquele do diesel de petróleo com os consumos de combustível específicos e as emissões de CO específicas sendo maiores.

AN *et al* (2012) neste artigo, investigou as características de desempenho, combustão e emissão de motores diesel movidos a biodiesel em condições de carga parcial. Os experimentos foram conduzidos em um motor a diesel com injeção de combustível common rail usando diesel com ultrabaixo teor de enxofre, biodiesel (B100) e seus combustíveis de mistura de 10%, 20%, 50% (denotadas B10, B20 e B50 respectivamente) sob várias cargas. Os resultados mostram que o biodiesel e as



misturas de combustíveis têm impactos significativos no consumo de combustível específico do freio do motor (BSFC) e na eficiência térmica do freio (BTE) em condições de carga parcial. O aumento do BSFC para o B100 é mais rápido do que o do diesel puro com a diminuição da carga do motor. Um maior aumento de 28,1% no BSFC é encontrado na carga de 10%. Já para o BTE, os resultados mostram que o uso de biodiesel resulta em uma eficiência térmica reduzida em cargas mais baixas do motor e melhor eficiência térmica em cargas mais altas do motor. Além disso, as características das emissões de monóxido de carbono (CO) também são alteradas em condições de carga parcial. Ao operar com cargas mais baixas do motor, a emissão de CO aumenta com o aumento da proporção de mistura de biodiesel e a diminuição da rotação do motor. No entanto, com cargas mais altas do motor, uma tendência oposta é obtida.

Adaileha e Alqdah (2012) verificaram o nível de desempenho e as emissões dos geradores a diesel movidos a biocombustíveis. Neste estudo, o efeito do biodiesel de misturas de óleo de cozinha e diesel (B0, B20, B50, B80 e B100) sobre o desempenho (potência de frenagem, torque de frenagem, BSFC, eficiência térmica de freio e temperatura dos gases de exaustão) e características de emissão (CO e NOx) de um gerador a diesel modelo CAT3412 foram analisadas. Os experimentos foram conduzidos na rotação nominal do motor de 1530 rpm e várias cargas do motor (25%, 50%, 75% e 100%). Os resultados do estudo mostraram um aumento na potência, torque, eficiência térmica e emissão de NOx, e uma tendência de redução na emissão do consumo específico de combustível e CO em cargas de motor mais elevadas para todas as misturas de biodiesel-diesel. Além disso, os resultados da pesquisa indicaram que as misturas de combustível B20 e B50 em termos de características de emissão e desempenho poderiam ser reconhecidas como os candidatos potenciais para serem certificados para uso no gerador de energia a diesel.

Paulo *et al.* (2016) avaliou o desempenho e emissões em um gerador a diesel movido a diesel comercial brasileiro (diesel de petróleo com 5% de biodiesel), biodiesel à base de óleo de fritura residual puro (B100) e misturas na seguinte ordem 20%, 30%, 50%, 75% de misturas de biodiesel. O desempenho elétrico do grupo motor-gerador (dois cilindros, 13 kVA) foi determinado usando um resistivo banco de carga, monitorando a potência total e a potência de fase individual. Durante os testes, o motor foi instruído por meio de um analisador de gases no sistema de escapamento. Uma balança gravimétrica de precisão foi usada para determinar consumo de

combustível. Os melhores desempenhos de potência foram alcançados por B5 e B30, enquanto B20 mostrou os melhores eficiência térmica e o menor consumo de combustível também. Conforme a quantidade de éster metílico foi sendo adicionado ao diesel fóssil, elevando de B5 para B100, as concentrações de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> cresceram, já para CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> as concentrações decrescentes nos gases de combustão.

No experimento realizado por Bayindir, Isik e Aydin (2017), o óleo de canola foi misturado com querosene por porcentagens de 90% de óleo de canola-10% de querosene (C90 e K10), 75% de óleo de canola-25% de querosene (C75 e K25) e 50% de óleo de canola-50% de querosene (C50 e K50). Esses combustíveis de mistura foram inicialmente analisados por meio das propriedades físico-químicas do combustível e as comparações foram feitas com o combustível diesel padrão (D2). Combustíveis de mistura e combustível diesel padrão foram então testados em um gerador de energia a diesel com 4 cilindros a fim de investigar as características de combustão, desempenho e emissão dos combustíveis. Todos os experimentos foram realizados em valores de potência de saída especificados de 3,6, 7,2 e 10,8 kW e velocidade constante de 1500 rpm. As características de combustão das misturas de querosene de óleo de canola são bastante semelhantes às do D2. O consumo de combustível em massa e o consumo de combustível específico de freio (bsfc) aumentaram ligeiramente para os combustíveis de mistura. As emissões de óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e as opacidades da fumaça do escapamento foram consideravelmente reduzidas para as misturas, enquanto as emissões de monóxidos de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC) relativamente. Pode-se concluir que os óleos vegetais misturados com querosene podem ser usados como combustível com características de combustão e desempenho melhoradas em comparação com os óleos vegetais puros.

Barros, Henríquez e Dutra (2018) em seu estudo experimental apresentam os resultados obtido nos testes de um grupo gerador a diesel, utilizando biodiesel de óleo de algodão (B100) e o biodiesel em diferentes proporções (20%, 30%, 50% e 70% adicionado ao óleo diesel) em comparação ao óleo diesel comercial (B7) usado como referência. Os testes avaliaram o comportamento do grupo gerador, quando operando em estado estacionário e para cargas de 25%, 50%, 75% e 100% da potência nominal, por meio de um banco de resistores. O consumo de combustível e a fração de emissão de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e particulado na forma de fuligem foram medidos durante os testes.

Houve redução do consumo específico de combustível com o aumento da carga, para todos os combustíveis. Os resultados mostram que a eficiência térmica cresce à medida que o motor é mais solicitado. Na elevação em direção à carga de 14 kW a emissão de CO aumentou, comparado as outras potências aplicadas, e o B100 apresentou o menor valor relativo de emissão de CO comparado aos outros combustíveis. As emissões de CO<sub>2</sub> em função das cargas do grupo gerador tende aumentar. O aumento do percentual de biodiesel no combustível reduziu o teor de fuligem e a razão disto deve estar na presença de oxigênio na estrutura do biodiesel que reduz a possibilidade de regiões localmente ricas no interior da câmara que seriam responsáveis pela formação de particulados e fuligem. Foi observado o aumento da emissão do NO<sub>x</sub> com o aumento da carga para todos os combustíveis.

LEITE. D. *et al.* (2019) teve como objetivo avaliar o desempenho e emissões de um motor a diesel para geração de energia que operava com soja, linhaça e combustíveis à base de óleo vegetal de crambe. Os combustíveis foram testados em um motor gerador de 5 kVA a uma carga de 750 W a 3000 W. Os biocombustíveis foram obtidos a partir de uma mistura de óleo diesel convencional com óleo de soja, linhaça e crambe em níveis incrementais de 10%, 30%, 50% e 70% de óleo vegetal na composição da mistura combustível. O aumento em proporção de óleo de soja em carga baixa (750 W) resultou em menor consumo específico. Em uma carga alta (3000 W), houve redução do consumo específico quando comparado ao diesel convencional. Biodiesel de crambe resultou na redução das emissões de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em função do aumento do óleo de crambe na proporção. Os resultados desses estudos indicam que o diesel convencional combina com baixo (10%) e médio (30%) concentrações de óleo vegetal de soja, linhaça e crambe são soluções técnicas viáveis para a substituição do diesel convencional.

Ogunkunl e Ahmed (2020) realizam um estudo a partir do biodiesel a base de óleo de Parinari polyandra. A partir disso, foi analisado o desempenho e emissão de um motor a diesel, operado em diferentes condições de operação, usando diversas misturas de biodiesel proveniente do Parinari polyandra. Emissões de exaustão, como hidrocarbonetos totais, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio foram medidos. As propriedades do biodiesel foram consideradas semelhantes a diesel fóssil. B10 foi considerada a mistura ideal para melhorar o desempenho do motor em termos de velocidade, potência e eficiência térmica. B30 demonstrou características de desempenho estáveis sem qualquer

modificação do motor diesel. As emissões de exaustão da combustão de misturas de biodiesel foram encontradas ser inferior ao do diesel, exceto óxidos de nitrogênio. Redução de alta porcentagem de gases de efeito estufa, monóxido de carbono e dióxido de carbono, foi registrado em 81,7% e 65,7%, respectivamente. Os autores mostraram que a utilização do biodiesel proveniente da *Parinari polyandra*, para aplicação em motores, foi considerado um meio viável na adoção de biocombustíveis sustentáveis e minimização das emissões de poluentes provenientes da combustão de fósseis combustíveis.

Özer (2020) teve como o objetivo aumentar a eficiência de combustão e reduzir os valores de emissão, adicionando tolueno em óleo diesel e biodiesel de óleo de soja. Para este fim, 5% de tolueno foi adicionado ao diesel e ao biodiesel de soja por volume. Para este propósito, o combustível DT5, com 5% de tolueno no diesel (D100), e a mistura SB5, com 5% de tolueno no biodiesel (SB100) foram criadas. Para cada mistura de combustível, o motor diesel foi operado a uma velocidade do motor constante de 2600 rpm, a 25% (2,15 Nm), 50% (4,3 Nm), 75% (6,45 Nm) e 100% (8,6 Nm) das cargas do motor. mudanças na pressão do cilindro, temperatura dos gases de escape, consumo de combustível e emissões de escape foram registrados e examinados. Com a adição de tolueno ao combustível D100, o valor da pressão no cilindro diminuiu 4,32% no motor com 100% carga, enquanto o combustível SB100 tendeu a diminuir em 3,97%. Com a adição de tolueno a 100% da carga do motor, emissões de CO e opacidade de fumaça diminuíram em 5,5% e 4,1%, em relação ao combustível D100, enquanto eles diminuíram 22,2%, e 14,4% em comparação com o combustível SB100. As emissões de HC aumentaram com o uso de DT5 e combustíveis SB5. O maior valor de emissão em termos de emissões de HC foi medido como 40 ppm com combustível DT5 a 25% da carga do motor. Emissões de NOx, por outro lado, aumentou em todas as cargas do motor. O maior aumento foi visto em 20% carga do motor com combustível DT5 com uma proporção de 10,6%.

Tayari *et al* (2020) investigou as propriedades físico-químicas dos biodieseis em três gerações de matérias-primas e o efeito delas nas emissões e no desempenho do motor. Ésteres metílicos de *Eruca sativa* (ES), óleo de cozinha usado (WCO) e microalgas *Chlorella vulgaris* (MCV), todas foram produzidos pelo processo de transesterificação com metanol e catalisador de KOH. As propriedades físico-químicas desses biodieseis foram determinadas por análise de GC-MS e FTIR e avaliadas com o padrão ASTM D6751. O perfil de componentes da FAME ilustrou o alto valor de

ácido oleico (C18: 1) em ES e WCO e ácidos graxos de cadeia longa (C18: 2 e superior) em MCV. Os resultados dos testes do motor indicaram que o biodiesel MCV produziu a menor potência e BSFC a maior. Houve um ligeiro aumento no NOx para o biodiesel MCV em comparação com o diesel puro. Por outro lado, os biodieseis de ES e WCO tiveram uma redução de NOx. Por outro lado, o biodiesel MCV resultou na maior redução nas emissões de CO e HC. Ao final, as misturas de MCV apresentaram as menores emissões e a melhor função entre todas as matérias-primas.

No trabalho de Subramaniam *et al* (2020) as algas são utilizadas como combustível alternativo, com diferentes combinações de mistura com o diesel. O combustível de algas é misturado com o diesel em uma base de volume, ou seja, A10, A20, A30, A40 e A100, e posto para funcionar em motores a diesel. As propriedades dos combustíveis foram encontradas de acordo com os padrões da American Society for Testing and Materials. O teste experimental foi realizado em um motor diesel de injeção direta de cilindro único. Entre as várias misturas testadas, A20 mostra uma estimativa mais próxima com resultados de diesel em maior eficiência térmica e menores emissões de HC, CO, fumaça e partículas. No entanto, as outras emissões, como óxido nitroso e dióxido de carbono, mostraram-se ligeiramente mais altas. Com relação às curvas de pressão do cilindro e taxa de liberação de calor, o valor de pico obtido é consideravelmente mais baixo em condições de carga mais alta, em comparação com o diesel.

## 2.5 DESAFIOS

A revisão bibliográfica apresentou vários experimentos utilizando diesel e biodiesel. Entretanto, com a existência de uma gama de matérias orgânicas disponíveis para o preparo do biodiesel, tem como consequência diferentes características físicas e químicas na mistura do combustível utilizado. Desta forma, diferentes parâmetros do motor sofrem variações em sua operação, como por exemplo: variações na temperatura de combustão e exaustão, aumento no consumo de combustível, diminuição potência entregue pelo eixo, variação nos resultados das eficiências da máquina, diferença dos percentuais nas emissões dos gases. De acordo com as observações realizadas através da revisão bibliográfica e segundo a visão do autor, serão listados os desafios identificados no meio científico:

- i. Encontrar a mistura de diesel/biodiesel que tenha os melhores resultados possíveis, através de um balanço de todos os parâmetros em análise
- ii. Identificar qual combustível apresenta o melhor desempenho mecânico
- iii. Apresentar o combustível que apresenta as menores taxas de emissões
- iv. Mostrar qual combustível tem a melhor eficiência de 1ª e 2ª lei da termodinâmica

## 2.6 OBJETIVOS

### 2.6.1 Objetivo Geral

Tendo como base o estado-da-arte e as possibilidades de inovação já discutidas neste segmento de pesquisa, define-se como objetivo geral da dissertação: avaliar o desempenho e emissões de grupo motogerador com misturas diesel/biodiesel.

### 2.6.2 Objetivos Específicos

Para que alcançar o objetivo geral descrito acima, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- i. Ligação do grupo motogerador à rede COPEL/PR;
- ii. Descrição do aparato experimental (grupo motogerador diesel/biodiesel/GN);
- iii. Caracterização de emissões e desempenho do sistema alimentado por diesel puro;
- iv. Caracterização de emissões e desempenho do sistema alimentado por diferentes misturas de biocombustíveis;
- v. Análise comparativa de emissões e desempenho do sistema operando com diesel puro e misturas de diferentes proporções diesel/biodiesel;

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo busca detalhar o aparato experimental que se fez necessário para alcançar os objetivos do trabalho, como também a forma que será analisada os dados obtidos.

