



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TEGNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RENATO WAGNER DA SILVA BARROS

**ESTUDO SOBRE O USO DO BIODIESEL COMO COMBUSTÍVEL PARA
MOTO-GERADORES A CICLO DIESEL: ASPECTOS DO DESEMPENHO
TÉRMICO E EMISSÕES DE POLUENTES**

RECIFE

2017

RENATO WAGNER DA SILVA BARROS

**ESTUDO SOBRE O USO DO BIODIESEL COMO COMBUSTÍVEL PARA MOTO-
GERADORES A CICLO DIESEL: ASPECTOS DO DESEMPENHO TÉRMICO E
EMISSÕES DE POLUENTES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco sobre o uso do biodiesel
como combustível para Motor-Gerador a ciclo
Diesel: Aspectos do desempenho Térmico e
emissões dos poluentes.

Orientador: Jorge Recarte Henríquez Guerrero.

Coorientador: Prof. José Carlos Charamba Dutra

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéia Alves, CRB-4 / 1260

- B2774e Barros, Renato Wagner da Silva.
 Estudo sobre o uso do biodiesel como combustível para moto-geradores a ciclo diesel: aspectos do desempenho térmico e emissões de poluentes / Renato Wagner da Silva Barros. – 2017.
 83 folhas, il., tabs.
- Orientador(a): Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero.
 Coorientador(a): Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra.
- TESE (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.
 Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia Mecânica. 2. Biodiesel de óleo de semente de algodão. 3. Misturas de biodiesel/óleo diesel. 4. Eficiência térmica. 5. Consumo específico de combustível. 6. Propriedades dos combustíveis. 7. Emissões características. I. Guerrero, Jorge Recarte Henriquez (Orientador). II. Dutra, José Carlos Charamba. (Coorientador).11 III. Título.

621 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2018-180

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RENATO WAGNER DA SILVA BARROS

*ESTUDO SOBRE O USO DO BIODIESEL COMO COMBUSTÍVEL PARA MOTO-
GERADORES A CICLO DIESEL: ASPECTOS DO DESEMPENHO TÉRMICO E
EMISSIONES DE POLUENTES*

APROVADA EM: 13 DE FEVEREIRO DE 2017.

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO
ORIENTADOR PRESIDENTE

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA
COORDENADOR

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALES
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO (UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE)

Prof^a. Dr^a. ANA ROSA MENDES PRIMO (UFPE)

Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS (UFPE)

Prof. Dr. ALCIDES CODECEIRA NETO (UFPE)

Prof. Dr. RÔMULO SIMÕES CEZAR MENEZES (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus e Senhor, que me permitiu pela Sua Graça, galgar mais um importante degrau na minha vida profissional. Aos meus pais pelo amor sem igual. A minha carinhosíssima irmã mais nova Eduarda Andréa, que me toma quase como seu filho. À minha esposa Tarciana e às minhas afetuosas filhas Júlia e Renata pela paciência e compreensão. Aos meus irmãos na jornada dessa vida D.Sc. Alexandre Costa, Sergio Braga e Rômulo Brainer pela amizade e enorme atenção.

Ao Professor Coordenador Dr. Carlos Charamba que me incentivou na realização dos trabalhos. Em especial, ao meu Professor e Orientador Dr. Jorge Henriquez, pelo seu comprometimento e profissionalismo em me conduzir ao êxito nesse trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE pela colaboração em minha formação. Ao Professor Dr. Alexandre Schuler pela sua ajuda e por ser sempre agradável comigo. Ao amigo Engenheiro James, CETENE - MCT, pela amizade e pelo fornecimento do biodiesel.

Aos amigos estagiários Cleison e Rivson e ao técnico Guilherme Adilson pelo auxílio durante os trabalhos e pelo crescente respeito e amizade. Aos amigos da Secretaria da Pós-Graduação, por tornar simples o acesso às informações pertinentes. À Donana, D. Albertina e Judite que me estimularam com palavras suaves de sabedoria e cheias do Espírito Santo, todos os dias.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (Facepe) pelo apoio financeiro na forma de uma bolsa de estudos concedida.

Aos amigos Professores de Eletrotécnica do IFPE Campus Recife, pelas brincadeiras, palavras e demonstrações de apoio.

A todos os colegas, nesse percurso, que colaboraram direta ou indiretamente, cada um ao seu modo.

OBRIGADO!

RESUMO

Os motores a ciclo diesel, no Brasil, são empregados nos setores de transporte, indústria, agricultura e geração distribuída de energia elétrica, acarretando em enorme consumo de óleo diesel que, por consequência, conduz a uma elevação das emissões de poluentes. Contudo, busca-se otimizar o desempenho do motor, adequando à redução das emissões de poluentes da exaustão, através da utilização de biocombustíveis, originados da biomassa. Este trabalho refere-se a um estudo experimental sobre o desempenho, o consumo específico de combustível e as emissões de poluentes de um grupo motor-gerador diesel Hyundai 14 kW, abastecido com biodiesel de algodão puro (100% de biodiesel), misturas de óleo diesel com percentagens de 20%, 30%, 50% e 70% de biodiesel, respectivamente, e óleo diesel comercial, com 93% de diesel e 7% de biodiesel, utilizado como referência. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cogeração do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco. O gerador diesel foi instrumentado e acoplado a um banco de resistências permitindo a variação da carga de 0% a 100% da potência nominal. As medições dos parâmetros elétricos e termodinâmicos do sistema foram efetuadas durante a operação do gerador em regime permanente, sucedidas após a temperatura dos gases de exaustão se estabelecer constante. Os resultados indicaram uma redução do consumo específico de combustível com o aumento da carga, e um acréscimo com o aumento do biodiesel na mistura. A eficiência térmica aumentou com o aumento da carga, e não apresentou diferenças significativas entre os combustíveis testados. As emissões de CO reduziram com o aumento da carga, para todos os combustíveis testados. As emissões de CO₂ aumentaram com a carga, e com as misturas de biodiesel nas operações com as cargas maiores, comparadas ao diesel comercial. As emissões de NO_x e o teor de fuligem nos gases de exaustão aumentaram com a elevação da carga, para todos os combustíveis. Em relação ao aumento do biodiesel na mistura, a emissão de NO_x aumentou, enquanto que, o teor de fuligem decresceu.

PALAVRAS-CHAVE: Biodiesel de óleo de semente de algodão. Misturas de biodiesel/óleo diesel. Eficiência térmica. Consumo específico de combustível. Propriedades dos combustíveis. Emissões características.

ABSTRACT

Diesel cycle engines in Brazil are employed in the transportation, industry, agriculture, and distributed generation of electric energy sectors, resulting in a huge consumption of diesel fuel which consequently leads to an increase in pollutant emissions. However, the aim is to optimize engine performance by combining the reduction of emissions of exhaust pollutants through the use of biofuels originating from biomass. This work refers to an experimental study about the performance, specific fuel consumption and exhaust emissions of a Hyundai 14 kW diesel-engine generator set, supplied with neat cottonseed biodiesel (100% biodiesel), blends of diesel composed of 20%, 30%, 50% and 70% biodiesel, respectively, and commercial diesel composed of 93% of common diesel and 7% of biodiesel as reference. The tests were carried out in the Cogeneration Laboratory of the Mechanical Engineering Department of the Federal University of Pernambuco. The diesel generator was instrumented and coupled to a resistor bank, allowing a load variation from 0% to 100% of rated power. The measurements about the electrical and thermodynamic system parameters were carried out during the operation of the generator in permanent regime, succeeded after the temperature of the exhaust gases were established constant. The results indicated a reduction of the specific fuel consumption with the increase of the load and, an increase with the increase of the biodiesel in the mixture. Thermal efficiency has grown with increasing load, and did not present significant information for the fuels tested. The CO emissions reduced with load extension, for all tested fuels. The CO₂ emissions increased with load, and with biodiesel blends in operations with larger loads, compared to commercial diesel. The NO_x emissions and soot content in the exhaust gases have increased with increasing loads for all fuels. As the biodiesel becomes larger in the blend, a NO_x emission grows, while, the soot content becomes smaller.

KEYWORDS: Biodiesel from cottonseed oil. Blends of biodiesel / diesel. Thermal efficiency. Specific fuel consumption. Fuel properties. Exhaust emissions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 –	Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte.....	18
FIGURA 2 –	Consumo de combustível de óleo diesel	18
FIGURA 3 –	Evolução da participação das matérias primas utilizadas na produção de biodiesel.....	20
FIGURA 4 –	O Brasil assume a segunda posição na produção de biodiesel em 2015- Bilhões de litros de combustíveis.....	22
FIGURA 5 –	Balança analítica, OHAUS – AR 2140.....	33
FIGURA 6 –	Calorímetro C – 2000 – IKA.....	34
FIGURA 7 –	Bomba calorimétrica – Vaso de decomposição.....	34
FIGURA 8 –	Relação de viscosidade e poder calorífico das misturas de biodiesel/óleo diesel.....	35
FIGURA 9 –	Bancada de testes - Grupo motor – gerador Hyundai D4BB- AG31.....	36
FIGURA 10 –	Esquema do motor- gerador.....	37
FIGURA 11 –	Esquema da bancada de testes Instrumentada.....	38
FIGURA 12 –	Forno eletrônico de calibração dos Termopares.....	39
FIGURA 13 –	Instalação do termopar tipo T- entrada de ar do sistema de combustão.....	40
FIGURA 14 –	Temperatura dos gases de exaustão.....	41
FIGURA 15 –	Conexão dos termopares ao DATA TAKER DT85.....	41
FIGURA 16 –	Anemômetro de fio quente VT.....	42
FIGURA 17 –	Esquema do posicionamento da haste do Anemômetro de fio quente VT 50.....	43
FIGURA 18 –	Esquema do circuito eletrônico do anemômetro VT 50.....	43
FIGURA 19 –	Esquema Método de varredura com divisão em 5 áreas.....	44
FIGURA 20 –	Balança eletrônica de precisão modelo 2098 – TOLEDO.....	45
FIGURA 21 –	Analizador de gases, Tempest 100.....	45
FIGURA 22 –	Esquema de medição dos gases.....	46
FIGURA 23 –	Bomba de fuligem.....	47
FIGURA 24 –	Esquema de medição de fuligem (opacidade).....	47