#### 3.1 LIGAÇÃO DO GRUPO MOTOGERADOR À REDE COPEL/PR

O equipamento foi planejado para a ser uma a minirrede da UFPR, através do programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico Companhia Paranaense de Energia - COPEL, por meio do projeto PD 2866-0470 / 2017, regulamentado pela ANEEL. O sistema é operado em ilha e está em processo de conexão à rede COPEL com recursos financeiros do projeto. A finalidade é caracterizar o desempenho e impacto ambiental do mesmo operando com misturas de diesel e biodiesel, o suporte a estudos de detecção de conexões à rede, e caracterização e tratamento de emissões.

#### 3.2 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

##### 3.2.1 O motogerador do NPDEAS

O grupo gerador em estudo está instalado no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS) que começou suas atividades na UFPR em 2008. A infraestrutura conta com 1.400 m<sup>2</sup> de área construída e abriga laboratórios, salas de cultivos, gabinetes, sala de aula, sala de reuniões, casa de máquinas e um pátio industrial.

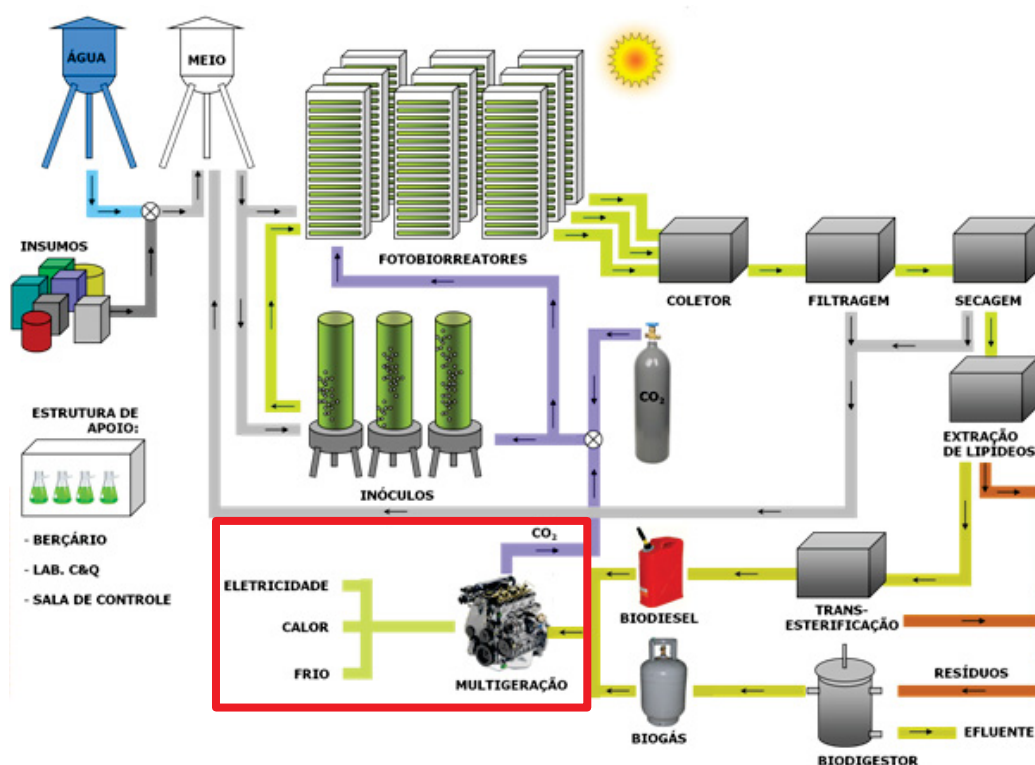
As atividades desenvolvidas no NPDEAS envolvem pesquisadores de diversos setores da universidade desde a fundação. O grupo conta com alunos, técnicos e professores dos Departamentos de Química, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia Química, Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Engenharia Ambiental, Bioquímica, Genética e Curso Técnico de Petróleo e Gás Natural da UFPR.

A infraestrutura do NPDEAS inclui: 1. Laboratório de Biotecnologia e Cromatografia; 2. Sala de Cultivo de Fungos e Bactérias; 3. Sala de Cultivo de Microalgas; 4. Laboratório de Extração de Óleo; 5. Unidade de Produção de Biodiesel;

6. Unidade de Explosão a Vapor; 7. Sala de Máquinas de compressores e grupo motogerador diesel/biodiesel/biogás/gás natural; 8. Unidade de Operações Unitárias Avançadas; 9. Unidade de Tratamento de Resíduos Sólidos; 10. Unidade de Cultivo de Microalgas em Escala de Engenharia; 11. Secretaria; 12. Sala dos Alunos de Graduação e Reuniões; 13. Gabinete da Biotecnologia; 14. Gabinete do Biodiesel; 15. Gabinete da Engenharia; 16. Gabinete dos Gerentes de Projetos; 17. Gabinete do Gerente de Programas; 18. Sala de Aula, Informática, Vídeo Conferência e Reuniões; 19. Almoxarifado; 20. Unidade de Biodigestão, e 21. Setor de Energias (Termelétrica e Gabinete Autossustentável)

Para esta dissertação, o NPDEAS disponibilizou seção: 7. Sala de Máquinas de compressores e grupo motogerador diesel/biodiesel/biogás/gás natural, A Figura 3.1 mostra um diagrama esquemático da planta do NPDEAS, onde se inserem a instalação mencionadas e destacada com um retângulo vermelho.

FIGURA 3.1 – DIAGRAMA ESQUEMATICO DA PLANTA DO NPDEAS



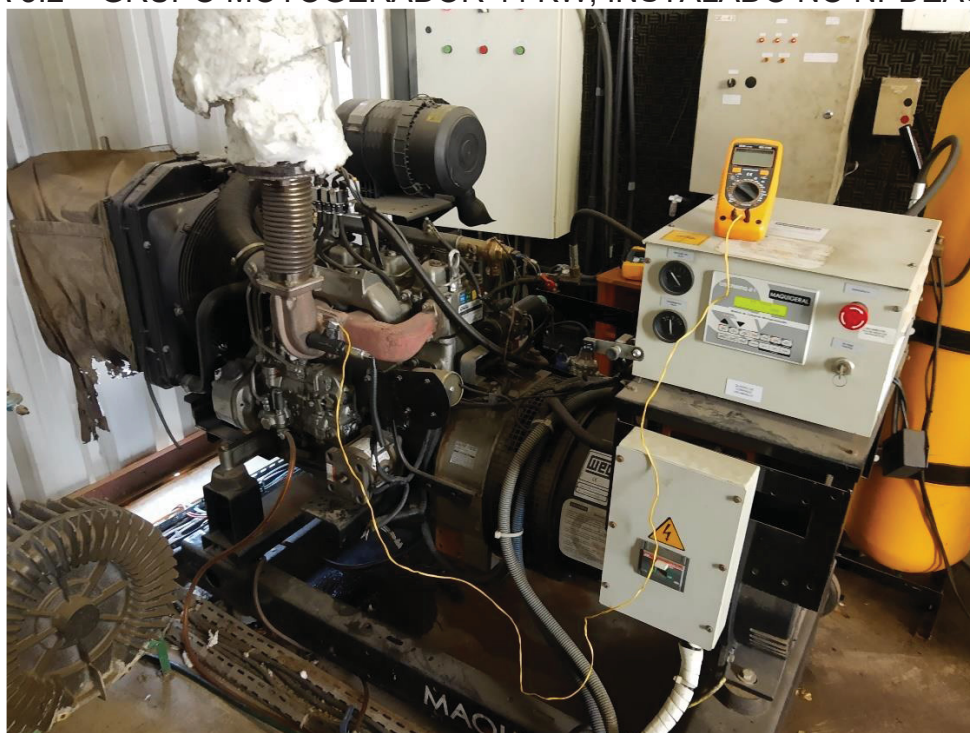
FONTE: adaptado de SATYANARAYANA; MARIANO e VARGAS (2011).

A Figura 3.2 mostra um aspecto do grupo motogerador de 44 kW, instalado no NPDEAS, e pela tabela 3.1 os dados técnicos do grupo motogerador são apresentados.



O grupo motogerador é na realidade um sistema trigerador utilizado como gerador de eletricidade para o NPDEAS. Ele produz também gases quentes que se constituem na entrada de energia para um sistema de absorção a ser utilizado para produzir frio para o complexo (climatização do prédio, e resfriamento do meio de cultivo para aumento da absorção de CO<sub>2</sub> pelas microalgas). O sistema de absorção também gera calor, produzindo água quente para consumo industrial na planta.

FIGURA 3.2 – GRUPO MOTOGERADOR 44 KW, INSTALADO NO NPDEAS



FONTE: Do Autor (2020)

Especificamente para esta dissertação, um motor a combustão interna de ignição por compressão (ICO), movido a diesel e/ou biogás foi desenvolvido pela equipe do projeto. Além de uma alteração do grupo motogerador para uso de biodiesel produzido pela empresa Battistela, para o qual foi desenvolvido e adaptado um kit biodiesel/biogás. Desta forma, para caracterizá-lo, foram aplicadas potência de saída (cargas de energia) de 12%, 32% e 55% do total da capacidade do motor, sendo essas porcentagens, respectivamente, 5kW, 14kW e 24kW, através do consumo de energia no NPDEAS, ligando como por exemplo lâmpadas, computadores, compressores e outros equipamentos mecânicos.

O método adotado para realizar as leituras dos dados, de forma a minimizar os erros de leitura, foi com base em Simon *et al* (1993), adaptando para o experimento

em questão, sendo feitas três medições para cada mudança de carga de todos os parâmetros e, podendo elas serem consecutivas ou de forma alternada.

TABELA 3.1 – DADOS TÉCNICOS GRUPO MOTOGERADOR MAQUIGERAL 12W

Fabricante	Maquigeral
Modelo motogerador	12W
Motor	MWM / D229-4
Ciclo	4 tempos
Aspiração	Natural
Nº de cilindros	4 em linha
Partida elétrica	Motor de arranque
Governador	Woodward Model 500
Arrefecimentos	Radiador com ventilador no eixo
Rotação (rpm)	1800
Gerador	WEG GTA 201 AIHV
Regime de funcionamento	Stand-by
Quadro de comando	USCAMAQ-21
Tensão nominal (V)	127/220
Corrente nominal (A)	145
Potência nominal (kW)	44
Frequência (Hz)	60

FONTE: Adaptado de Maquigeral (2020f)

No diagrama esquemático da planta do NPDEAS, mostrado na Fig. 3.1, o grupo motogerador está representado pelo retângulo vermelho inferior, que é um trigerador, que foi denominado multigerador, porque além de eletricidade, frio e calor, o sistema gera emissões, que contém CO<sub>2</sub> em alta concentração e outros gases. O gás CO<sub>2</sub> é utilizado pela fotossíntese por organismos autotróficos, tais como microalgas, e tem potencial para aumentar a reprodução desses organismos e, em consequência a biomassa que pode ser utilizada para a obtenção de muitos bioprodutos, inclusive, de alto valor agregado.

### 3.2.2 Diesel, Biodiesel e suas misturas

Os combustíveis bases para a realização dos experimentos foram o B11, adquirido da empresa Multipetro Distribuidora de Óleo Diesel e Derivados de Petróleo, e o B100 que foi doado Potencial Biodiesel Ltda. A partir disso, internamente, foram

realizadas as misturas para se obter os percentuais de 25, 50 e 75 de biodiesel. Conforme apresenta pela figura 3.3.

FIGURA 3.3 – MISTURAS COMBUSTÍVEIS B25, B50, B75 E B100 PRODUZIDAS PELO NPDEAS DA UFPR.



Fonte: Do autor (2020)

Em parceria com o Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos (LACAUT) e o Centro de Pesquisa em Química Aplicada (CEPESQ) foi possível determinar parâmetros chaves para a execução deste trabalho. Através da tabela 3.2, pode ser observado estes dados:

TABELA 3.2 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DAS AMOSTRAS DE B11, B25, B50, B75 e B100

Amostra	B11	B25	B50	B75	B100
Teor de ésteres totais (%)	10,7 ± 0,4	22,4 ± 0,9	51,4 ± 3,0	76,2 ± 1,3	99,7 ± 0,8
Teor de água (ppm)	10 ± 0	19 ± 2	24 ± 2	39 ± 1	77 ± 2
Acidez (mg KOH/g)	0,172 ± 0,012	0,304 ± 0,013	0,420 ± 0,024	0,511 ± 0,013	0,546 ± 0,017
Índice de iodo	22,9 ± 3,7	44,0 ± 2,1	64,8 ± 2,7	80,3 ± 5,7	107,9 ± 4,1
Teor de enxofre (mg/kg)	368,8	325,6	152,3	85,6	2,1
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	848,9	853	860,8	869,9	879,1
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	42,516	41,761	40,391	38,916	37,493

Fonte: Adaptado de LACAUT (2020) e CEPESQ (2020)

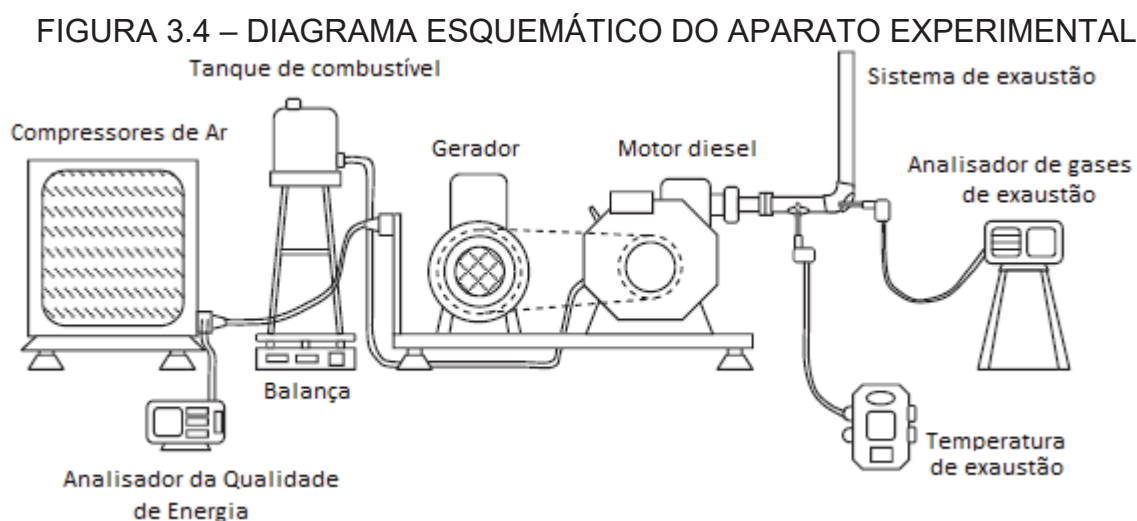
O teor de ésteres totais, teor de água, acidez e índice de iodo foram obtidos pelo laboratório CEPESQ, já o teor de enxofre, massa específica e poder calorífico inferior quem forneceu foi o LACAUT. A partir dos relatórios LACAUT, os combustíveis

estavam de acordo com a resolução da N°50/2012 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

### 3.2.3 Instrumentos para aquisição dos dados

A partir da figura 3.4, pode-se observar de forma esquemática como foram feitas as aquisições dos dados de emissões, potência indicada, potência aparente, massa de combustível consumida e temperatura dos gases de exaustão. Para todos os dados foram medidos três vezes cada, para se obter a média de cada parâmetro, como também o desvio padrão.

A medição massa de combustível consumida foi realizada através de uma balança antropométrica mecânica, marcando a diferença de massa de combustível dentro do tanque, em um intervalo de 15 minutos. Ela tem capacidade para até 150 kg, e resolução de 0,1 kg, previamente calibrada antes dos ensaios.



Fonte: Adaptado de PAULO et al (2015)

Os dados de potência efetiva, potência indicada e eficiência mecânica foram medidos pelo equipamento analisador de qualidade de energia da marca Fluke, modelo 434 série I. Abaixo, na tabela 3.3, está indicado a precisão, resolução e alcance do equipamento.

Este medidor tem a capacidade de aferir também a energia. Ele é dedicado para a detecção avançada de problemas de qualidade de energia monofásica e trifásica com estudos de carga, análise de perdas de energia e testes de conformidade

com a qualidade do serviço. Juntamente com modelos de analisadores de motor e de qualidade de energia avançados para uma manutenção preventiva. Também pode ser feita a caracterização da qualidade de energia, realizando estudos de carga e captação de eventos de tensão ao longo de um período definido pelo utilizador.

TABELA 3.3 – CARACTERÍSTICAS DO ANALISADOR DA QUALIDADE DE ENERGIA

Fluke modelo 434 série I

Parâmetro	Intervalo	Resolução	Exatidão
Potência (Watt)	1,0...20.000MW	0,1...1kW	± 10 pontos (±1,5%)
Eficiência mecânica	0...1	0,01	±0,003

Fonte: Adaptado Fluke (2007)

Para o controle de tempera do coletor de escape foi inserido um termopar na saída do escape do motor, estando o mais próximo possível do cabeçote, e foi conectado no multímetro Icel Manaus MD-1700. A tabela 3.4 é apresentado a resolução de medição do equipamento. O MD-1700 é um multímetro digital que incorpora características extras como: Tensão e corrente (ambas contínua e alternada), frequência, resistência, capacitância, temperatura, teste de continuidade, transistores e diodos, detector de infravermelho de controle remoto, e identificador linha viva.

TABELA 3.4 – CARACTERÍSTICAS MULTÍMETRO ICEL MANAUS MD-1700

Escala	Resolução	Exatidão
-40°C a 400°C	1°C	±(0,75% + 4d)
400°C a 1000°C	1°C	±(1,5% + 15d)

Fonte: Adaptado Icel Manaus (2010)

Para o acompanhamento da temperatura do ambiente foi utilizado o medidor de temperatura infravermelho Vonder TIV 6500. A tabela 3.5 apresenta as características do termômetro. Este equipamento é indicado para medições de temperatura em geral, sem necessidade de encostar o termômetro no local ou no equipamento a ser medido. Quanto maior a distância do objeto em relação ao termômetro, maior será o diâmetro de abertura do termômetro infravermelho. O medidor possui uma resolução óptica (razão entre a distância e o diâmetro) de 10:1,

ou seja, para 300 mm de distância a área de medição é de 30 mm, distância de 900 mm a área de medição é de 90 mm e distância de 1.500 mm a área de medição é de 150 mm. Para um resultado satisfatório, o objeto a ser medido deve ser pelo menos de 1,5 a 2 vezes maior que a amplitude do campo de medição.

TABELA 3.5 – CARACTERÍSTICAS DO TERMÔMETRO INFRAVEMELHO  
VONDER TIV 6500

Faixa de temperatura	- 20°C ~ 500°C ou (- 4°F ~ 932°F)
Precisão em ambiente com temperatura 23°C ±2°C	- 20°C ~ 0°C: (± 3°C) 0°C ~ 500°C: (2,0% + 2°C)
Resolução	0,1°C/0,2°F

Fonte: Adaptado de Vonder

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE EMISSÕES E DESEMPENHO DO SISTEMA ALIMENTADO POR DIFERENTES MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS

Neste tópico será apresentado como formaram feitos os cálculos de consumo, eficiência mecânica, consumo específico, eficiência de 1ª lei e eficiência de 2ª lei. Para que seja possível caracterizar e analisar as emissões e desempenho..

#### 3.3.1 Caracterização das emissões

Para caracterizar as emissões foi utilizado o analisador de gases da marca Testo modelo 350, de propriedade do NPDEAS. Na TABELA 3.6, apresenta-se as características técnicas do instrumento. O analisador de gases é adequado para a medição de gases de combustão, CO do ambiente, pressão de tiro da chaminé e pressão diferencial da chaminé. O instrumento oferece versões territoriais, mediante ajustes ao país indicado, em que se ativam as fórmulas de cálculo específicas daquele território.

TABELA 3.6 – CARACTERÍSTICAS MEDIÇÃO TESTO MODELO 350

Parâmetros de medição	Faixa de medição	Resolução
O <sub>2</sub>	0 – 25 Vol. %	0.01Vol. %
CO	0 – 10.000 ppm	1 ppm
NO <sub>x</sub>	0 – 4.000 ppm	1 ppm
NO	0 – 300 ppm	0,1 ppm
NO <sub>2</sub>	0 – 500 ppm	0,1 ppm

CO <sub>2</sub>	0 – 50 Vol.%	0,01 Vol.%
Pressão absoluta	600 – 1.150 hPa	1 hPa
Gases que podem ser medidos	CO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HC	
Temperatura ambiente	-5–45°C	

FONTE: Testo (2020)

O instrumento permite a análise de emissões dos seguintes combustíveis no Brasil: Gás Natural, Propano, Butano, Gás de Coque, Gás de rua, Óleo leve, Óleo pesado e Madeira. O aparelho tem a possibilidade de medir os seguintes parâmetros: temperatura ambiente, temperatura do gás de combustão, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxigênio, monóxido de carbono ambiental, perdas pela chaminé, rendimento líquido e bruto, entre outros.

### 3.3.2 Parâmetros de desempenho do motor

O consumo de combustível é determinado pela medição de vazão mássica, através da medição da variação do peso do reservatório de combustível durante a realização dos experimentos. A vazão mássica é a razão entre a massa de combustível consumido, medido em kg, e a duração do teste, medida em min, como se segue:

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t} \frac{1}{60} \quad 3.1$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica,  $\text{kg s}^{-1}$ ;  $m$  é a massa de combustível consumido, kg;  $\Delta t$  é a duração do teste, min, e  $1/60$  é o fator de conversão de minutos para segundo.

### 3.3.3 Rendimentos

A caracterização da eficiência é feita a partir de rendimentos do motor, que são as funções objetivo para análise do desempenho do grupo motogerador. Neste estudo, são utilizadas as eficiências mecânicas, consumo específico de combustível (sfc), eficiência térmica (1ª Lei da Termodinâmica) e eficiência verdadeira ou racional (2ª Lei da Termodinâmica).

O consumo específico (sfc), medido em g/kWh, é a razão entre a vazão mássica,  $\dot{m}$ , e a potência efetiva  $P_e$ , calculado da seguinte forma:

$$\text{sfc} = \frac{\dot{m}}{P_e} \quad 3.2$$

Onde  $P_e$  é a potência efetiva, potência que foi entregue no eixo pelo motor sem considerar as perdas pelo atrito, medido de kW.

A partir da razão entre a potência efetiva,  $P_e$ , e a potência indicada,  $P_i$ , medido também em kW, onde a potência indicada é potência entregue no eixo do motor mais as perdas pelo atrito da máquina, pode ser determinada a eficiência mecânica,  $\eta_m$ , de um motogerador, calculada por:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad 3.3$$

A eficiência térmica (eficiência da 1ª Lei da Termodinâmica),  $\eta_t$ , é a razão entre a potência efetiva,  $P_e$ , e a taxa de geração de calor,  $\dot{Q}$ , que é liberada com a queima do combustível, ou seja, razão da potência efetiva em relação à energia disponível da combustão. Ela é calculada como se segue:

$$\eta_t = \frac{P_e}{\dot{Q}} \quad 3.4$$

em que

$$\dot{Q} = \dot{m}PCI_C \quad 3.5$$

Onde  $PCI_C$  é o poder calorífico inferior de uma mistura de combustível



Para se determinar o  $PCI_C$  se aplica uma média ponderada dos PCI dos percentuais de cada combustível na mistura. Por exemplo, caso seja uma mistura de diesel e biodiesel, tem-se

$$PCI_C = PCI_D(1-\theta) + PCI_B\theta \quad 3.6$$

onde  $PCI_D$  é o poder calorífico inferior do diesel, e  $PCI_B$  é o poder calorífico inferior do biodiesel.

A eficiência verdadeira ou racional (eficiência da 2ª Lei da Termodinâmica),  $\eta_{II}$ , é a razão da eficiência térmica,  $\eta_I$ , e a eficiência de Carnot,  $\eta_C$ . Ela é calculada como se segue:

$$\eta_{II} = \frac{\eta_I}{\eta_C} \quad 3.7$$

em que

$$\eta_C = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad 3.8$$

A eficiência de Carnot,  $\eta_C$ , é o rendimento máximo que uma máquina térmica pode obter, entre uma fonte quente à temperatura  $T_H$  e uma fonte fria à temperatura  $T_L$ . Neste trabalho, a temperatura  $T_H$  é na saída do coletor de escape, representando a câmara de combustão, onde ocorre a combustão, e  $T_L$  é a temperatura ambiente, i.e., a temperatura do reservatório frio para o qual o motor rejeita calor.

### 3.4 ANÁLISE DE INCERTEZAS

Uma análise de incertezas é essencial para a adequada avaliação dos resultados obtidos. Por intermédio da aferição experimental de dados termodinâmicos

de massa, temperatura, potência, concentrações de emissões e outras grandezas físicas, obtêm-se os resultados do presente trabalho. Estes resultados contêm incertezas intrínsecas ao processo experimental, que devem ser quantificadas.

Todas as medidas foram tomadas em triplicata. O limite de precisão foi computado como sendo o dobro do desvio padrão das referidas medições, com grau de confiança de 95%. Os critérios de propagação de erros em medições experimentais seguem os padrões propostos por Kim et al. (1993). Da mesma forma, os limites de precisão intrínsecos do termopar, termômetro infravermelho, do analisador de gases e do analisador da qualidade de energia foram considerados desprezíveis em comparação ao limite de precisão das variáveis analisadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo mostra os resultados dos testes realizados no motogerador com as diferentes misturas de diesel/biodiesel, com o objetivo de caracterizar o desempenho, eficiência e emissões do equipamento. Para o desempenho da máquina os seguintes parâmetros foram analisados: consumo de combustível, potência efetiva, potência indicada, taxa de geração de calor, consumo específico de combustível e temperatura dos gases de exaustão. No que diz respeito ao rendimento, foram verificadas as eficiências propostas no tópico 3.3.2. Ao final, para as emissões, os gráficos de CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> foram avaliados. Para representação dos resultados graficamente, foram colocadas barras de erro nos pontos medidos, calculadas de acordo com a metodologia descrita na seção 3.6 desta dissertação.

### 4.1 LIGAÇÃO DO GRUPO MOTOGERADOR À REDE COPEL/PR

Foi posto em funcionamento o grupo motogerador ligado à rede, através da parceria do Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável da Universidade Federal do Paraná (NPDEAS -UFPR) e o programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico da Companhia Paranaense de Energia - COPEL, por meio do projeto “Impacto e Análise do Uso de Biodiesel na Minirrede”, PD 2866-0470 / 2017, regulamentado pela ANEEL. Conforme exposto na imagem abaixo:

FIGURA 4.1 – MOTOGERADOR LIGADO A REDE COPEL



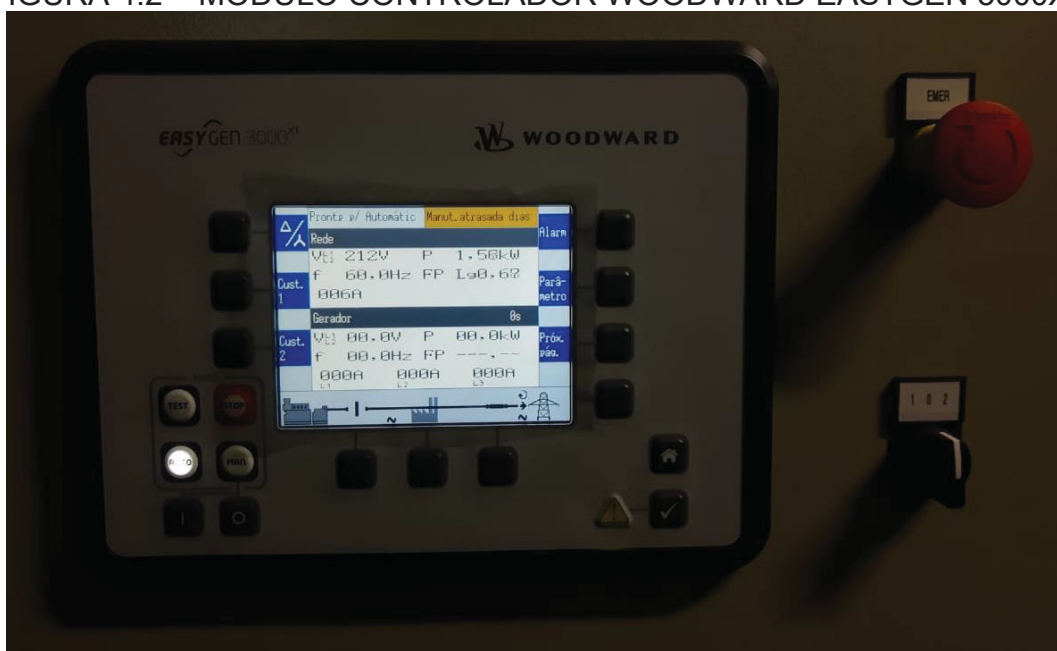
FONTE: do autor (2020)

## 4.2 APRECIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Alguns dos equipamentos utilizados na realização do experimento, não trouxeram a exatidão ou acurácia necessário para que os experimentos fossem os melhores possível. Como por exemplo, a balança antropométrica mecânica, o local de instalação do termopar para a aferição da temperatura dos gases no coletor de escape e a utilização dos compressores do NPDEAS como cargas do motogerador. Além disso, o analisador de gases fez as medições necessárias, contudo estava descalibrado para medir gases sulfurados.