FIGURA 25 – Escala de fuligem e as amostras com papel filtro com as respectivas potências das cargas.....	48
FIGURA 26 – Analisador de energia elétrica FLUKE - modelo 434 II.....	49
FIGURA 27 – Esquema de conexão do analisador de energia à rede trifásica.....	50
FIGURA 28 – Banco de resistor trifásico.....	52
FIGURA 29 – Consumo de combustível.....	53
FIGURA 30 – Consumo específico de combustível.....	55
FIGURA 31 – Eficiência térmica.....	57
FIGURA 32 – Emissão de oxigênio.....	59
FIGURA 33 – Emissão de monóxido de carbono.....	60
FIGURA 34 – Emissão de dióxido de carbono.....	61
FIGURA 35 – Emissão de óxido de nitrogênio.....	62
FIGURA 36 – Índice de fuligem dos gases de exaustão.....	63
FIGURA 37 – Escala de fuligem, as amostras de combustível, papel filtro com fuligem e as respectivas potências das cargas.....	65
FIGURA 38 – Temperatura dos gases de exaustão.....	68
FIGURA 39 – Potência elétrica produzida com o B7.....	72
FIGURA 40 – Potência elétrica produzida com o B100.....	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	Principais características das oleaginosas para a produção de biodiesel.....	19
TABELA 2 –	Especificações técnicas da balança analítica OHAUS – AR 2140.....	33
TABELA 3 –	Levantamento das médias das propriedades físico-químicas dos combustíveis.....	35
TABELA 4 –	Forno BAT - Calibrador de sensores de Temperatura.....	39
TABELA 5 –	Especificações do Tempest 100.....	46
TABELA 6 –	Interpretação da escala de comparação de fuligem.....	49
TABELA 7 –	Características de entrada e do sistema de amostragem – FLUKE 434-II.....	51
TABELA 8 –	Resultados obtidos sobre os parâmetros elétricos medidos, para cada ensaio do grupo gerador.....	70
TABELA 9 –	Valores de potência elétrica medidos no barramento elétrico do gerador.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials.

ANP – Agência Nacional de Petróleo e gás

MME – Ministério de Minas e Energia

BEN – Balanço Energético Nacional

B100 – biodiesel puro;

B7 – óleo diesel comercial;

B20 – combustível com 80% de óleo diesel e 20% de biodiesel;

B30 – combustível com 70% de óleo diesel e 30% de biodiesel;

B50 – combustível com 50% de óleo diesel e 50% de biodiesel;

B70 - combustível com 30% de óleo diesel e 30% de biodiesel;

MMA –Ministério da Agricultura

Efe – Eficiência térmica

CEC – Consumo específico de combustível

IC – Ignição por compressão

DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica

DEQ – Departamento de Engenharia Química

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

NOX – Óxidos de Nitrogênio

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

TGE – Temperatura dos Gases de Escape

LISTA DE SÍMBOLOS

Q' – Volume do fluido por unidade de tempo, vazão, m³/s

m' – Fluxo mássico por unidade de tempo

ρ – Densidade

P – Potência ativa

kW – Quilowatt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVO.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	31
3.1	PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS.....	32
3.2	BANCADA DE TESTES COM GRUPO MOTOR-GERADOR DIESEL.....	36
3.3	INSTRUMENTAÇÃO APLICADA NAS MEDIÇÕES DOS DADOS.....	37
3.3.1	Termopares.....	39
3.3.2	Sistema de aquisição de dados.....	41
3.3.3	Anemômetro de fio quente.....	42
3.3.4	Balança eletrônica.....	44
3.3.5	Analizador de gases – Sistema de exaustão.....	45
3.3.6	Bomba de medição de fuligem – Sistema de exaustão.....	46
3.3.7	Analizador de energia.....	49
3.3.8	Banco de resistores.....	51
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	53
4.1	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	53
4.2	CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL.....	54
4.3	EFICIÊNCIA TÉRMICA.....	56
4.3.1	A eficiência térmica representando a fração de calor transformada em trabalho.....	57
4.4	EMISSÕES DOS GASES DE EXAUSTÃO DO MOTOR GERADOR DIESEL.....	58
4.4.1	Emissão de Oxigênio, O₂.....	58
4.4.2	Emissão de Monóxido de Carbono, CO.....	59
4.4.3	Emissão de dióxido de carbono, CO₂.....	61
4.4.4	Emissão de óxidos de nitrogênio, NO_x.....	62
4.4.5	Emissão de Fuligem.....	63

4.5	TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA.....	68
4.6	PARÂMETROS ELÉTRICOS DO GERADOR DIESEL.....	69
4.6.1	Tensão elétrica.....	70
4.6.2	Frequência elétrica.....	70
4.6.3	Potência elétrica.....	71
5	CONCLUSÕES TRABALHOS FUTUROS.....	74
5.1	CONCLUSÕES.....	74
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	75
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICES A – CALIBRAÇÃO DE TERMOPARES.....	82

1 INTRODUÇÃO

Um número significativo de trabalhos encontrados na literatura apresenta o empenho de pesquisadores e desenvolvedores de motor a ciclo diesel, no sentido de estabelecer uma relação otimizada entre a qualidade do combustível que abastece o motor e os parâmetros de desempenho e de emissões de poluentes resultantes do processo de combustão do motor, conforme abordam Kalgudi & Suresh (2014), Kumar, Goel e Chauhan (2013), Özer (2014), Yang et al. (2015). A qualidade do combustível pode ser compreendida, por exemplo, de acordo com a matéria-prima utilizada e com base em seus parâmetros físico-químicos, e o desempenho discorre baseado na eficiência térmica e no consumo específico de combustível pertinente aos motores diesel.

Normas estabelecidas pela ANP (2014, 2016), ABNT NBR 14489 (2001) e ABNT NBR 14664 (2001) têm fornecido ferramentas, destinadas à regulação da qualidade dos combustíveis, assim como impõem restritos limites estabelecidos às emissões dos poluentes da exaustão e determinam a segurança dos procedimentos de testes aplicados às medições em motores veiculares e estacionários. Observa-se que o motor diesel é uma relevante fonte de aerossóis e, devido a essa razão, esforços são empregados em investigações a respeito de soluções em que os combustíveis não renováveis, possam ser substituídos por combustíveis procedentes de fontes renováveis e menos poluentes. O óleo diesel obtido do petróleo alimenta os motores de ignição por compressão, mas se enquadra nos termos de uma fonte de energia não renovável. É sabido que a importância desse combustível se reflete estrategicamente no desenvolvimento econômico nacional. Contudo, mesmo considerando que o óleo diesel produzido venha recebendo melhorias através de novas tecnologias para atender às especificações de órgãos ambientais, como por exemplo, na redução do seu teor de enxofre, torna-se necessária a busca por novas fontes renováveis, almejando estabelecer uma segurança energética a contento e que assumam as características de desenvolvimento sustentável.

Na década de 1970, o mundo foi abalado pela crise do petróleo. Muitos países entenderam o aviso e trataram de ampliar suas buscas por novos combustíveis que reduzissem a dependência do petróleo. Foi devido a essa crise que o Brasil desenvolveu um programa (PRÓ-ÁLCOOL) estabelecendo o uso do álcool da cana-de-açúcar como combustível para alimentar os motores do ciclo Otto. Outro programa (PRÓ-ÓLEO) foi criado para utilizar óleos vegetais em motores do ciclo Diesel. Porém, não teve a mesma grandeza do primeiro.

Atualmente, muitos países não produtores de petróleo produzem e consomem o biodiesel a partir das matérias-primas de seus territórios, de maneira estratégica, como alternativa ao óleo diesel de petróleo, alcançando determinada independência em relação ao combustível não renovável, além do cumprimento das regulações estabelecidas por órgãos ambientais, que limitam as concentrações dos elementos contidos nos gases de exaustão do motor.

Os Estados Unidos têm assumido a posição de maior produtor mundial de biodiesel. A Alemanha e a França são os maiores produtores de biodiesel na Europa. Em 2005, com base no sucesso obtido com a inclusão do álcool combustível, como medida do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) do Governo brasileiro, introduziu-se o biodiesel na Matriz Energética do país, com a finalidade de garantir uma alternativa ao óleo diesel e obter a redução de importação, além de usufruir de uma fonte renovável e mais limpa originada da biomassa. O Brasil, em 2015, se consolidou como o segundo maior produtor mundial de biodiesel, atrás dos Estados Unidos. Em 2016, o Brasil tornou-se um dos maiores produtores e consumidores de biodiesel no mundo, segundo o Canalbioenergia (2016).

De acordo com a Lei Nº 11.097 (2005), que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, o biodiesel é conceituado como um combustível obtido da biomassa, através dos processos mais comuns de transesterificação, pela rota metílica ou etílica, com a presença de catalisador básico. O biodiesel é produzido a partir de matérias-primas como plantas oleaginosas, como por exemplo, soja e algodão, gordura animal e óleos de fritura residuais, de maneira que possa substituir os combustíveis derivados de petróleo.