Outros equipamentos utilizados ao invés dos apresentados poderiam trazer resultados melhores das medidas. Como por exemplo, uma balança digital com mais casas após a virgula. Fixar as cargas do motogerador por meio de módulos controladores disponíveis no mercado trazendo mais exatidão nas potências, conforme instalado atualmente no motogerador do NPDEAS, o módulo da Woodward Easygen 3000XT, apresentado pela figura 4.2. Para a temperatura de exaustão, inserir um termopar na dentro do cilindro do motor a diesel, para que seja possível medir a temperatura média da combustão.

FIGURA 4.2 – MÓDULO CONTROLADOR WOODWARD EASTGEN 3000XT



FONTE: do autor (2020)

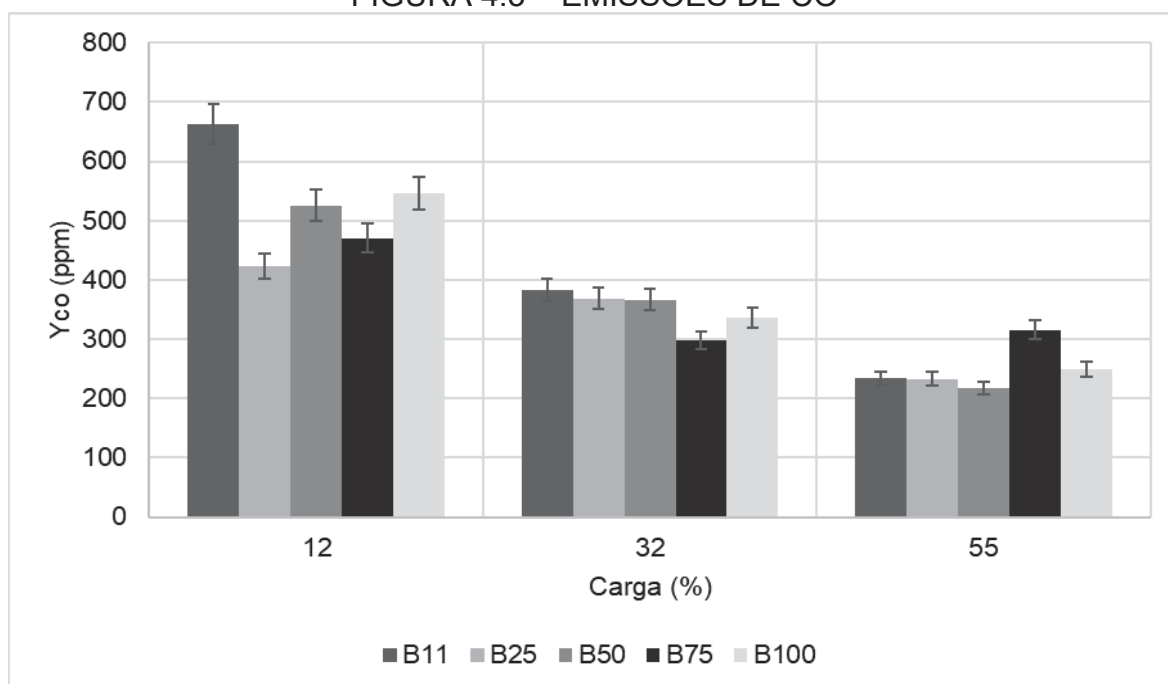
### 4.3 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE EMISSÕES E DESEMPENHO DO SISTEMA ALIMENTADO POR DIFERENTES MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS

#### 4.3.1 Emissões

##### 4.3.1.1 Óxidos de carbono

A partir da figura 4.3, pode ser observado os resultados obtidos para a parcela de emissões de óxido de carbono (CO), do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas

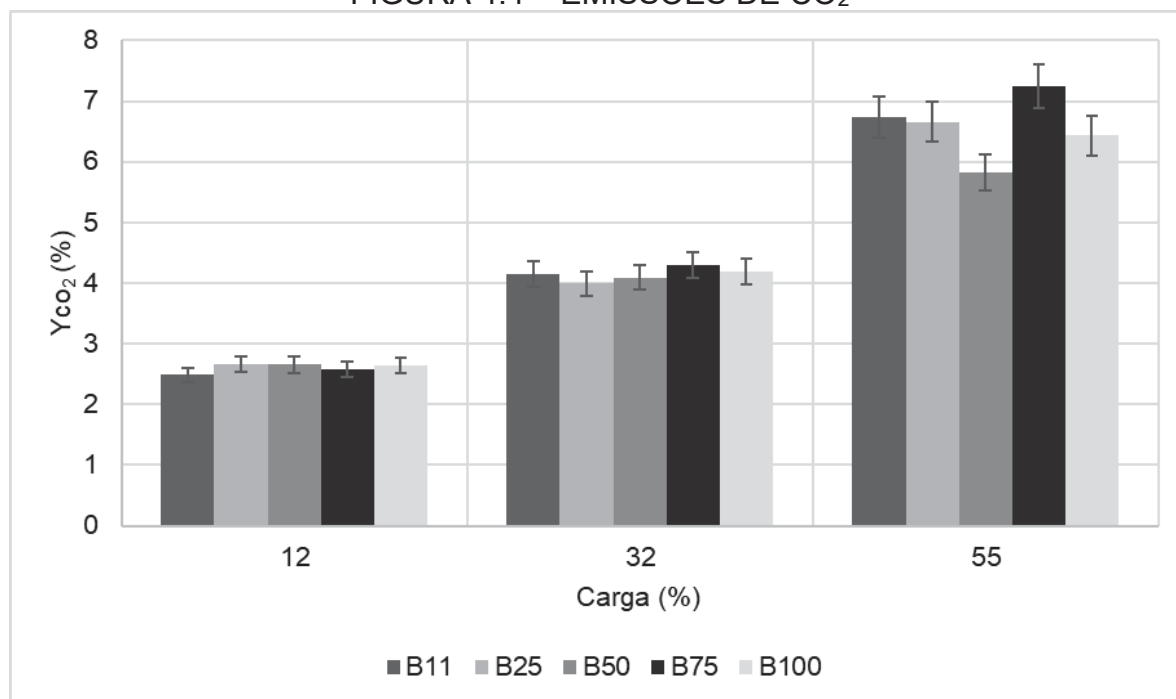
FIGURA 4.3 – EMISSÕES DE CO



FONTE: do autor (2020)

A partir da figura 4.4, pode ser observado os resultados obtidos para a parcela de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas

Segundo exposto no capítulo 2.4.1, as emissões de CO<sub>2</sub> tendem a aumentar com o aumento da carga aplicada ao motor. Este comportamento se manteve em todas as medições realizadas. Se evidencia o B50 na carga de 55%, apresentou o menor percentual de poluentes, estando muito abaixo dos demais, conforme apresentado na imagem abaixo.

FIGURA 4.4 – EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

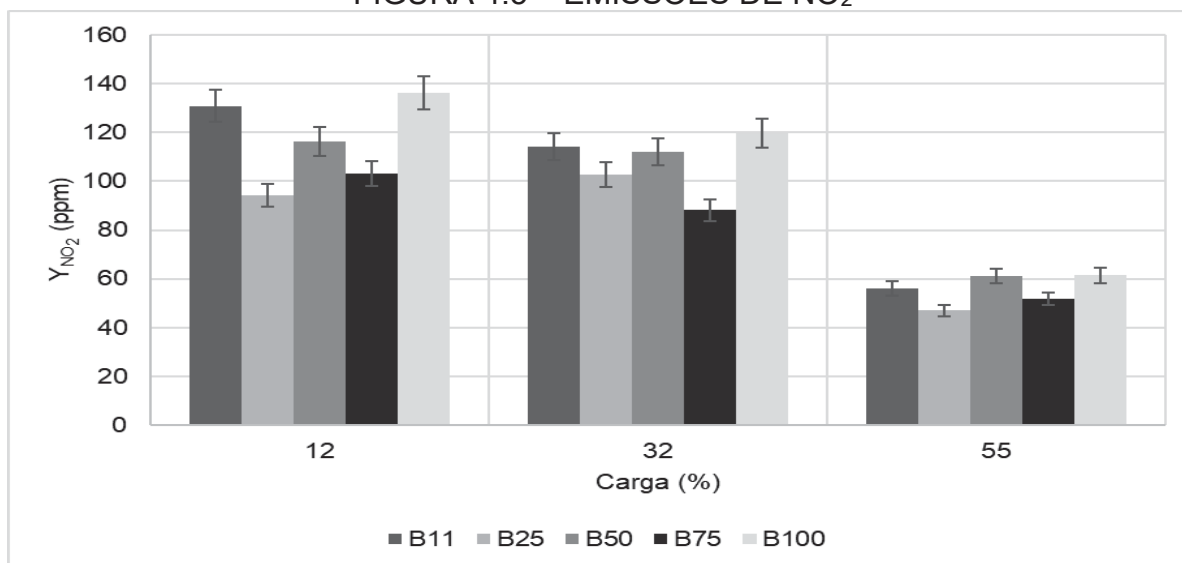
FONTE: do autor (2020)

Quando comparado os combustíveis por carga, se destaca o B50 que percentualmente gerou menos CO<sub>2</sub>. Ao final o combustível que mais emitiu CO<sub>2</sub>, foi o B75.

#### 4.3.1.2 Óxidos de Nitrogênio

A partir da figura 4.5, pode ser observado os resultados obtidos para a parcela de emissões de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas

Segundo exposto no capítulo 2.4.2, as emissões de NO<sub>2</sub> tendem a diminuir com o aumento da carga aplicada ao motor. Este comportamento se manteve em todas as medições realizadas. Se evidencia o B25 nas cargas de 12% e 55%, e para a carga de 32%, se destaca o B75, como as menores quantidades média de NO<sub>2</sub> emitidos, conforme apresentado na imagem abaixo. Quando comparado os combustíveis por carga, se destacam o B25 e B75 como os menos emissores de NO<sub>2</sub>. Ao final o combustível que mais gerou NO<sub>2</sub>, foi o B100.

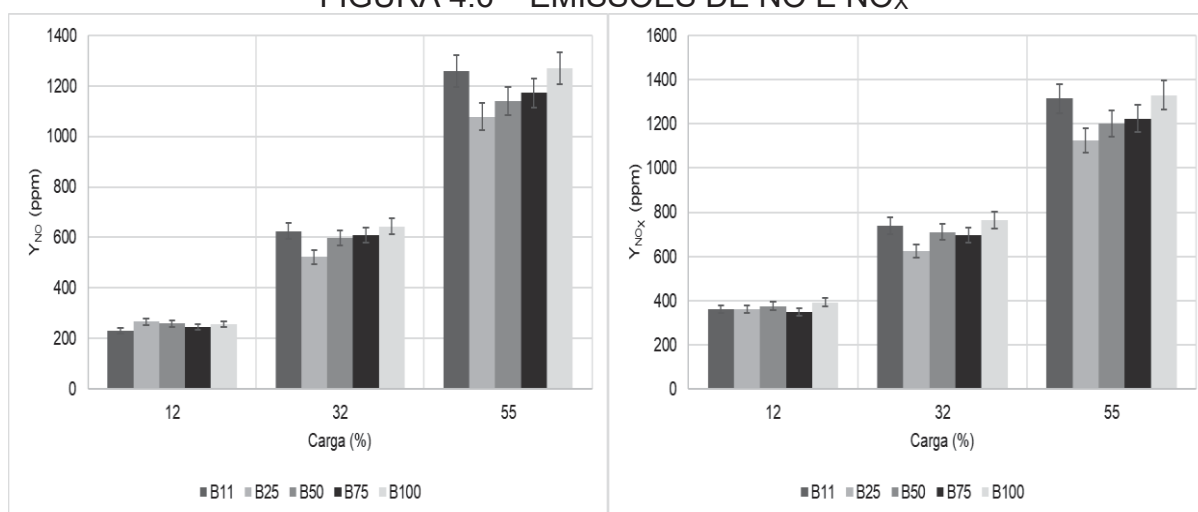
FIGURA 4.5 – EMISSÕES DE NO<sub>2</sub>

FONTE: do autor (2020)

A partir da figura 4.6, pode ser observado os resultados obtidos para a parcela de emissões de óxido de nitrogênio (NO) e a soma dos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas

As emissões de NO<sub>x</sub> são influenciadas principalmente pelo composto NO. Pois como pode ser observado em concomitante nas duas figuras (4.5 e 4.6), para a menor carga ambos os compostos (NO e NO<sub>2</sub>) influenciam nas emissões de NO<sub>x</sub>. Entretanto, quando analisada as outras duas cargas, a parcela de NO já se torna muito pequena, comparada ao NO<sub>x</sub>.

Segundo exposto no capítulo 2.4.2, as emissões de NO e NO<sub>x</sub> tendem a aumentar com o aumento da carga aplicada ao motor. Para a carga de 12%, todos os combustíveis analisados se comportaram da mesma forma, tendo uma média de emissões de NO e NO<sub>x</sub> de 250 ppm e 367 ppm. Quando visto as outras cargas, o B11 e o B100 foram as blendas que mais emitiram quantidades poluentes, estando os dois muito próximas, mas o B100 foi quem mais gerou óxidos de nitrogênio, com 763,45 ppm e 1329,85 ppm. Quando comparado os combustíveis por carga, se destacam o B25 e B75 como os menos emissores de NO e NO<sub>2</sub>

FIGURA 4.6 – EMISSÕES DE NO E NO<sub>x</sub>

FONTE: do autor (2020)

#### 4.3.2 Consumo de combustível

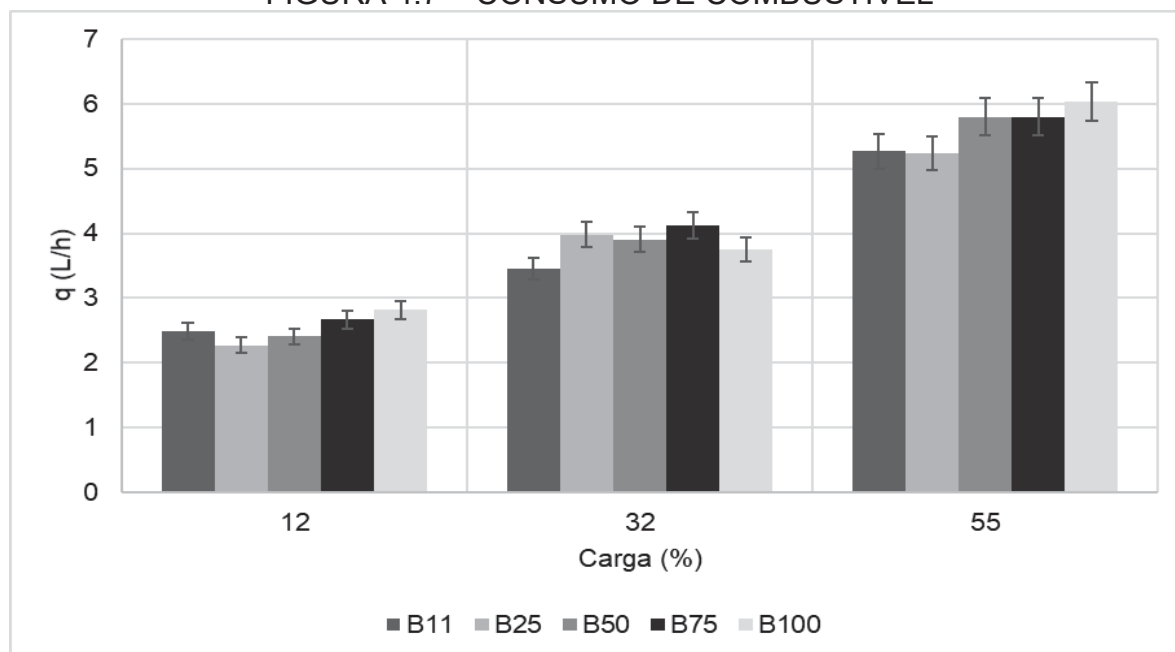
O consumo de combustível, do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas, foi obtido inicialmente em kg/min, sendo convertido em L/h. Desta forma, tem-se melhor entendimento do comportamento de consumo, e é assim que está apresentado no manual do equipamento, a figura 4.7 mostra os resultados encontrados.

O consumo de combustível demonstra que cresce com o aumento do percentual de biodiesel. Como pode ser observado que os maiores consumos foram com as misturas de maior percentual de biodiesel, entre elas o pior comportamento foi o B100 com 2,81L/h, na menor carga, e 6,03L/h, na maior carga.

Os combustíveis que obtiveram os melhores resultados foram o B25 e o B11. Quando visto de forma individual, a mistura B25 apresentou melhor resultado para carga menor e maior. Analisando o consumo médio das blends, o B11 apresentou a melhor média, com 3,73 L/h. Este comportamento ocorre, pois, quando o combustível tem o poder calorífico maior, seu consumo de combustível é menor do que em combustíveis que tem o poder calorífico menor. Ou seja, o consumo de combustível do B12 será melhor que o consumo de combustível do B100, conforme apresentado.



FIGURA 4.7 – CONSUMO DE COMBUSTÍVEL



FONTE: do autor (2020)

#### 4.3.3 Potência efetiva, potência indica e taxa de geração de calor

A figura 4.8 são indicados os resultados obtidos para a potência efetiva ( $P_e$ ), potência indica ( $P_i$ ) e taxa de geração de calor ( $\dot{Q}$ ), todos apresentados em kW, para o motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas.

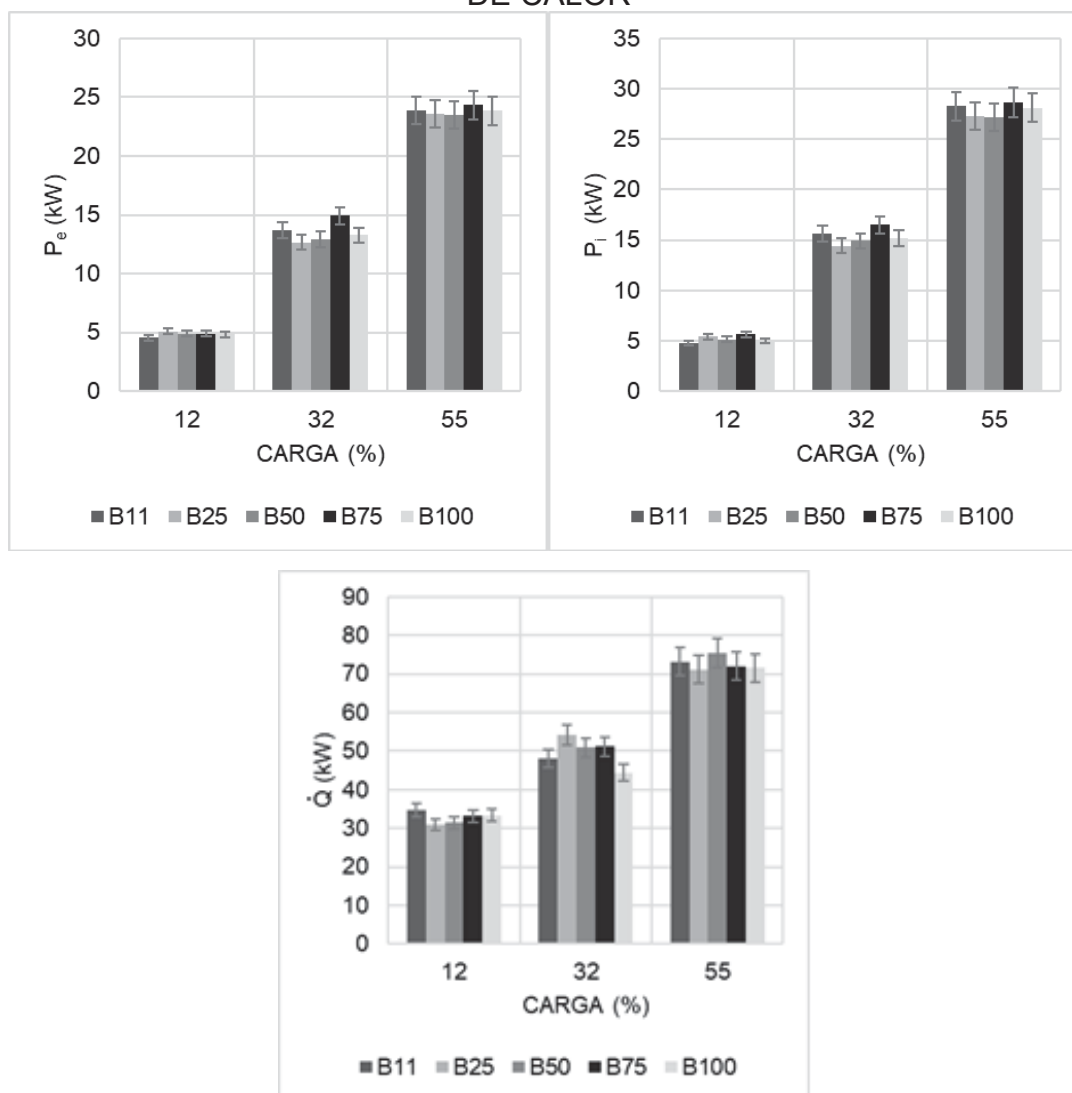
Com o motor em 12% da sua carga total, a potência efetiva teve seu menor valor no B11, com 4,52 kW, repetindo esta tendência para a potência indicada. A taxa de geração de calor teve seu menor valor no B25, com 30,93 kW. Ainda analisando a menor carga, o B25 teve melhores valores para as potencias efetiva e indicada, com 5,08 kW e 5,42 kW. Já a taxa de geração de calor, o B11 obteve o maior resultado com 34,64 kW.

Quando o motor operou com 32% de sua carga, a potência efetiva e teve seu menor e maior valor com os respectivos combustíveis: B25 (12,63 kW) e B75 (14,92 kW). A potência indica seguiu a mesma propensão, onde o B25 obteve um valor de 14,45 kW, e o B75 de 16,50. Já para a taxa de geração o B25 alcançou o maior valor, 54,13 kW, e o B100 teve 44,44 kW, representando a pior potência térmica para a carga média.

Na carga máxima dos testes, para a potência efetiva com exceção do B75 que obteve o melhor resultado com o 24,33 kW, os demais combustíveis ficaram com valores bem próximos, mas o menor resultado foi com o B50 (23,52 kW). Repetindo

este comportamento para a potência indicada. Já a taxa de geração de calor, teve uma variação significativa entre o maior e menor valor, representando 5,82%, no qual o maior valor foi o B50 (75,55 kW) e o menor valor com o B25 (71,55 kW).

FIGURA 4.8 – POTÊNCIA EFETIVA, POTÊNCIA INDICA E TAXA DE GERAÇÃO DE CALOR

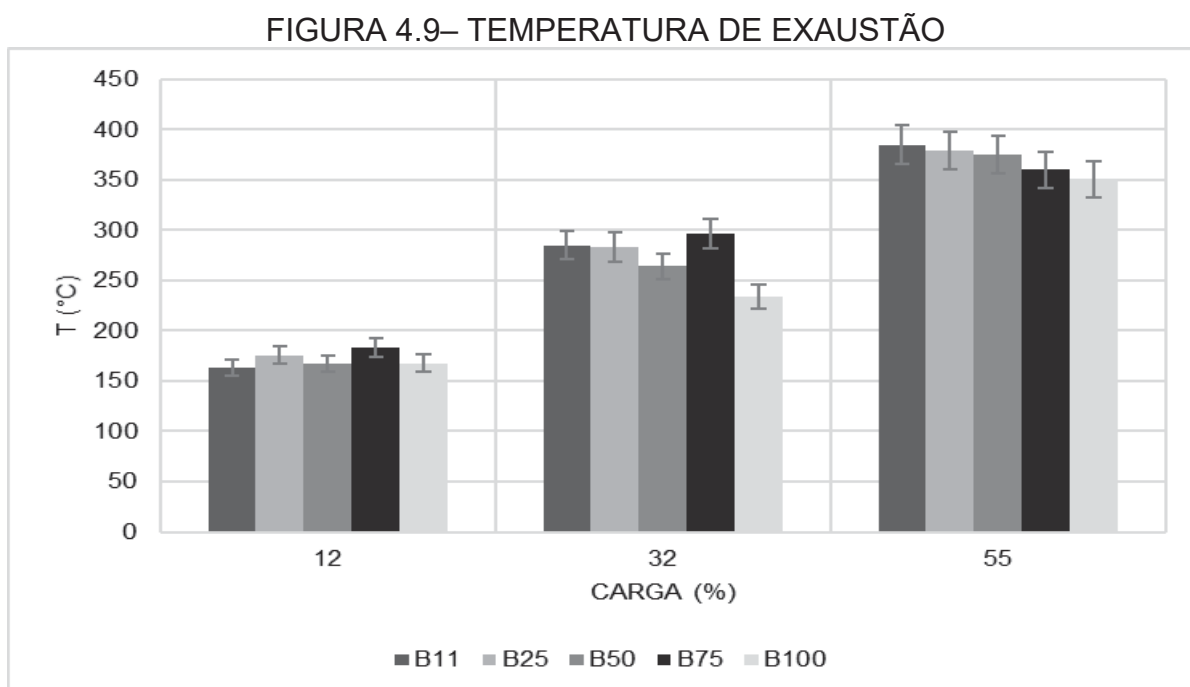


FONTE: do autor (2020)

Conforme observado pela figura 4.8, o aumento do percentual de biodiesel no combustível não altera significativamente os valores das potências efetiva e indicada. Entretanto, a taxa de geração de calor é tem um destaque negativo para o B100 que teve uma grande diferença quando operado na carga de 32% do total da capacidade do motor, também quando analisamos média da taxa de geração de calor do B100, que ficou muito abaixo das demais.

#### 4.3.4 Temperatura dos gases de exaustão

A figura 4.9. apresenta a temperatura dos gases de exaustão, do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas. Como pode ser observado, com 12% da carga total não houve uma variação significativa da temperatura entre os combustíveis, havendo uma média de 170°C. Já com 32% da carga total, começa a haver uma tendência de queda temperatura de exaustão com o aumento do percentual biodiesel no combustível. Este comportamento se mostra mais nítido quando é analisado o motor com 55% do seu máximo.



FONTE: do autor (2020)

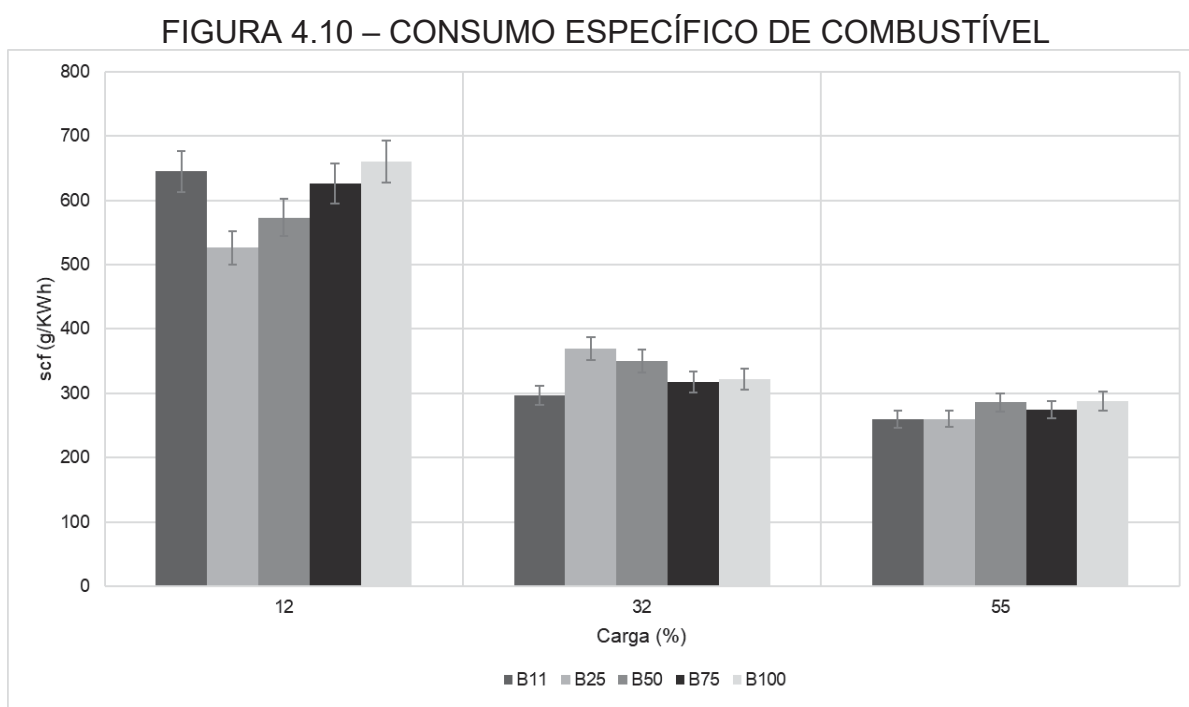
A redução da temperatura pode ocorrer pois, como já evidenciado no capítulo 2.5, quanto maior os valores de cetano no combustível há um aumento na temperatura dos gases de escape. Então o combustível B11 tem mais cetano que as demais misturas. Além disso, pode observar também que, como o biodiesel tem um poder calorífico menor, isso impacta diretamente taxa de geração de calor e na temperatura final dos gases no coletor de escape do motor.