A representatividade do algodão implica em ser uma cultura extremamente relevante na área socioeconômica, sendo explorado por cerca de milhões de produtores e trabalhadores, no mundo. A cadeia produtiva do algodão, no Brasil, permite estabelecer a sua colocação entre os cinco países maiores produtores de algodão, ao lado de China, Índia, Estados Unidos e Paquistão (Conab, 2016). A aplicação principal da cotonicultura é direcionada à indústria têxtil. A semente do algodão é utilizada em importante papel como fonte de proteína dedicada à alimentação animal. Na semente de algodão, encontra-se um teor de óleo de até 30,15% (KHAN et al., 2010) para a produção de biodiesel. A soja e a gordura bovina ocupam a primeira e a segunda posição na escala de aproveitamento para a produção de biodiesel, respectivamente, devido às suas importantes participações na alimentação humana. Esses três produtos dispõem de

desenvolvida tecnologia aplicada aos seus beneficiamentos e destacam-se na produção de biodiesel, no Brasil.

As propriedades físico-químicas do biodiesel puro e das misturas de biodiesel/óleo diesel em comparação com as características do óleo diesel convencional, apesar de semelhantes, como, por exemplo, viscosidade, densidade e poder calorífico obtido a partir do biodiesel, apresentam diferenças que podem ser significativas. Dessa forma, aumentando o percentual de biodiesel em uma determinada mistura de combustível, poderia haver o aumento de depósitos no motor, variação na massa de combustível injetado, dificultando a obtenção de uma mistura de ar/combustível e, redução na melhoria da eficiência térmica e consumo de combustível, respectivamente.

Os Motores a Diesel são amplamente adotados em atividades industriais e de transportes, no setor agrícola e na construção civil. Atualmente, têm sido amplamente empregados em grupos geradores para produção de eletricidade, seja por motivo de segurança ou economia de energia.

Os motores a diesel são originalmente projetados para a operação com o combustível derivado de petróleo. Por essa razão, nesse trabalho foi desenvolvido um estudo experimental com o objetivo de avaliar o desempenho de um grupo motor-gerador diesel, a partir dos parâmetros termodinâmicos e elétricos do gerador, baseados nas condições de geração de potência elétrica, eficiência térmica, consumo específico de combustível e emissões de poluentes do motor. Foram avaliados os resultados de desempenho do gerador abastecido com biodiesel puro de algodão e diferentes misturas de biodiesel e óleo diesel em diferentes proporções, comparadas aos do óleo diesel comercial, com 93% de diesel A e 7% de biodiesel, conforme atual legislação brasileira. Foram avaliadas as correlações entre as composições dos combustíveis e as condições de operação do gerador, trabalhando em regime permanente, e submetido às variações de cargas acopladas ao seu barramento elétrico.

1.1 OBJETIVO

Analisar a influência do biodiesel de algodão e das misturas de diferentes proporções de biodiesel/óleo diesel sobre o desempenho, em termos de eficiência térmica e consumo específico de combustível e, das emissões de poluentes gasosos do motor-gerador diesel.

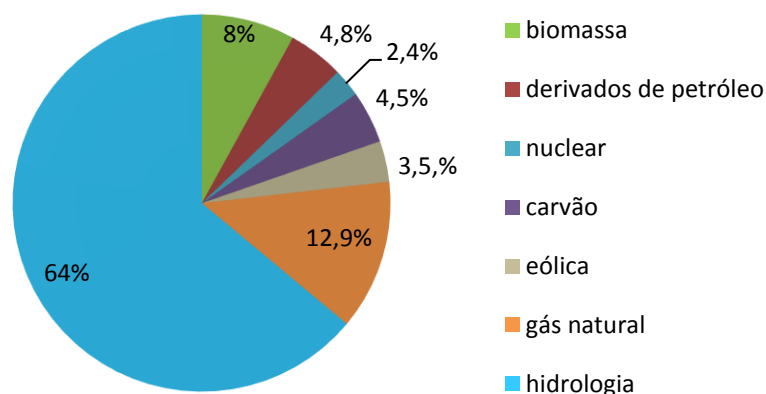
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir e aplicar metodologia experimental para teste de motor-gerador a ciclo diesel abastecido com biodiesel de algodão;
- Realizar o levantamento de propriedades físico-químicas como viscosidade, densidade e poder calorífico, dos combustíveis B100, B7 e demais combustíveis com diferentes percentuais de biodiesel, na composição das misturas com o óleo diesel;
- Compilar, analisar e correlacionar dados experimentais do motor-gerador.

1.3 JUSTIFICATIVA

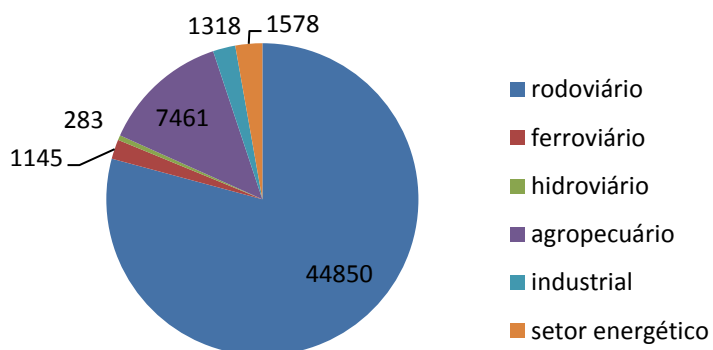
Atender à demanda de energia, devido ao crescimento populacional, conduzindo a uma melhora expressiva dos padrões de conforto e qualidade de vida é o resultado, em parte, de produtos adquiridos do setor industrial e dos serviços de transporte, saúde e geração de energia elétrica. Esses produtos, do planejamento à execução, indubitavelmente exigiram investimentos em inovação tecnológica e gasto de energia. Contudo, para que seja possível alcançar uma condição satisfatória em termos de desenvolvimento em qualquer dos setores sócio-econômico-ambientais, tem-se requerido, fundamentalmente, investimento na produção de energia.

No Brasil, a sua imensa extensão territorial e a sua diversificação em matérias-primas para fins de aproveitamento energético favorecem o atendimento da demanda de energia elétrica. O país utiliza-se, atualmente, de suas principais fontes de energia, que são em grande parte fontes de energias renováveis e mais limpas. No país, as hidrelétricas fornecem a maior parte, 64% da energia elétrica consumida, enquanto que a biomassa provê cerca de 8% da oferta de energia elétrica. Essas duas fontes são apresentadas, juntamente com as fontes de energia eólica, 3,5%, nuclear, 2,4%, derivados de petróleo, 4,8%, carvão, 4,5%, e gás natural, 12,9%, como indicado no gráfico da Figura 1, que representa a Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte (BEN, 2016).

FIGURA 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.

FONTE: BEN, 2016.

O óleo diesel de petróleo atende vários setores, tais como, industrial, agropecuário, transportes e setor energético, no qual são destacados os segmentos da exploração, produção e refino de petróleo. Uma parcela expressiva é direcionada ao abastecimento dos motores diesel, aplicados principalmente no atendimento dos setores industrial, agropecuário e dos transportes rodoviário, ferroviário e hidroviário. O consumo de óleo diesel referente aos setores mais significativos mencionados é apresentado no gráfico da Figura 2, como múltiplos de 10^3 m^3 de combustível, destacando o setor de transporte pelo maior consumo, com aproximadamente 77,7% de óleo diesel total consumido, BEN (2016).

FIGURA 2 – Consumo de combustível de óleo diesel.

FONTE: BEN, 2016.

Entretanto, as emissões gasosas do sistema de exaustão resultantes do processo de combustão do motor devem acatar as restrições impostas pelos órgãos ambientais e de saúde, como as estabelecidas pelo CONAMA (2011), CONAMA (2012) e IARC (2012), com o objetivo de não impactar o ambiente com os resíduos tóxicos da exaustão. E, esse é um dos motivos que impulsiona pesquisadores e fabricantes de motores a investigarem novas fontes de energia mais limpas e renováveis, em um esforço de substituir o óleo diesel.

As pesquisas com a utilização do biodiesel obtidos dos óleos das plantas oleaginosas produzidas no território nacional são de grande valor estratégico para o país. Nesse contexto, esse trabalho aborda o estudo da aplicação do biodiesel de algodão no motor diesel. O algodão, no Brasil, é a terceira matéria-prima mais importante para a produção do biodiesel, BEN (2016). A cultura do algodão tem enorme empregabilidade para a indústria têxtil. A utilização do óleo extraído da semente do algodão é empregada pela indústria alimentícia, a torta produzida após o esmagamento da semente e de seu beneficiamento é utilizada como ração animal. O óleo de algodão tem utilidade para fins de produção de energia, como óleo puro e quando transformado em biodiesel.

A possibilidade de fornecimento de óleo vegetal empregado pelas indústrias no Brasil na produção de biodiesel estabelece uma grande margem de competitividade entre diversos países, haja vista a posição de produtor e consumidor do país.

A grande extensão territorial brasileira, a tecnologia e inovação de melhoramento de sementes a serviço da diversidade de matéria-prima e o aproveitamento no setor energético fornecem meios para a obtenção das características de produção das culturas oleaginosas, como pode ser percebido na Tabela 1.

TABELA 1 – Principais características das oleaginosas para a produção de biodiesel.