### 4.3.5 Eficiência

#### 4.3.5.1 Consumo específico de combustível

A partir da figura 4.10, pode ser observado os resultados obtidos para consumo específico de combustível (sfc), do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas.

O (sfc) mensura a quantidade de combustível necessária para produzir uma unidade de potência, neste trabalho apresentado em kg/kJ, conforme está apresentado na figura 4.10. O sfc é um parâmetro importante pois quanto menor for seu valor maior será sua eficiência.



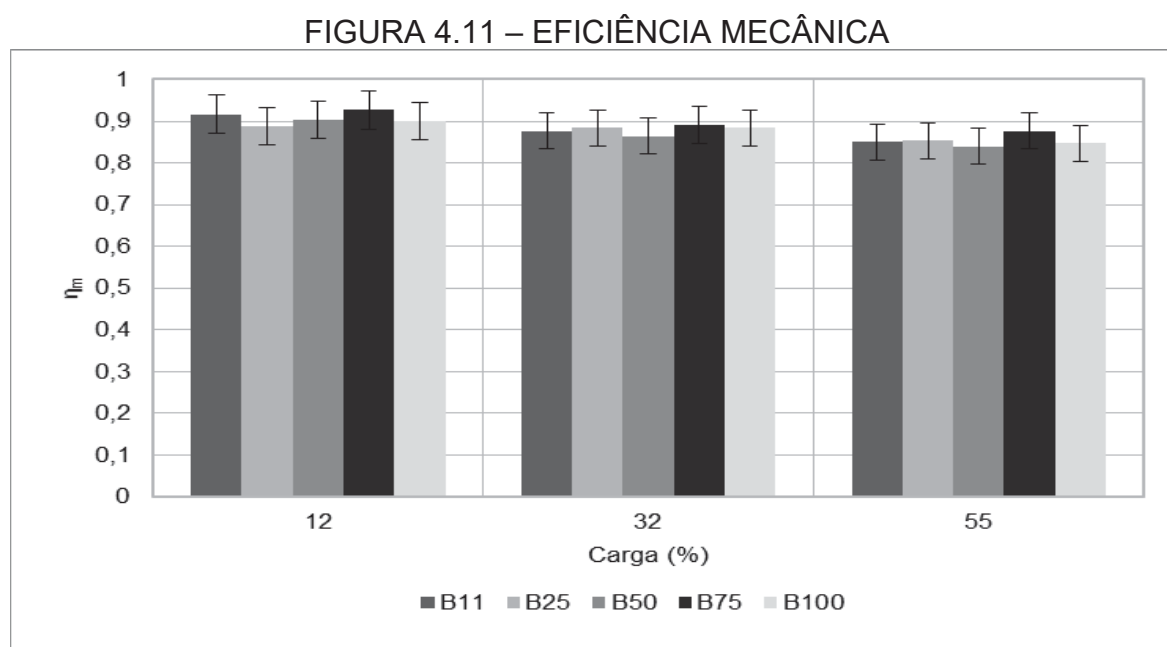
FONTE: do autor (2020)

O sfc diminuiu com o aumento da carga do motor, o que era o esperado. De acordo com a adição do teor de biodiesel na mistura, os resultados variaram com a carga aplicada. Para a primeira carga, o combustível mais eficiente foi o B25, e para a segunda e terceira carga, o B11 foi o mais eficiente. Se estimava também que as misturas com maiores percentuais de biodiesel obtivessem os melhores resultados pois o biodiesel inclui oxigênio em sua formação, o que melhora a combustão do combustível, porém os resultados foram o oposto.

#### 4.3.5.2 Eficiência mecânica

Na figura 4.11 é apresentada a eficiência mecânica do motor,  $\eta_m$ , do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas.

Como pode ser visto pela figura, a uma pequena queda na eficiência mecânica com o aumento da carga. Na literatura os valores de eficiência mecânica são entre 0,85 e 0,90. A partir dos valores obtidos, pode-se observar que eles são valores aceitáveis, quando visto cada potência analisada, pois todos os combustíveis têm comportamentos semelhantes de eficiência.



FONTE: do autor (2020)

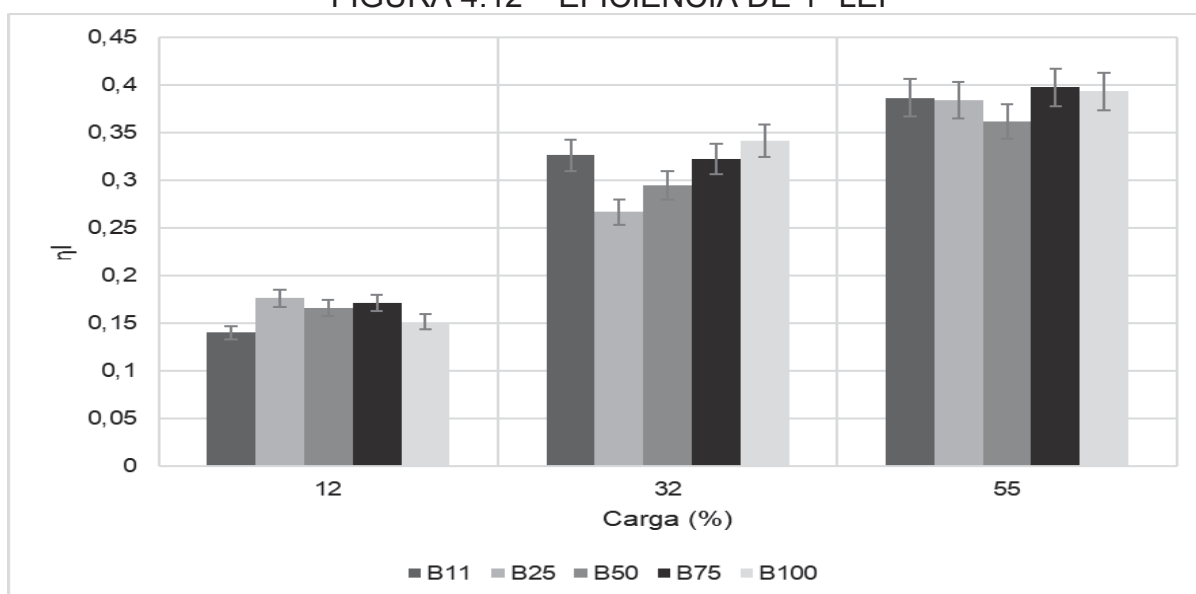
Positivamente, pode-se destacar o combustível B75, que obteve os melhores valores em todas as cargas, entregando o melhor trabalho para a máquina com as menores perdas possíveis. Porém, nota-se que na carga de 55%, obteve os piores valores de eficiência mecânica, ou seja, ocorreu mais atrito da máquina, acarretando um esforço maior para operar.

#### 4.3.5.3 Eficiência de 1ª lei, Eficiência de Carnot e Eficiência de 2ª lei

A partir da figura 4.12, pode ser observado os resultados obtidos para a eficiência de 1ª lei, do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas.

O combustível que melhor performou na menor carga foi o B25, com 17,55%. Todavia, o B75 ficou com um valor bem próximo variando apenas 0,4%. Ou seja, ambos os combustíveis obtiveram o mesmo resultado de eficiência. Contudo, o B11, mesmo tendo o maior poder calorífico, entregou a menor eficiência térmica, com 14,07%.

FIGURA 4.12 – EFICIÊNCIA DE 1ª LEI



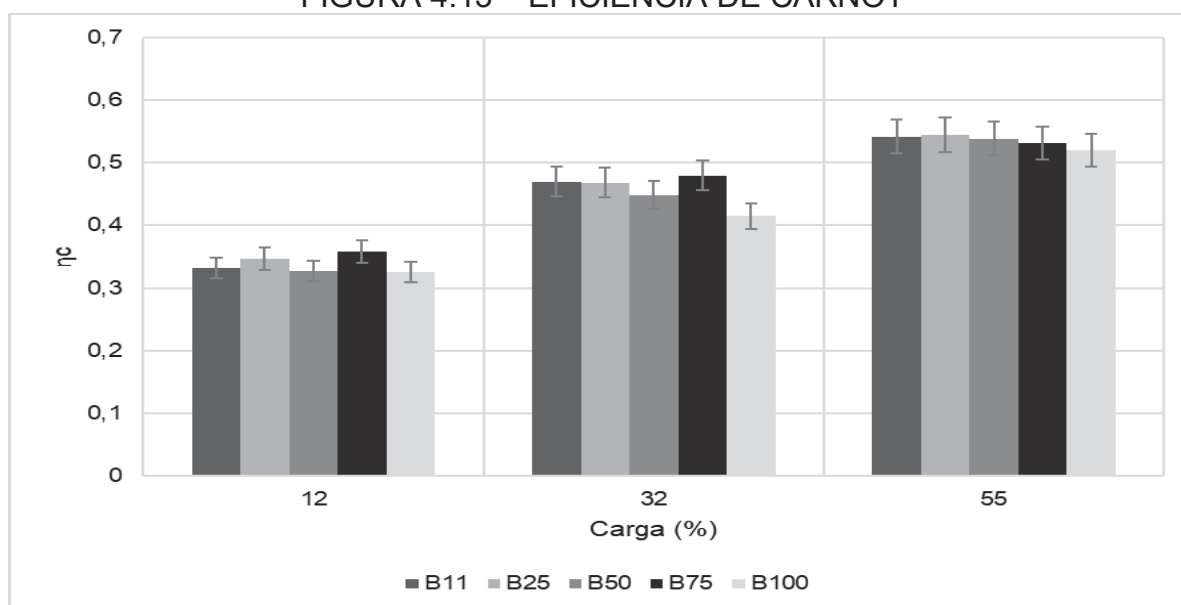
FONTE: do autor (2020)

Com 32%, o comportamento de alguns combustíveis se invertera comparado a carga anterior. O B25 que havia apresentado a melhor eficiência de 1ª lei anteriormente, foi o combustível que pior performou nesta carga, com apenas 26,70%. O B100 foi combustível mais eficiente, com 34,21%, que anteriormente foi um dos piores rendimentos. Analisando a maior carga, todos os combustíveis obtiveram aproximadamente a mesma eficiência, com 39%. Com exceção do B50, que obteve um valor mais abaixo, com 36,19%.

A partir da figura 4.13, pode ser observado os resultados obtidos para a eficiência de Carnot, do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas.

A eficiência de Carnot quando analisada em 12% da carga, pode ser vista com uma média de 16,16%. Com o B25 e B75 obtendo as melhores eficiências máximas. Na carga de 32%, a eficiência de Carnot ficou na faixa dos 46%, com o combustível B100 apresentando valores muito abaixo dos demais, com 41,48%. Para a carga de 55%, todos os combustíveis estiveram na média dos 53% de eficiência máxima. Dentre os combustíveis com melhores resultados para eficiência de Carnot, pode se destacar o B25 e o B75, contudo o que demonstrou os piores valores é o B100

FIGURA 4.13 – EFICIÊNCIA DE CARNOT



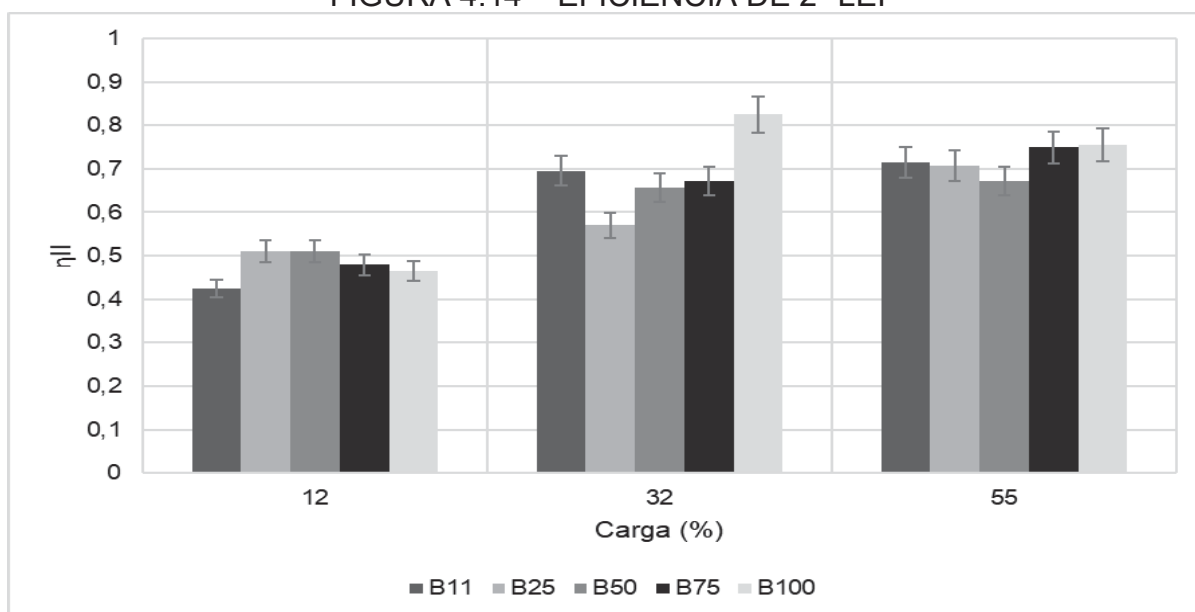
FONTE: do autor (2020)

A partir da correlação entre a eficiência de Carnot e a eficiência de 1ª lei, apresentada no capítulo 2.2.1. Pôde ser observado que os valores encontrados para a primeira carga são plausíveis. Já para os valores da segunda e terceira carga, há uma variação de aproximadamente 15%, comparando aos valores de tabela com os resultados experimentais. Esta discrepância se torna ainda maior (21,74%), quando analisado o combustível B100, na segunda carga

A partir da figura 4.14, pode ser observado os resultados obtidos para a eficiência de 2ª lei, do motor a diesel em estudo, para as cinco misturas, nas três cargas analisadas.

Como a eficiência de 2ª lei é dependente dos valores obtidos pela razão da eficiência de 1ª lei e a eficiência de Carnot. Perante os resultados obtidos nas duas figuras anteriores, pode ser afirmado que apenas na carga de 12% do total do motor é que se obteve bons resultado. Onde a mistura B25 e B50 obtiveram a melhor eficiência, com aproximadamente 50%. Todavia, o combustível B11 teve o maior percentual de trabalho perdido, apresentando a menor eficiência de 2ª lei (42,44%).

FIGURA 4.14 – EFICIÊNCIA DE 2ª LEI



FONTE: do autor (2020)

Para as cargas de 32% 55% da carga total do motor, era estimado obter uma eficiência de Carnot de 0,53 e 0,63, respectivamente. Para assim, a eficiência de 2ª estar na faixa de valores entre 0,50 e 0,65. Porém, como pode ser observado na figura acima, a grande maioria dos valores estão muito elevados. Temos apenas os combustíveis B25 e B50 que tem valores próximos a realidade, com 57,00% e 65,75%.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta Dissertação de mestrado, foi avaliado as emissões e desempenho de grupo motogerador com misturas diesel/biodiesel. Todos os detalhes foram apresentados, incluindo a resposta de um grupo motogerador de 44 kW operando com misturas B11, B25, B50, B75 e B100, em termos de eficiência e emissões, e assim foi possível avaliar o impacto dos combustíveis no rendimento do motor a diesel.

### 5.1 CONCLUSÃO

Nesta seção, foram apresentadas as características do produto do projeto “Impacto e Análise do Uso de Biodiesel na Minirrede”. Todos os detalhes foram apresentados, incluindo a resposta de um grupo motogerador de 44 kWe operando com misturas B12, B25, B50, B75 e B100, em termos de desempenho e emissões, conectando-o à rede COPEL e assim avaliar o impacto na qualidade de energia provida pela minirrede. Além do objetivo original proposto, i.e., a conexão à minirrede da UFPR de motogerador (44 kWe / 55 kVA) operando com combustíveis renováveis, foram obtidos os seguintes produtos:

- i. O motogerador foi conectado à rede COPEL e está operante.
- ii. A descrição do aparato experimental (grupo motogerador diesel/biodiesel/GN) foi realizada, a fim de atender os objetivos subsequentes;
- iii. O diesel proveniente do posto de combustível foi caracterizado no motogerador através suas emissões e desempenho;
- iv. Para todas as misturas de biodiesel apresentadas foi possível caracterizá-las no motor a diesel por meio de suas emissões e desempenho;
- v. Análise comparativa de emissões e desempenho do sistema operando com diesel puro e misturas de diferentes proporções diesel/biodiesel foi apresentada. Entretanto, não possível identificar qual mistura apresentou o melhor desempenho ou que emitiu menos gases poluentes. Pois em cada parâmetro houve uma melhor performance com um combustível distinto.

## 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Espera-se que esta dissertação de mestrado sirva como inspiração para outros trabalhos que buscam analisar o uso de biocombustíveis em um motogerador a diesel, realizando-se análises da eficiência da primeira e segunda lei termodinâmica, além verificar o impacto nas emissões. A seguir são propostas algumas sugestões:

- i. Instalar um motogerador com uma potência maior, para que entregue energia para a rede, e assim tenha benefícios financeiros ao projeto.
- ii. Utilizar equipamentos mais modernos para a aferição dos dados medidos;
- iii. Realizar este experimento com cargas maiores, aproximando da potência máxima de operação;
- iv. Buscar outras fontes de biocombustíveis para realizar para realizar os mesmos experimentos e comparar com os resultados atuais;
- v. Otimizar a medição da temperatura dos gases de exaustão, para que os resultados de eficiência de Carnot e a eficiência de 2ª lei sejam mais condizentes com a realidade;
- vi. Verificar o impacto de outros poluentes, por exemplo: componentes com enxofre, material particulado, entre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AN *et al* (2012) Combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled by biodiesel at partial load conditions. **Applied Energy**. ed:99 p: 363-371. 2012.

ALBUQUERQUE, Mônica C. G.; MACHADO, Yguatyara L.; TORRES, Antonio E. B.; AZEVEDO, Diana C. S.; CAVALCANTE JR., Célio L.; FIRMIANO, Lilian. R.; PARENTE JR, Expedito. J. S. **Properties of biodiesel oils formulated using different biomass sources and their blends**. *Renewable Energy*, v.34, p. 857–859, 2009.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **BIOCOMBUSTÍVEIS** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/www.anp/biocombustiveis>>, Acesso em :25/02/2020.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS **Anuário Estatístico Brasileiro**. MME - Ministério de Minas e Energia, Brasília: ANP.2019

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS **Anuário Estatístico Brasileiro**. MME - Ministério de Minas e Energia, Brasília: ANP.2019

BARROS, R. W. S., HENRÍQUEZ, J. R., DUTRA, J. C. C. Experimental Evaluation of the Use of Cottonseed Biodiesel and Mixtures with Commercial Diesel Oil in Diesel Generator Set. **IEEE Latin America Transactions** ed:16 p: 489-496. 2018.

BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2016

BRASIL. Decreto- Lei nº 13.263, de 23 de março de 2016. **Dispor sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1. 24/03/2016. p. 1

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Padrões de Qualidade do Ar**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-Atmosf%C3%A9ricos>> Acesso em: 10/02/2020a

BRASIL. BIOCOMBUSTÍVEIS: 50 perguntas e respostas sobre este novo mercado. Rio de Janeiro: [S.n.], 2007. 50 p. Disponível em: <[http://www2.petrobras.com.br/petrobras/portugues/pdf/Cartilha\\_Biocombustiveis.pdf](http://www2.petrobras.com.br/petrobras/portugues/pdf/Cartilha_Biocombustiveis.pdf)>, Acesso em 25/03/2020b.

BAYINDIR. H., ISIK. M., AYDIN. H. Evaluation of combustion, performance and emission indicators of canola oil-kerosene blends in a power generator diesel engine. **Applied Thermal Engineering**. ed:114. p: 234-244. 2017.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**, São Paulo: Blucher, 2012a. vol. 01.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**, São Paulo: Blucher, 2012b. vol. 02.

CLEMENTE, D. A. **Estudo de Impacto Ambiental das Fontes Industriais de Poluição do Ar no Município de Paulínia – S.P. Empregando Modelo ISCST3**. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

CORRO, G. Sulfur impact on diesel emission control -a review. **Reaction Kinetics and Catalysis Letters**, v. 75, n. 1, p. 89–106, 2002. Springer. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1014853602908>>

EPE - Empresa de Pesquisa Energética **BEN - Balanço Energético Nacional**. MME - Ministério de Minas e Energia, Brasília: EPE. Ano Base 2018, 2019

FAHIM, M., ALSAHAF, T. A., & ELKILANI, A. **Introdução ao Refino do Petróleo**. Rio de Janeiro: Elsevier. (2012).

FERNANDES, F.S.; SILVA, D. F. **Análise de consumo de combustível em um motor diesel 4t utilizando óleo diesel, biodiesel e mistura diesel/biodiesel**. Universidade de Rio Verde, Unirv. Disponível em: <http://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/Fernando%20Souza%20Fernandes.pdf>. Acesso: 25/02/2020

FILIPPO FILHO, G. **Máquinas térmicas estáticas e dinâmicas – fundamentos da termodinâmica, características operacionais e aplicações**. São Paulo: Érica, 2014.

KIM, J. H.; SIMON, T.W.; VISKANTA, R. Journal of heat transfer policy on reporting uncertainties in experimental measurements and results. **Journal of Heat Transfer**. v. 115, p. 5 – 6, 1993.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2012, vol. 1;

HINRICHS, R. A; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. dos. **Energia e meio ambiente. Poluição do ar e uso de energia**. 5a Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

IPCC - INTERGOVERNAMENTAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE. **Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. Cambridge University Press, 2005.

KEGL, B. Influence of biodiesel on engine combustion and emission characteristics. **Applied Energy**. ed 88. p.1803–1812. 2011

KNOTHE, G.; *et al.*; **Manual do biodiesel**. Tradução Luiz Pereira Ramos. São Paulo: Editora Blucher, 2006.

LEFF, H. S. Thermal efficiency at maximum work output: New results for old heat engines. **American Journal of Physics**. ed 55. p: 602-6019. 1987. doi: 10.1119/1.15071

LEITE, D. *et al.* Emissions and performance of a diesel engine affected by soybean, linseed, and crambe biodiesel. **Industrial Crops & Products**. ed: 130. p 267–272. 2019

LÔBO, Ivon P.; FERREIRA, Sérgio L.; CRUZ, Rosemira S. **Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos**. Química Nova, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, 2009.

MAQUIGERAL. **MAQ 12 W**. Disponível em: < <http://geradorescajamar.com.br/wp-content/uploads/2016/05/MAQ-12W-SDMO-Maquigeral.pdf> > Acesso em: 02/03/2020f

MARTINS. Jorge. **Motores de combustão interna**. 2.ed. Porto: Publindústrias, Edições Técnicas, 2006.

MENEGHETTI, S. M. P.; MENEGHETTI, M. R.; BRITO, Y. C. A **Reação de Transesterificação, Algumas Aplicações e Obtenção de Biodiesel**. Revista Virtual de Química, Vol.5, 2013.

MONTEIRO, L. DE A.; JUNIOR, P. G.; VELÁSQUEZ, J. A.; ROCHA, D. S.; BUENO, A. V. **Performance impact of the application of castor oil biodiesel in diesel engines**. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.33, n.6, p.1165-1171, 2013.

OBERT, E. F. **Motores de combustão interna**. Tradução de Fernando Luiz Carraro. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1971.

OGUNKUNLE, O. AHMED, N. Exhaust emissions and engine performance analysis of a marine diesel engine fuelled with Parinari polyandra biodiesel–diesel blends. **Energy Reports**. ed:6 p: 2999-3007. 2020.

ÖZER. S. The effect of adding toluene to increase the combustion efficiency of biodiesel. **Energy sources**. ed:18. 2020.

PAULO. 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**. ed:98 p: 288-297. 2016.

PEIXOTO, E. M. **Enxofre, elemento químico**. Química Nova na Escola. Ed, 16. 2012

RAMADHAS, A.S., MURALEEDHARAN C. e JAYARAJ, S. Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil. **Renewable Energy**. ed: 30. p: 1789–1800. 2005.

RENDEIRO, G. *et al.* **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília. 1ed: MME – Ministério de Minas e Energia 2008

SOLOMON, S.; *et al.* Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 106, n. 6, p. 1704–1709, 2009. National Academy of Sciences. Disponível em: <[www.pnas.org/cgi/content/full/](http://www.pnas.org/cgi/content/full/)>.

SZKLO, A. S., ULLER, V. C. **Fundamento do Refino de Petróleo: Tecnologia e Economia**. Rio De Janeiro: Interciência. 2008.

TAYARI, S.; ABEDI, R.; RAHI, A. Comparative assessment of engine performance and emissions fueled with three different biodiesel generations. **Renewable Energy**. ed. 147, p. 1058-1069, 2020.

TAYLOR, C.F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: Edgard Blücher, 1971.

TESTO. **Testo 310 Flue Gas Analyzer**: Instruction manual. Disponível em: <<https://static-int.testo.com/media/44/09/24c5948e0507/testo-310-Instruction-Manual.pdf>>. Acesso em: 07/03/2020

THAIYASUIT, P., PIANTHONG, K., MILTON, B. Combustion efficiency and performance of RSO biodiesel as alternative fuel in a single cylinder CI engine. **Energy Exploration & Exploitation**. V.30 · ed. 1. p: 153–166. · 2012.




TRAVISS, N. Breathing easier? The known impacts of biodiesel on air quality. **Biofuels**. P: 285–291. doi:10.4155/bfs.12.22. 2012

URNS, S. R. **An Introduction to Combustion: Concepts and Applications**. 2nd ed. McGraw-Hill: 2000.

ULUDAMAR, E.; YILDIZHAN, S.; AYDIN, K.; OZCANLI, M. Vibration, noise and exhaust emissions analyses of an unmodified compression ignition engine fuelled with low sulphur diesel and biodiesel blends with hydrogen addition. **International Journal of Hydrogen Energy**. ed. 41, p. 11481 – 11490, 2016.

VARELLA, Carlos Alberto Alves; SANTOS, Gilmar de Souza. **NOÇÕES BÁSICAS DE MOTORES DIESEL**. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2010.


## APENDICE A – CERTIFICADOS DE ANÁLISE DO LACAUT

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR LABORATÓRIO DE ANÁLISES DE COMBUSTÍVEIS AUTOMOTIVOS – LACAUT – CRQ 06206				
		Centro Politécnico - Usinas Piloto de Tecnologia Química - Bloco A Curitiba - PR - Caixa Postal: 19.024 - CEP: 81.531-980 Fone/Fax: (41) 3361-3188 / 3361-3200		
<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE Nº 11821/20</b>				
Produto: Mistura B11.				
Amostra coletada pelo:      (X) Cliente                      ( ) LACAUT				
Solicitante/Contato: PESQUISA- PROJETO COPEL/Carlos Henrique Matielo.				
Endereço/Telefone: Centro Politécnico – LACAUT – Curitiba - PR / (41) 3361-3188.				
Protocolo nº: 508/20		Amostra nº: 1755/20		
RESULTADO DE ANÁLISE				
ANÁLISE	RESULTADO	LIMITE (1)	UNIDADE	MÉTODO
Aspecto	Límpido e isento de impurezas	Límpido e isento de impurezas	-	NBR 14954 – 11
Condutividade	97	25 min.	pS/m	ASTM D2824 - 15
Cor	Vermelha	Vermelho	-	PEA 05 rev.14
<b>Destilação</b>				
10% vol. evaporados	194,4	Anotar.	°C	ASTM D86 – 19
50% vol. evaporados	291,1	245,0 a 310,0		
88% vol. evaporados	349,8	350,0 máx.		
90% vol. evaporados	354,3	Anotar.		
95% vol. evaporados	391,8	-		
Massa específica a 20 °C	848,9	815,0 a 855,0	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052 – 18a
Ponto de entupimento de filtro a 10 µm	-8	0 (2)	°C	ASTM D6371 - 17a
Teor de água	81	500 máx.	mg/kg	ASTM D6304 - 1616 <sup>2</sup> 1
Enxofre total	359,8	500 máx.	mg/kg	ASTM D5453 - 19a
Poder calorífico superior	44,965	-	MJ/kg	ASTM D240 - 19
<p><b>Nota (1):</b> Os limites citados para as análises referem-se a Resolução Nº50/2013 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A análise de poder calorífico superior não está contemplada na citada resolução.</p> <p><b>Nota (2):</b> Limite referente ao mês de agosto para o estado do Paraná.</p> <p><b>Dados do ensaio:</b>  <b>Início:</b> 13/08/20  <b>Término:</b> 24/08/20  <b>Técnico Responsável:</b> Pammela Schenno, Eduardo de Faria, Guilherme Borillo.</p> <p style="text-align: center;">Curitiba, 24 de agosto de 2020.</p> <p style="text-align: center;">  Responsável Técnico  André Romualdo Lopes  CRQ: 09200751</p>				
<b>OBSERVAÇÃO:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO A AMOSTRA RECEBIDA PELO LACAUT</li> <li>• AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE.</li> <li>• É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM NENHUMA ALTERAÇÃO.</li> </ul>				

ANÁLISE	RESULTADO	LIMITE	UNIDADE	MÉTODO
Massa específica a 20 °C	853,0	-	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052 - 18a
Enxofre	325,8	-	mg/kg	ASTM D5453 - 19a
Poder calorífico superior	44,210	-	MJ/kg	ASTM D240 - 18

**Dados do ensaio:**  
**Início:** 13/08/20  
**Término:** 24/08/20  
**Técnico Responsável:** Pammela Schenno, Eduardo de Faria, Guilherme Borillo.