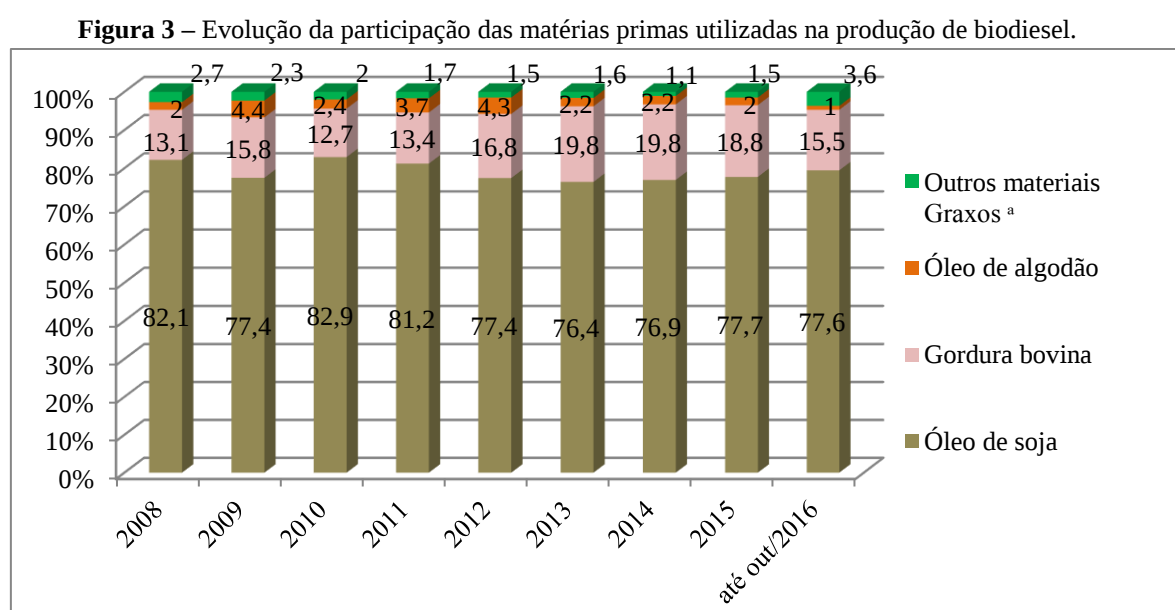
Matéria Prima	% óleo	Produção de grãos (kg) no ano de 2014	Produção potencial de Óleo (Kg)	% do óleo produzido em relação a demanda anual total de Biodiesel (B7)
Soja	18	86.120.000.000	15.501.600.000	370
Algodão	15	2.670.600.000	400.590.000	10
Girassol	42	232.700.000	97.734.000	2
Mamona	47	44.700.000	21.009.000	0,5
Canola	35	36.300.000	12.705.000	0,3

FONTE: Laviola (2015).

As principais plantas oleaginosas expressas são utilizadas como matérias-primas para produção de biodiesel, informando o percentual de óleo de cada cultura, e permite comparar o rendimento de cada oleaginosa e relacionar a quantidade de produção de grãos por área cultivada.

Apesar do óleo de soja ser o mais utilizado na produção de biodiesel, a tabela 1 indica que a soja está aquém no que diz respeito ao teor de óleo nos grãos, em comparação a outras culturas. Apesar do que se percebem, devido ao desenvolvimento da cadeia produtiva, tanto da soja quanto do algodão, em especial para soja, essas duas culturas têm assumido a posição de primeiro e terceiro colocados na produção de biodiesel no país.

O gráfico da Figura 3 apresenta a participação das matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel no país. Em 2016, no acumulado até agosto, a participação das três principais matérias-primas foi: 77,8% soja, 16,2% gordura bovina e 0,8% algodão (MME, 2016). Pode ser observado que a posição do óleo de algodão ocupa espaço relevante em relação à classificação ordenada, alcançada pelos outros materiais graxos.



^a Compostos por exemplo, de óleos residuais de fritura, outras plantas oleaginosas, rejeitos do processamento de frango e de peixe, lodo de esgoto etc.

FONTE: Adaptado da ANP MME - Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis Dezembro/2016.

Elaboração: adaptado de MME.

Governos de vários países intensificam suas estratégias econômicas, através da utilização de fontes energéticas renováveis em substituição aos combustíveis não renováveis, tais como o óleo diesel. Os países importadores de combustível derivado de

petróleo e os que não possuem esse recurso energético têm demonstrado interesse especial, com uma maior expectativa, como por exemplo, no uso de biocombustíveis. O Governo brasileiro, aproveitando a imensa disponibilidade de seus recursos energéticos naturais, a partir da biomassa, inseriu o biodiesel na matriz energética nacional, promovendo a produção e o uso desse combustível de forma sustentável, enfocando a inclusão social, o desenvolvimento regional via geração de emprego e renda, e estabelecendo outra forma de substituir o uso dos combustíveis fósseis, diminuindo a poluição que causa danos ao ambiente.

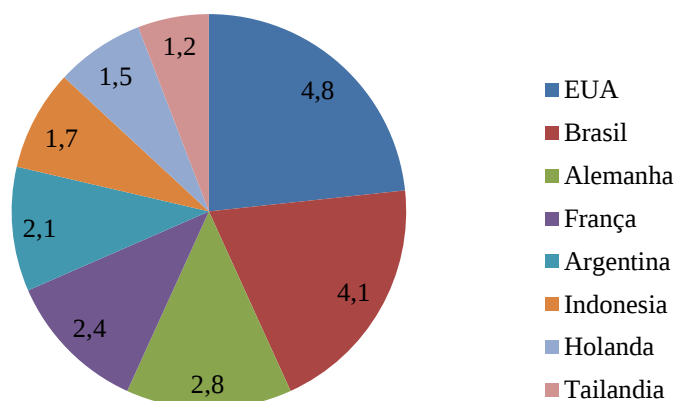
Nos períodos de estiagem prolongada, devido aos empecilhos com relação à redução do manancial hidráulico, utilizado como recurso de fonte de energia renovável, voltado para a produção de energia elétrica, os órgãos reguladores de energia devem acionar as Usinas Termoelétricas, UTEs, em caráter emergencial. Entretanto, as UTEs apresentam o inconveniente de utilizar o óleo diesel derivado de petróleo. Em 2014, cerca de 26 % da produção de energia elétrica foi proveniente de usinas termelétricas com uso de combustíveis não renováveis, empregados na produção de energia elétrica, forçando a importação de óleo diesel.

Nesse contexto de crise energética, somado ao fato do setor de transporte abarcar o maior percentual sobre o uso dos combustíveis derivados do petróleo e, devido à forte expansão da aplicação de grupos motor-gerador diesel na geração distribuída de energia elétrica, é de interesse que a participação do biodiesel seja ampliada na Matriz Energética Nacional como estratégia de desenvolvimento e inclusão social.

Além da redução da dependência externa pelo óleo diesel, com o biodiesel, o Brasil entrou em um novo ciclo do setor de energia e reforça a promoção da utilização do biodiesel nos grupos geradores de comunidades isoladas ou em áreas remotas, por exemplo, torna possível realizar o melhoramento dos fatores socioeconômicos que implicam em benefícios à qualidade de vida dessas comunidades.

O gráfico da Figura 4 apresenta uma relação de produção internacional de biodiesel, em que os Estados Unidos são os maiores produtores de biodiesel, em 2015, com 4,8 bilhões de litros de biodiesel.

FIGURA 4 – O Brasil assume a segunda posição na produção de biodiesel em 2015 - Bilhões de litros de combustível.



FONTE: REN 21 (2016).

O Brasil assumiu a segunda posição, com 4,1 bilhões de litros, representando 13,62% da produção a nível global, seguidos da Alemanha, com 2,8 bilhões de litros. Outros países apresentados em sequência são Indonésia, Argentina, França, Tailândia e Holanda. A soma da produção mundial de biodiesel em 2015 foi de 30,1 bilhões de litros, REN 21 (2016).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O nível de exigência sobre as restrições impostas na regulamentação das emissões de poluentes da exaustão resultantes dos processos de combustão tem sido elevado e passou a ser um tema dos mais pesquisados nos estudos sobre o motor diesel. Combustíveis de fontes de energia renováveis e mais limpos têm sido avaliados, com o intuito de substituírem os combustíveis de petróleo, que estão entre os maiores responsáveis pelas emissões de poluentes gasosos lançados na atmosfera. Nesse contexto, o biodiesel é apresentado como um grande aliado no combate contra os gases nocivos ao ambiente, além de proporcionar uma redução na dependência do óleo diesel, de acordo com Helton et al. (2014). O biodiesel é produzido através de um processo de transesterificação de óleos originados de plantas oleaginosas e gordura animal na presença de catalisadores produzindo glicerina e éster. Entretanto, embora o biodiesel proporcione de certa forma as vantagens ambientais requeridas, existem entraves correspondentes às suas propriedades físico-químicas, inerentes à estrutura molecular de cada matéria-prima. As características do biodiesel são semelhantes às do óleo diesel, porém propriedades como a viscosidade, densidade e número de cetano do biodiesel diferem com relação às do diesel convencional. Esse é um dos motivos que chama a atenção dos pesquisadores e fabricantes de motores em pesquisar os efeitos causados ao desempenho do motor, avaliando a sua resposta, quando abastecido com biodiesel, em termos de potência, eficiência térmica, consumo específico de combustível, além das emissões da exaustão.

Conforme a variação de matérias-primas é ampliada, aumentando a oferta de recursos que favorecem a produção de biodiesel, era esperado que o biodiesel inicialmente proposto para abastecer o tanque de combustível do motor diesel assumisse seu papel substituindo o óleo diesel, sem a necessidade de realizar qualquer tipo de modificação no motor diesel. Entretanto, alguns fabricantes de motores a diesel não asseguram o funcionamento do motor a contento com o uso de biodiesel puro. A literatura apresenta trabalhos experimentais onde são abordados os resultados das aplicações do biodiesel no motor diesel, envolvendo diferentes metodologias empregadas nas avaliações de comportamento dos motores com o uso do biodiesel.