Curitiba, 24 de agosto de 2020.

  
 Responsável Técnico  
 André Romualdo Lopes  
 CRQ: 09200751

**OBSERVAÇÃO:**

- A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO À AMOSTRA RECEBIDA PELO LACAUT;
- AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE;
- É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM NENHUMA ALTERAÇÃO.

1 / 1



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR**  
**LABORATÓRIO DE ANÁLISES DE COMBUSTÍVEIS**  
**AUTOMOTIVOS – LACAUT – CRQ 06206**  
 Centro Politécnico - Usinas Piloto de Tecnologia Química - Bloco A  
 Curitiba - PR - Caixa Postal: 19.024 - CEP: 81.531-980  
 Fone/Fax: (41) 3361-3188 / 3361-3200

**LACAUT**

**CERTIFICADO DE ANÁLISE Nº 11820/20**

Produto: Mistura B25.

Amostra coletada pelo:      Cliente                    LACAUT

Solicitante/Contato: PESQUISA - PROJETO COPEL/Carlos Henrique Matiolo.

Endereço/Telefone: Centro Politécnico – LACAUT – Curitiba - PR / (41) 3361-3188.

Protocolo nº: 509/20

Amostra nº: 1754/20

**RESULTADO DE ANÁLISE**





UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR  
 LABORATÓRIO DE ANÁLISES DE COMBUSTÍVEIS  
 AUTOMOTIVOS - LACAUT - CRQ 06206  
 Centro Politécnico - Usinas Piloto de Tecnologia Química - Bloco A  
 Curitiba - PR - Caixa Postal: 19.024 - CEP: 81.531-980  
 Fone/Fax: (41) 3361-3188 / 3361-3200

**LACAUT**

**CERTIFICADO DE ANÁLISE Nº 118-19/20**

Produto: Mistura B50.

Amostra coletada pelo: (X) Cliente ( ) LACAUT

Solicitante/Contato: PESQUISA- PROJETO COPEL/Carlos Henrique Mattolo.

Endereço/Telefone: Centro Politécnico - LACAUT - Curitiba - PR / (41) 3361-3188.

Protocolo nº: 509/20

Amostra nº: 1753/20

**RESULTADO DE ANÁLISE**

ANÁLISE	RESULTADO	LIMITE	UNIDADE	MÉTODO
Massa específica a 20 °C	860,8	-	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052 - 18a
Enxofre	152,3	-	mg/kg	ASTM D6453 - 19a
Poder calorífico superior	42,840	-	MJ/kg	ASTM D240 - 19

Dados do ensaio:

Início: 13/08/20

Término: 24/08/20




Técnico Responsável: Pammela Schenno, Eduardo de Faria, Guilherme Borillo.

Curitiba, 24 de agosto de 2020.

  
 Responsável Técnico  
 André Romualdo Lopes  
 CRQ: 09200751

**OBSERVAÇÃO:**

- A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO A AMOSTRA RECEBIDA PELO LACAUT.
- AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE.
- É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM NENHUMA ALTERAÇÃO.

	<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR</b> <b>LABORATÓRIO DE ANÁLISES DE COMBUSTÍVEIS</b> <b>AUTOMOTIVOS - LACAUT - CRQ 06208</b>			
	Centro Politécnico - Usinas Piloto de Tecnologia Química - Bloco A Curitiba - PR - Caixa Postal: 19.024 - CEP: 81.531-980 Fone/Fax: (41) 3361-3188 / 3361-3200			
<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE Nº 11818/20</b>				
Produto: Mistura B75.				
Amostra coletada pelo: <input checked="" type="checkbox"/> Cliente <input type="checkbox"/> LACAUT				
Solicitante/Contato: PESQUISA- PROJETO COPEL/Carlos Henrique Matielo.				
Endereço/Telefone: Centro Politécnico – LACAUT – Curitiba - PR / (41) 3361-3188.				
Protocolo nº: 509/20		Amostra nº: 1752/20		
<b>RESULTADO DE ANÁLISE</b>				
<b>ANÁLISE</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>LIMITE</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>MÉTODO</b>
Massa específica a 20 °C	869,9	-	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052 - 18a
Enxofre	85,6	-	mg/kg	ASTM D5453 - 19a
Poder calorífico superior	41,365	-	MJ/kg	ASTM D240 - 19
<b>Dados do ensaio:</b> Início: 13/08/20 Término: 24/08/20 Técnico Responsável: Pammela Schenno, Eduardo de Faria, Guilherme Borillo.				
Curitiba, 24 de agosto de 2020.				
 Responsável Técnico André Romualdo Lopes CRQ: 09200761				
<b>OBSERVAÇÃO:</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO A AMOSTRA RECEBIDA PELO LACAUT.</li> <li>• AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE.</li> <li>• É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM NENHUMA ALTERAÇÃO.</li> </ul>				
				1 / 1

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR				
LABORATÓRIO DE ANÁLISES DE COMBUSTÍVEIS AUTOMOTIVOS - LACAUT - CRQ 06208				
Centro Politécnico - Usinas Piloto de Tecnologia Química - Bloco A			LACAUT	
Curitiba - PR - Caixa Postal: 19.024 - CEP: 81.531-980				
Fone/Fax: (41) 3361-3188 / 3361-3200				
<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE Nº 11817/20</b>				
Produto: Biodiesel B100,				
Amostra coletada pelo:      (X) Cliente                      ( ) LACAUT				
Solicitante/Contato: PESQUISA- PROJETO COPEL/Carlos Henrique Mattioli.				
Endereço/Telefone: Centro Politécnico – LACAUT – Curitiba - PR / (41) 3361-3188.				
Protocolo nº: 509/20		Amostra nº: 1751/20		
RESULTADO DE ANÁLISE				
ANÁLISE	RESULTADO	LIMITE (1)	UNIDADE	MÉTODO
Aspecto	Límpido e isento de impurezas a 20,2 °C	Límpido e isento de impurezas com anotação da temperatura do ensaio.	-	PEA 05 Rev. 14
Cinzas sulfatadas	0,002	0,020 máx.	% massa	ASTM D674 – 18 Reaprovada
Corrosividade ao cobre, 3 h a 50 °C	1a	1 máx.	-	ASTM D130 - 19
Contaminação total	189	24 máx.	mg/kg	EN 12662 - 08
Índice de acidez	0,48	0,50 máx.	mgcoo/g	ASTM D954 – 18e2 Método B
Massa específica a 20 °C	879,1	860 a 900	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052 - 18a
Ponto de entupimento do filtro a frio	3	5 máx.(2)	°C	ASTM D6371 - 17a
Ponto de fulgor	141,5	100,0 mín.	°C	ASTM D93 - 19 Procedimento C
Teor de água	255	200,0 máx. (3)	mg/kg	ASTM D6304 - 18e1
Viscosidade cinemática a 40 °C	4,307	3,0 a 6,0	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D445 - 19
Enxofre	2,1	10 máx.	mg/kg	ASTM D5453 -10a
Sódio	< 1,0	5 máx.(4)	mg/kg	NBR 15553 - 08
Potássio	< 1,0			
Cálcio	< 1,0			
Magnésio	< 1,0			
Fósforo	< 1,0	10 máx.		
Glicerol livre	0,02	0,02 máx.	% massa	NBR15508 - 19
Glicerol total	0,18	0,25 máx.		
Monoacilglicerol	0,66	0,7 máx.		
Diacilglicerol	0,09	0,20 máx.		
Triacilglicerol	< 0,05	0,20 máx.		
Teor de éster	98,9	98,5 mín.	% massa	EN 14103 - 11
Metanol	0,05	0,20 máx.	% massa	EN 14110 - 19
<b>OBSERVAÇÃO:</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO A AMOSTRA RECEBIDA PELO LACAUT.</li> <li>• AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE.</li> <li>• É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM QUALQUER ALTERAÇÃO.</li> </ul>				



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR  
 LABORATÓRIO DE ANÁLISES DE COMBUSTÍVEIS  
 AUTOMOTIVOS - LACAUT - CRQ 06206  
 Centro Politécnico - Usinas Piloto de Tecnologia Química - Bloco A  
 Curitiba - PR - Caixa Postal: 19.024 - CEP: 81.531-980  
 Fone/Fax: (41) 3361-3188 / 3361-3200

**LACAUT**

### CONTINUAÇÃO DO CERTIFICADO DE ANÁLISE 11817/20

**Nota (1):** Os limites citados para as análises referem-se a Resolução Nº45/2014 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

**Nota (2):** Limite referente ao mês de agosto para o estado do Paraná.

**Nota (3):** Para efeito de fiscalização, nas situações por não conformidade, será admitida a variação de +50 mg/kg no limite do teor de água no biodiesel para o produtor e de +150 mg/kg para o distribuidor.

**Nota (4):** Limite referente a sódio + potássio.

**Nota (5):** Limite referente a cálcio + magnésio.

**Dados do ensaio:**

Início: 12/08/20

Término: 24/08/20

Técnico Responsável: Pammela Schenno, Leandro Coriolano, Eduardo de Faria, Guilherme Borillo, André Lopes.

Curitiba, 24 de agosto de 2020.

Responsável Técnico  
 André Romualdo Lopes  
 CRQ: 09.200731

**OBSERVAÇÃO:**

- A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO A AMOSTRA RECEBIDA PELO LACAUT.
- AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE.
- É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM NENHUMA ALTERAÇÃO.

## APENDICE B – RESULTADO DE ANÁLISE DO CEPESQ

Teores de éteres e de água, acidez e índice de iodo do B100 e de suas misturas com diesel de petróleo (S10).

Amostra	Teor de ésteres totais (%)	Teor de água (ppm)	Acidez (mg KOH/g)	Índice de iodo
B12	10,7 ± 0,4	10 ± 0	0,172 ± 0,012	22,9 ± 3,7
B25	22,4 ± 0,9	19 ± 2	0,304 ± 0,013	44,0 ± 2,1
B50	51,4 ± 3,0	24 ± 2	0,420 ± 0,024	64,8 ± 2,7
B75	76,2 ± 1,3	39 ± 1	0,511 ± 0,013	80,3 ± 5,7
B100	99,7 ± 0,8	77 ± 2	0,546 ± 0,017	107,9 ± 4,1
Ajuste linear	1,0218 + 1,2067	0,6598x + 0,6845	0,0046x + 0,1421	0,9531x + 11,606
R <sup>2</sup>	0,9983	0,8854	0,9839	0,9914

## ANEXO A – RESULTADO DOS EXPERIMENTOS

Cargas	Combustível	Consumo		Potências		
		Vazão (L/h)	Vazão Mássica (Kg/h)	Taxa de geração calor (KW)	Potência Indicada (KW)	Potência Efetiva (KW)
5 kW	B11	2,49	2,93	34,64	4,82	4,55
	B25	2,27	2,67	30,93	5,42	5,08
	B50	2,41	2,80	31,42	5,17	4,88
	B75	2,67	3,07	33,15	5,65	4,90
	B100	2,81	3,20	33,33	5,02	4,84
14 kW	B11	3,45	4,07	48,03	15,63	13,67
	B25	3,98	4,67	54,13	14,45	12,63
	B50	3,90	4,53	50,86	14,93	12,93
	B75	4,12	4,73	51,17	16,50	14,92
	B100	3,75	4,27	44,44	15,20	13,27
24 kW	B11	5,26	6,20	73,22	28,28	23,87
	B25	5,23	6,13	71,15	27,30	23,62
	B50	5,80	6,73	75,55	27,22	23,52
	B75	5,80	6,67	72,07	28,67	24,33
	B100	6,04	6,87	71,51	28,12	23,85

Cargas	Combustível	Eficiências				
		Eficiência Mecânica	sfc (kg/kW.h)	Eficiência 1ª Lei	Eficiência Carnot	Eficiência 2ª Lei
5 kW	B11	0,92	644,58	0,14	0,33	0,42
	B25	0,89	526,02	0,18	0,35	0,51
	B50	0,90	573,28	0,17	0,33	0,51
	B75	0,93	625,74	0,17	0,36	0,48
	B100	0,90	660,04	0,15	0,33	0,47
14 kW	B11	0,88	297,04	0,33	0,47	0,70
	B25	0,88	369,37	0,27	0,47	0,57
	B50	0,86	350,54	0,29	0,45	0,66
	B75	0,89	317,24	0,32	0,48	0,67
	B100	0,88	321,58	0,34	0,41	0,82
24 kW	B11	0,85	259,70	0,39	0,54	0,71
	B25	0,85	260,29	0,38	0,54	0,71
	B50	0,84	286,06	0,36	0,54	0,67
	B75	0,88	274,54	0,40	0,53	0,75
	B100	0,85	287,89	0,39	0,52	0,76

Cargas	Combustível	Emissões				
		ppm CO	% CO <sub>2</sub> IR	ppm NO <sub>x</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>
5 kW	B11	662,83	2,49	361,73	230,92	130,82
	B25	423,53	2,67	360,59	266,40	94,19
	B50	525,50	2,66	375,71	259,50	116,21
	B75	470,77	2,59	348,13	244,87	103,26
	B100	547,00	2,65	392,33	256,17	136,16
14 kW	B11	383,42	4,15	738,91	624,75	114,16
	B25	368,50	4,00	624,36	521,73	102,62
	B50	366,50	4,09	710,18	598,08	112,09
	B75	298,83	4,29	696,83	608,67	88,16
	B100	336,17	4,20	763,45	643,92	119,53
24 kW	B11	234,08	6,74	1314,63	1258,58	56,04
	B25	232,97	6,66	1124,69	1077,63	47,06
	B50	217,25	5,83	1200,43	1139,33	61,10
	B75	315,33	7,25	1223,52	1171,87	51,66
	B100	249,08	6,43	1329,86	1268,50	61,36