Xue (2013) reportou sobre o biodiesel obtido de maneira mais usual pelo processo de transesterificação, que consiste numa reação química de triglicerídeos de ácidos graxos de cadeia longa extraídos de matérias-primas, tais como as plantas oleaginosas, gordura

animal e óleos residuais de fritura, com o etanol, ou, o metanol, na presença de um catalisador.

Murph et.al, e Orkun et al. (2014) reportaram que, embora as semelhanças entre o biodiesel e o óleo diesel existam, o biodiesel apresenta 11% de oxigênio na estrutura molecular e parâmetros físico-químicos, tais como viscosidade, densidade e poder calorífico, capazes de afetar a qualidade da combustão do motor.

Abuhabaya et al. (2013) realizaram uma análise experimental comparando o desempenho e as emissões de poluentes gasosos de um motor Diesel em estado estacionário, de 130 kW, de quatro cilindros, injeção direta, com turbo compressor alimentado com biodiesel de óleo vegetal puro de girassol, colza, resíduo de fritura e soja, e óleo diesel. Os ensaios apresentaram a diminuição da potência, relacionada ao baixo poder calorífico do biodiesel, e aumento do consumo específico de combustível, que pode ser atribuído ao torque menor, à densidade maior e ao poder calorífico menor do biodiesel, alcançando a mesma variação em toda a faixa de velocidade. Entretanto, a potência e o torque apresentaram valores muito próximos para o uso do óleo diesel e do biodiesel. Observou-se que a eficiência térmica foi melhor com o uso do biodiesel do que com o óleo diesel, que pode ser atribuído ao conteúdo de oxigênio da molécula do biodiesel e seu maior número de cetano. As emissões de poluentes com a operação em diferentes cargas, em uma velocidade de operação fixa, referidas ao biodiesel, indicaram uma redução das concentrações de hidrocarbonetos totais, CO e CO₂, comparados ao óleo diesel. Considerando o oxigênio da molécula de biodiesel e o maior número de cetano. Em carga completa, essas concentrações também se apresentaram menores que às do óleo diesel. O conteúdo maior de oxigênio com o uso do biodiesel quando combinado a alta temperatura com o nitrogênio, pode levar a um aumento de NO_x.

Sinha e Murugavelh (2016) analisaram o biodiesel de óleo de semente de algodão. Verificaram os aumentos de eficiência térmica com a utilização do biodiesel de algodão na carga máxima e do consumo específico de combustível em comparação ao óleo diesel. As emissões de CO e HC reduziram com a introdução do biodiesel, enquanto que as emissões de NO_x aumentaram.

Neha et al. (2013) estudaram a produção de biodiesel de girassol e algodão, e suas características de biodegradabilidade, menor toxicidade, e de ser oriundo de fonte de energia renovável adquirida da biomassa, com caráter sustentável.

De Paulo et al. (2016) avaliaram o desempenho e as emissões de um gerador a diesel, acoplado a um banco de resistores, com biodiesel puro a base de óleo de fritura (B100) e

misturas de biodiesel em óleo diesel comercial, que contém 5% de biodiesel, conforme as leis brasileiras.

Aydin e Bayindir (2010) avaliaram o desempenho e as emissões com o biodiesel de semente de algodão. Realizaram testes com motor diesel em condição de plena carga. Verificaram a redução do torque como a elevação da concentração de biodiesel nas misturas, atribuído ao menor poder calorífico e maior viscosidade do biodiesel. Entre todos os combustíveis, o B20, apresentou o menor consumo específico de combustível, que pode ser relacionado ao conteúdo de oxigênio na molécula de biodiesel e ao seu maior número de cetano. O aumento do biodiesel provocou a redução das emissões de CO e, nas concentrações de NOx com exceção do B5. Recomendaram o uso parcial do biodiesel de semente de algodão.

Chattopadhyay e Sen (2013) avaliaram o biodiesel de algodão. Observaram que o consumo específico de combustível, a eficiência térmica e a temperatura dos gases de exaustão do motor abastecido com as misturas B10 e B20 foram comparáveis àqueles do óleo diesel. Observaram a redução do CEC com o aumento na carga do motor operando à velocidade constante (1500 rpm), e à medida que a carga aumentou, a potência do motor também aumentou. Entretanto, verificaram que a taxa de incremento na potência do motor foi maior do que o combustível consumido, dessa maneira o CEC diminuiu à medida que a carga aumentou. Reportaram que o menor poder calorífico, assim como as maiores viscosidades e densidades podem ser responsáveis pelo menor aumento nos valores de CEC das misturas biodiesel-diesel. Compararam a variação da temperatura dos gases de escape, TGE, que indica o calor do combustível em um determinado período de combustão, com diferentes cargas do motor e misturas de combustível. Reportaram que a menor TGE de misturas de biodiesel poderia ser devido ao menor poder calorífico inferior, por apresentar a maior viscosidade, que proporcionou uma pobre atomização, e outra condição estaria relacionada a uma rápida queima do biodiesel, dentro do cilindro, devido ao seu maior conteúdo de oxigênio. Embora a TGE não tenha demonstrado maior sobrecarga térmica, foi necessário aumentar o consumo de combustível para manter a mesma potência de saída. Avaliaram que as emissões médias de CO, CO₂, HC não queimados e fumaça reduziram, consideravelmente. O oxigênio na molécula de biodiesel colaborou para a elevação das emissões de NOx, comparado ao óleo diesel. Concluíram o resultado como favorável ao uso das misturas B10 e B20 no motor diesel.

Sathiyagnanam et al. (2011) estudaram aplicação do biodiesel de algodão e suas misturas de 25%, 50%, 75% e 100% em óleo diesel, em um motor diesel naturalmente

aspirado, de injeção direta. O menor aumento de CE e de eficiência térmica foi observado para o biodiesel em comparação ao óleo diesel. O teor de oxigênio no biodiesel resultou em melhor combustão e aumento da temperatura da câmara de combustão, consequentemente conduziu às maiores emissões de NOx, nas altas cargas do motor. As diferenças nas emissões de HC dos combustíveis de biodiesel foram pequenas em relação ao combustível diesel. Observaram a redução significativa nas emissões de CO e fumaça nas operações em altas cargas do motor.

Valente et al. (2012) testaram biodiesel de óleo de cozinha usado e diferentes porcentagens de misturas de biodiesel/óleo diesel e óleo diesel, em um grupo gerador de 50 kW; estudaram as emissões gasosas considerando uma variação de concentração dos poluentes obtidos do sistema de exaustão relacionados às variações das cargas conectadas ao grupo gerador. Utilizaram para a bancada de teste o motor MWM D229/4, quatro cilindros em linha; quatro tempos; aspiração natural; injeção direta; velocidade constante. Utilizaram um banco de resistências elétricas de 50 kW representando a carga elétrica acoplada ao grupo gerador de quatro polos, com potência nominal trifásica de 55kW, 60 Hz e 220V. Verificaram que a concentração de CO₂ reduziu com o aumento da carga para todos os combustíveis, significando que o gerador operando com cargas menores que a nominal eleva a concentração do CO₂. O aumento da concentração do biodiesel na mistura do combustível colabora com o aumento do CO₂. Observaram que algum benefício acerca da concentração do CO₂ deve ser referido à cadeia de produção do biodiesel. Os valores das concentrações de CO se elevaram com o aumento da potência da carga e do percentual de biodiesel na mistura. A razão pode estar de acordo com a pobre atomização do combustível, devido ao aumento da viscosidade do biodiesel. A taxa de formação do CO aumenta com a injeção do combustível. Nesse caso, o sistema de injeção de combustível operou com deslocamento de volume constante e a quantidade de massa de biodiesel injetada foi maior em relação a que o motor necessitava operar em condições normais. As emissões dos hidrocarbonetos diminuíram com o aumento da carga e aumentaram com o aumento da concentração de biodiesel. O que pode ser devido à injeção de maior quantidade de massa de biodiesel, que em comparação ao óleo diesel apresenta maior densidade, juntamente com a viscosidade, que proporcionou um nível inferior da atomização do combustível, podendo ser a responsável pelo combustível não queimado. Os hidrocarbonetos resultam de uma combustão incompleta, podem ser afetados pelas propriedades do combustível, pelas condições de operação do motor e características do spray. O coeficiente de absorção é uma medida da opacidade do gás de

exaustão e um indicador da emissão de material particulado. Esse parâmetro pode sugerir modificações no sistema de injeção de combustível.

Martin et.al. (2012) utilizaram biodiesel de algodão produzido por transesterificação enzimática, misturas de B10 e B20, e compararam os resultados de desempenho do motor aos do óleo diesel, em termos de eficiência térmica, consumo específico de combustível e temperatura dos gases de exaustão. Observaram reduções das concentrações de monóxido e dióxido de carbono, fumaça e hidrocarbonetos, aumentando o biodiesel na mistura. Atribuíram ao oxigênio contido no biodiesel o aumento das concentrações de NOx. Avaliaram que apesar das matérias-primas apresentarem propriedades semelhantes favoráveis à transesterificação de diferentes matérias primas, ainda surgem divergências em termos de saturação e insaturação na comparação entre as moléculas, vinculadas aos perfis dos ácidos graxos. Abordaram que os óleos contendo ácidos graxos mais insaturados são melhores que os saturados em termos das propriedades do biodiesel produzido. Observaram que o algodão, por possuir maior quantidade de ácido oleico e linoleico, é a melhor opção para produzir biodiesel.

Mohammadi et al (2012) realizaram testes de desempenho de um motor turbo a diesel Motorazan, 82 hp, injeção direta, 4 cilindros, taxa de compressão 17,5:1, abastecido com óleo diesel e de uma mistura de 5% de biodiesel e 95% de óleo diesel, B5, com a introdução de catalisador de poliestireno expandido dissolvido. Observaram os resultados proporcionados pela variação da quantidade de catalisador introduzido nos testes. Verificou que a inclusão do catalisador na condição operação do motor com carga máxima aumenta a relação ar combustível, a emissão de fuligem, enquanto que, as emissões de NOx e o CO₂ são reduzidas. Observaram que a eficiência térmica aumentou e o consumo específico de combustível diminuiu como dependência do percentual de catalisador. Perceberam que, na adição do catalisador durante o funcionamento do motor em baixa velocidade, as concentrações de NOx, CO, CO₂ e a fuligem diminuiriam.

Altun (2014) verificou as condições de desempenho e as concentrações das emissões de escape nos testes com o biodiesel de óleo de palma, óleo de peixe de anchova residual e óleo de semente de algodão, em um motor gerador diesel de injeção direta à velocidade constante de 1500 rpm, sob condições de cargas variáveis. Investigou o efeito do grau de insaturação dos diferentes tipos de biodiesel quantificados pelo número de iodo. Os experimentos apresentaram maior consumo específico de combustível com o uso dos biodieseis para toda a faixa de potências das cargas e os valores de eficiência térmica foram semelhantes, comparados ao óleo diesel. Os resultados obtidos mostraram efeito

insignificante do grau de insaturação sobre o desempenho do motor. O biodiesel mais insaturado apresentou concentrações de NO_x mais elevadas e menor emissão de hidrocarbonetos. Verificaram que a redução das emissões de óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono, e opacidade dependeu da origem do biodiesel. O consumo de combustível aumentou, devido ao baixo conteúdo de energia do biodiesel puro, em comparação com o óleo diesel. O grau de insaturação dos biodieseis afetaram as emissões do motor, devido os efeitos sobre o índice de cetano e da temperatura adiabática de chama. O biodiesel com o número de iodo mais baixo apresentou o maior índice de cetano e a menor densidade e temperatura adiabática da chama, implicando na redução das emissões de NO_x.

Yu Ma et al. (2015) utilizaram biodiesel de soja, gordura animal e óleo de colza na avaliação das implicações da adição de um catalisador à base de picrato ferroso sobre as propriedades oxidativas de nanoestrutura de fuligem do biodiesel, a partir da sua combustão em um motor a diesel. Os resultados incidiram em menos precursores de fuligem na zona de combustão e, portanto, a menor fuligem primária e agregados. Foi observada uma fuligem de menor dimensão com a inclusão do catalisador comparada à fuligem obtida com o biodiesel. Porém, a nanoestrutura e a dimensão fractal permaneceram as mesmas, indicando que o mecanismo de formação da fuligem não foi alterado pela ação do catalisador. O catalisador de picrato ferroso acelera a oxidação de fuligem, e conduz a uma redução significativa nas emissões globais de fuligem de motores de combustão interna.

Anand et al. (2009) realizaram testes em um motor diesel, variando a taxa de compressão, com único cilindro, a uma velocidade constante de 1500 rpm, abastecido com quatro misturas de biodiesel de algodão e óleo diesel. Foi observada a redução das emissões de monóxido de carbono e de fumaça em toda taxa de compressão e carga. Avaliaram o comportamento do motor diesel para todas as misturas de combustível contendo 5%, 10%, 15% e 20% de biodiesel, respectivamente, e óleo diesel. Verificaram o aumento na eficiência térmica e a redução do consumo específico de combustível sob as condições de misturas contendo 5% de biodiesel com taxa de compressão de 15 e 17, e da mistura com 20% de biodiesel com taxa de compressão de 19. Observaram que o NO_x aumentou utilizando a mistura com 20% de biodiesel a uma taxa de compressão de 19, comparada ao diesel.

Fan et.al. (2008) estudaram o desempenho de um motor utilizando dois biodieseis, A e B, de óleo puro de algodão, diferindo na metodologia de preparação dos biodieseis de

algodão sob condições identificadas pelo percentual do catalisador NaOH com 1%, para o biodiesel A, e de NaOH com 1,5%, para o biodiesel B, ambos baseados no peso do óleo puro de algodão e sob condições de temperaturas diferentes. Verificaram a redução das emissões do CO, atribuída à presença de oxigênio na estrutura da molecular do biodiesel, que enriquece o processo da combustão. Perceberam a redução da emissão do CO₂ e NOx, comparadas ao diesel convencional e, uma elevação do consumo de combustível do biodiesel em relação ao óleo diesel.

Kumar, Maheswar e Reddy (2009) realizaram experimentos com biodiesel de algodão em um motor diesel 5,2 kW, único cilindro de 4 tempos, refrigerado a água, a 1500 rpm. A taxa de fluxo de combustível foi medida com base volumétrica. As experiências foram inicialmente realizadas no motor em todas as cargas que utilizam o óleo diesel como padrão. O desempenho de motor IC depende muito das propriedades do combustível, entre as quais a viscosidade, densidade, índice de cetano, a volatilidade, a lubricidade e poder calorífico. A viscosidade do óleo diesel e as diferentes misturas de biodiesel diminuem com o aumento da temperatura e vice-versa. Ao aumentar a temperatura do fluido, a atração molecular entre diferentes camadas do líquido diminui, assim, diminui a viscosidade. Notaram que o aumento da velocidade causa aumento da eficiência térmica. Aumenta a potência de saída e por sua vez aumenta a eficiência. A eficiência aumenta com o aumento do torque. O consumo específico de combustível diminui com o aumento do torque, diminui com o torque e volta a crescer. A queima incompleta produz maior quantidade de monóxido de carbono, CO, devido à escassez de ar ou pela temperatura mais baixa. A emissão do CO é elevada com uma relação ar combustível rica. Entretanto, no motor diesel a combustão ocorre em uma mistura pobre. A concentração de CO diminui e com a introdução de biodiesel é ainda menor, pela contribuição do oxigênio na molécula.

Nalgundwar, Paul e Sharma (2016) realizaram pesquisas de desempenho e emissões de poluentes de motor diesel, abastecido com biodiesel de Palma e Jatropha. Observaram que as concentrações de 20% e 40% de cada biodiesel nas misturas com 60% e 20% de óleo diesel, respectivamente, apresentaram resultados comparáveis ao óleo diesel convencional em relação à eficiência térmica. A introdução de 5% de cada biodiesel à mistura com 90% de diesel de petróleo apresentou as características de viscosidade e poder calorífico, mais próximos dos valores obtidos com o óleo diesel, e forneceu um aumento da potência de saída do motor em comparação ao óleo diesel.

Com base nessa revisão, conclui-se que o biodiesel apesar de ser atualmente uma realidade economicamente e ambientalmente viável como alternativa ao óleo diesel, possibilita motivar o incremento de novas pesquisas, sobre novos combustíveis. A motivação pode ocorrer, por exemplo, pelas observações sobre o CEC de determinadas misturas de biodiesel e óleo diesel, que indicaram comportamento similar ao do óleo diesel. A eficiência térmica, como função do CEC e do poder calorífico, apresentou-se bastante semelhante entre os combustíveis de biodiesel, demonstrando ser compatível, ou melhor, que a do óleo diesel. Ainda, a potência de saída tendendo a sofrer reduções, devido ao aumento da viscosidade e da densidade com o acréscimo de biodiesel na mistura, acarretando perda de energia na combustão. Alia-se aos parâmetros de desempenho, o fato do biodiesel possuir a característica de ser ambientalmente amigável, como apresentado na maioria dos resultados, onde ocorreram as reduções das concentrações das emissões de CO, CO₂ e do teor de fuligem, influenciados pelo acréscimo de oxigênio na combustão, ou pelo aumento desses parâmetros, devido ao aumento da viscosidade e da densidade do biodiesel na mistura. Embora as emissões de NO_x tenham aumentado, devido ao modo de operação e ao acréscimo do oxigênio contido no biodiesel, em comparação aos do óleo diesel convencional, em temperaturas elevadas, outros trabalhos abordam resultados de sua redução.

Percebe-se que os diferentes estudos encontrados na literatura mostram que o desempenho térmico e as emissões de poluentes gasosos são influenciados pelos diferentes tipos de motores e pelos modos de operação e pelas propriedades dos biodieseis de diferentes origens, ou por misturas de biodiesel e óleo diesel. Observa-se que a viscosidade e a densidade do biodiesel são maiores que as do óleo diesel, implicando em pobre atomização do combustível, afetando o processo de combustão, elevando o CEC e o nível de emissões de poluentes. Outro fator importante é o menor poder calorífico associado ao biodiesel comparado ao do óleo diesel, refletindo no aumento do CEC.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental abrange o conjunto de ações desenvolvidas nos ensaios do grupo motor-gerador diesel, utilizado como bancada de testes de motor a diesel, abastecido com biodiesel de algodão e misturas de biodiesel e óleo diesel em diferentes proporções. O óleo diesel adquirido em posto de combustível comercial foi admitido como combustível de referência. Não foram incluídas adaptações ou modificações no motor. As propriedades físico-químicas dos combustíveis foram obtidas a partir das amostras de combustível retiradas do tanque de combustível e, em seguida, encaminhadas ao Labtermo - Laboratório de Termodinâmica - DEMEC – UFPE, onde através da utilização de um calorímetro foi obtido o parâmetro de poder calorífico das amostras dos combustíveis que abasteceram o grupo motor gerador, em cada um dos testes. Os parâmetros de viscosidade cinemática e densidade dos combustíveis foram obtidos no Laboratório de Processos Catalíticos - DEQ - UFPE. Os testes com o grupo motor-gerador Diesel foram realizados no Laboratório de Cogeração - DEMEC – UFPE.

A instrumentação aplicada nas medições foi instalada para obtenção dos parâmetros termodinâmicos de temperatura, velocidade, volume, com o interesse de auxiliar a aquisição das informações sobre as grandezas de vazões mássicas de ar, combustível e gases de exaustão, dos sistemas de admissão de ar, escapamento de gases e arrefecimento, e do bloco do motor. Os procedimentos incluíram os dados dos parâmetros elétricos de tensão, corrente, frequência e potência elétrica, de acordo com as variações das cargas elétricas acopladas ao gerador. A coleta de dados foi realizada conforme as especificações e orientações de normas técnicas e recomendações dos fabricantes de cada instrumento. As medições tiveram início após o gerador assumir o modo de operação em regime permanente, observado pelo monitoramento da curva da temperatura dos gases de exaustão, no instante em que foi alcançado o valor constante da temperatura. Cada teste foi precedido com um período de quinze minutos com o motor em funcionamento sem carga, de maneira que o novo combustível avaliado não estabelecesse contato com os resíduos do combustível do teste anterior e, desse modo, não permitindo causar influência nos dados coletados em um novo ensaio. Um intervalo de tempo total de uma hora foi estipulado para a realização dos testes, de acordo com as medições dos parâmetros coerentes aos efeitos de cada combustível sob as condições de variação de carga. As ações de aquisição de dados consideraram a instalação de termopares nos vários pontos de medição do grupo gerador em conexão com um sistema de aquisição de dados, SAD

(datataker). O SAD utiliza-se de um programa próprio e foi empregado no registro das médias das temperaturas, coletadas em intervalos de dez segundos, assim como na transferência dos dados coletados para um microcomputador. As cargas elétricas compostas por um conjunto de resistências elétricas e lâmpadas incandescentes acopladas aos terminais do gerador simularam as condições de variação das cargas em degraus de 25% da potência nominal, em conformidade com a operação do gerador sem carga, 0 kW, com elevações de 3,5 kW , 7kW e 10,5 kW até a plena carga, 14 kW. Os componentes gasosos resultantes do processo de combustão foram coletados no sistema de exaustão, por um analisador dos gases de combustão, que utiliza um programa próprio e mantém comunicação com o microcomputador para realização de estatísticas. Através da sonda desse instrumento os gases de exaustão foram bombeados e identificados pelos sensores capazes de fornecerem informações sobre as concentrações de oxigênio, O₂, monóxido de carbono, CO, dióxido de carbono, CO₂, óxido nitroso, NO_x. Nesse contexto, o teor de fuligem foi avaliado através da aplicação do método de índice de fuligem de Bacharach (IT-ATM-08.2).

3.1 PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS

As amostras dos combustíveis foram retiradas do tanque de combustível antes de dar início aos testes, e encaminhadas para o levantamento dos parâmetros físico-químicos de viscosidade, densidade e poder calorífico. Os procedimentos para a obtenção dos parâmetros dos combustíveis mencionados são descritos a seguir:

a) Obtenção da massa do combustível

Uma balança analítica de precisão, apresentada na Figura 5, foi utilizada na obtenção da massa de combustível condizente à medição de energia contida no combustível. As amostras dos combustíveis extraídas do tanque de combustível, antes de cada ensaio, foram pesadas na balança, que opera com quatro casas decimais, inclui a função de evitar a contaminação da amostra e garante, através de um indicador de nível, a precisão da balança durante o processo de nivelamento. As demais características da balança de precisão são fornecidas na Tabela 3.1.

FIGURA 5 – Balança analítica, OHAUS – AR 2140

FONTE: O autor

TABELA 2 – Especificações técnicas da balança analítica OHAUS – AR 2140.

MODELO AR 2140	
Capacidade (g)	210
Resolução (mg)	0,1
Incremento(g)	0,001
Repetibilidade - (desvio padrão) (mg)	0,1
Calibração	Automática
Linearidade (mg)	+/-0,03
Tara	Capacidade total por subtração
Tempo de estabilização	4 segundos

FONTE: Adaptado do manual do fabricante.

b) Obtenção do poder calorífico

Um calorímetro IKA C-2000, apresentado na Figura 6, foi utilizado para obtenção do poder calorífico das amostras de combustíveis. O calorímetro operou com a temperatura de um banho térmico a 25°C no modo dinâmico de trabalho e resolução de temperatura de 0,0001K, e foi aplicado na obtenção do parâmetro do poder calorífico dos combustíveis biodiesel puro e misturas biodiesel/óleo diesel e óleo diesel comercial, determinado segundo normas técnicas, e pelo manual de operações do calorímetro. Para o cálculo foram preparadas as amostras com

massa aproximada de 1g, em balança analítica. Esse instrumento atende às normas ASTM D240-87, ASTM D1989-91, DIN 51900 e, ao manual de operações do calorímetro.

FIGURA 6 – Calorímetro C – 2000 – IKA.



FONTE: O autor

As amostras de combustível foram introduzidas em um vaso de decomposição, denominado bomba calorimétrica, como apresentado na Figura 7. O sensor de temperatura mediu a diferença de temperatura, resultante do processo de troca de calor entre o vaso de decomposição e a água que envolve totalmente a bomba, dentro do compartimento hermético.

FIGURA 7 – Bomba calorimétrica – Vaso de decomposição



FONTE: O autor.

A combustão da amostra ocorre no interior da bomba calorimétrica, através de um sistema de ignição, sob uma atmosfera de oxigênio com elevado grau de pureza, à pressão de 30 bar, garantindo a combustão completa da amostra.

As propriedades de poder calorífico superior, viscosidade cinemática e densidade nas amostras de biodiesel puro de algodão, misturas de biodiesel/diesel e óleo diesel comercial foram determinadas de acordo com as normas técnicas apresentadas na Tabela 3, considerando a avaliação dos resultados em triplicata.

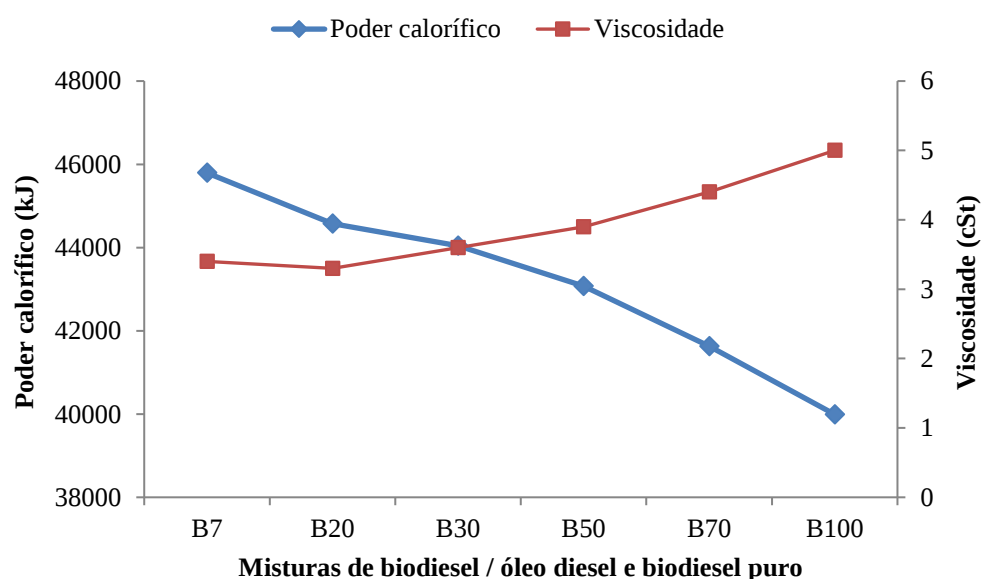
TABELA 3 – Levantamento das médias das propriedades físico-químicas dos combustíveis.

Propriedades dos Combustíveis	B7	B20	B30	B50	B70	B100
Poder calorífico superior, kJ (DIN 51900, ISO 1928, ASTM D240-87)	45794,5	44572	44045,6	43077,5	41627,5	39991,5
Massa específica a 20°C Kg/dm ³ (NBR 7148)	0,8340	0,8400	0,8480	0,8569	0,8689	0,8838
Viscosidade cinemática a 40°C, mm ² /s (cSt) (NBR 10441)	3,4	3,3	3,6	3,9	4,4	5,0

FONTE: O autor

O gráfico da Figura 8 apresenta uma relação de aumento da viscosidade dos combustíveis avaliados nos testes, com o aumento da concentração do biodiesel. Ao passo que, a da concentração do biodiesel acrescida na mistura de biodiesel/óleo diesel estabeleceu um decréscimo do poder calorífico obtido das amostras de combustível.

FIGURA 8 – Relação de viscosidade e poder calorífico das misturas de biodiesel/óleo diesel.



FONTE: O autor.

3.2 BANCADA DE TESTES COM GRUPO MOTOR-GERADOR DIESEL

O grupo motor-gerador a ciclo diesel 14kW adquirido da Leon Heimer, apresentado na Figura 9, foi utilizado nos ensaios de avaliação de desempenho de motor diesel abastecido com biodiesel de algodão e misturas de biodiesel /óleo diesel. O grupo motor-gerador assumido como bancada de testes de motor a diesel, é composto de um motor HYUNDAI D4BB-AG31, sem modificações com potência nominal 20,6 KW, 4 cilindros, injeção direta, refrigeração a água, aspiração natural e taxa de compressão 22:1, acoplado a um alternador Diamond com ímã permanente, 4 polos, fator de potência de 0,8, 60 Hz, 220V/380V, 22A, 1800 R.P.M., trifásico.

FIGURA 9 – Bancada de testes - Grupo motor – gerador Hyundai D4BB-AG31.



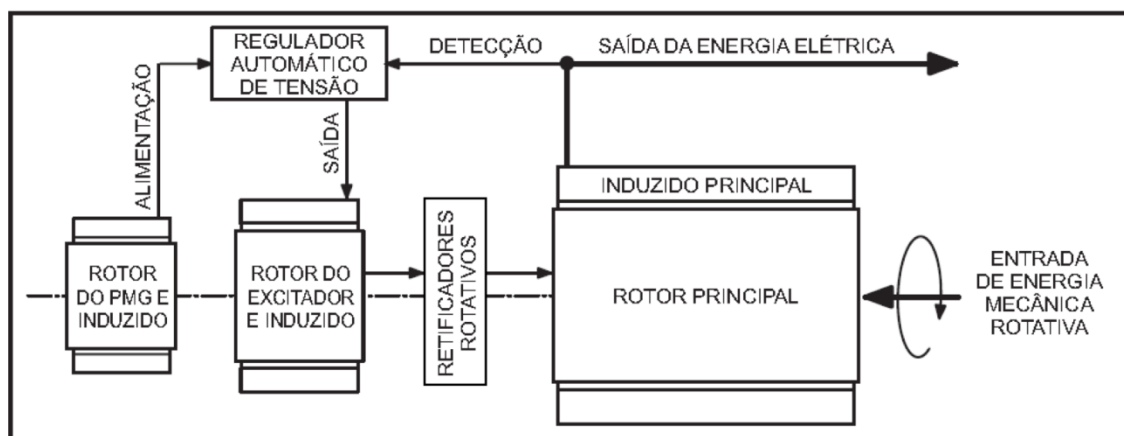
FONTE: O autor

Esse equipamento foi convenientemente instalado sobre uma base nivelada, com amortecedores tipo vibra-stop coxim, tornando mínimo qualquer tipo de influência de vibração na partida e na parada do motor, assim como na operação do alternador, quando submetido às ocorrências de entrada e saída das cargas elétricas acopladas ao barramento elétrico. Possui um tanque de combustível, painel de medição das grandezas de corrente, tensão e frequência elétricas e painel de sinalização dos sensores que abordam o estado

dos parâmetros termodinâmicos de pressão e temperatura envolvidos no sistema com a indicação do seu bom funcionamento.

O esquema do circuito formado pelo grupo motor-gerador, apresentado na Figura 10, compreende o motor Diesel, gerador síncrono, sistema de proteção, unidade de controle do regulador de tensão do grupo gerador e o barramento elétrico (rede elétrica) ao qual foram acopladas as cargas elétricas para realização dos ensaios do grupo gerador.

FIGURA 10 – Esquema do motor - gerador.

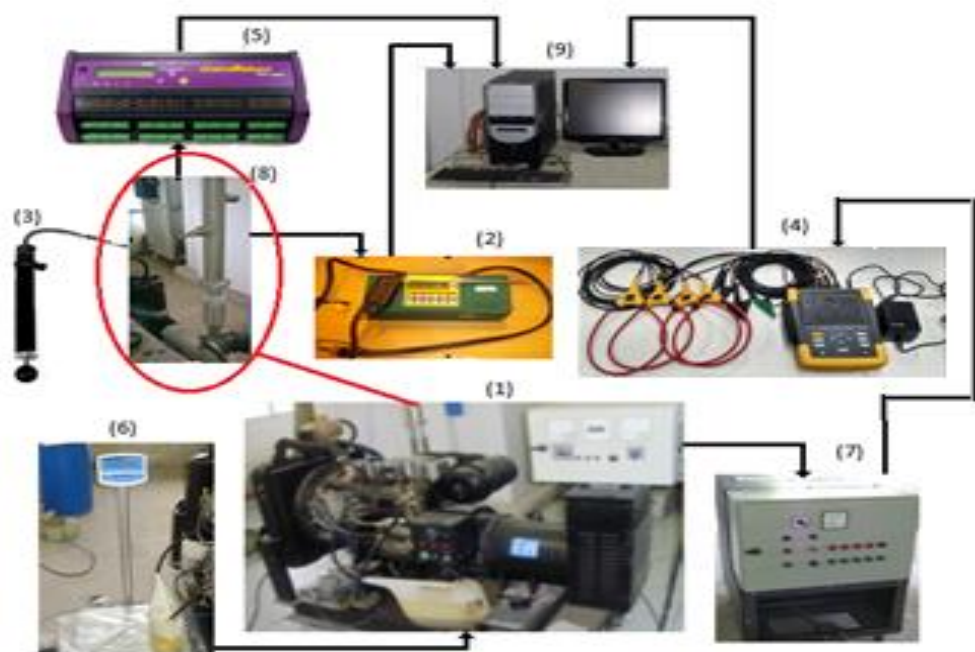


FONTE: Adaptado de Pereira, J. C. (2016).

3.3 INSTRUMENTAÇÃO APLICADA NAS MEDIÇÕES DOS DADOS

A aplicação da instrumentação instalada nos pontos de medição dos sistemas pré-estabelecidos na bancada de testes atribuiu qualidade e segurança nos procedimentos de aquisição dos parâmetros termodinâmicos e elétricos do gerador e, a calibração dos instrumentos, antecedida à realização dos ensaios, conferiu maior confiabilidade aos dados coletados. As obtenções das grandezas relevantes foram conduzidas de acordo com o especificado nas normas técnicas e com respeito às indicações nos manuais dos fabricantes. A bancada de testes com a instrumentação utilizada no monitoramento do motor-gerador é exibida na Figura 11.

FIGURA 11 – Esquema da bancada de teste instrumentada



FONTE: O autor.

As instrumentações utilizadas nas medições durante a operação do gerador com as breves referências de aplicação são apresentadas a seguir:

1. Grupo motor-gerador diesel
2. Analisador de gases da combustão – medição da concentração das emissões da exaustão
3. Medidor de índice de fuligem– medição do teor de fuligem da queima do combustível;
4. Analisador de energia elétrica – medição da potência elétrica fornecida às cargas elétricas;
5. Sistema de aquisição de dados – registro das temperaturas dos termopares tipos T e K;
6. Balança eletrônica – medição do consumo específico de combustível;
7. Banco de resistores elétricos – simulação de cargas acopladas ao motor-gerador;
8. Analisador de energia elétrica – medição da potência elétrica fornecida às cargas elétricas;
9. Microcomputador – registro dos dados e produção de estatísticas.

3.3.1 Termopares

A medição dos valores de temperatura foi precedida pelo processo de calibração dos termopares tipos T e K, antes da instalação dos sensores de temperatura nos pontos de observação do motor. Foi utilizado um forno de calibração BAT, do ECIL, indicado na Figura 12, operando nas faixas de temperatura de -50°C a 1200 °C, que apresenta uma fonte de calor homogênea e estável, e um bloco equalizador, que admite os termopares investigados e um termômetro padrão próprio do forno, conduzidos à calibração por efeito de comparação.

FIGURA 12 – Forno eletrônico de calibração dos Termopares.



FONTE: O autor

As medições de temperatura implicaram na produção de curvas de calibração para os devidos ajustes das temperaturas dos termopares.

As especificações do forno de calibração são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Forno BAT - Calibrador de sensores de Temperatura.

Especificações técnicas	Bloco de baixa temperatura	Bloco de alta temperatura
Faixa	50 °C abaixo da temperatura ambiente a 140 °C	150 °C abaixo da temperatura ambiente a 1200 °C
Resolução do controlador	0,1°C	1°C
Estabilidade absoluta	±0,01°C (Container líquido), ±0,02°C (bloco seco)	±0,15°C
Uniformidade de temperatura	±0,01°C (Container líquido), ±0,02°C (bloco seco)	-

FONTE: O autor

Os termopares do tipo T, cobre-constantan, faixa de aplicação de -160°C a 400°C, exatidão típica de ±0.5 a 2.0°C ou ±0.4% da leitura acima de 0°C, instalados na bancada de testes, realizaram as medições de temperatura do ar do sistema de ar de admissão, da

água de circulação e do ar de entrada e saída do radiador do sistema de arrefecimento, e da temperatura do ambiente. Outro termopar do tipo K, cromel-alumel, faixa de aplicação 0°C a 1370°C e exatidão típica de $\pm 1,0$ a 4.3°C ou $\pm 0,4\%$ da leitura acima de 0°C, foi instalado no duto de saída do escapamento do motor, aplicado na medição da temperatura dos gases de exaustão.

Os termopares do tipo T e K e os pontos de medição com as instalações no motor são apresentados a seguir:

a) Termopar tipo T - Sistema de ar de combustão

A temperatura do ar de combustão foi obtida com o termopar tipo T, utilizado na entrada de admissão de ar do sistema de combustão, como apresentado na Figura 13. A fixação do termopar aproveitou a própria instalação do ponto de entrada de ar de admissão do motor.

FIGURA 13 – Instalação do termopar tipo T- entrada de ar do sistema de combustão.



FONTE: O autor.

b) Termopar tipo K - Sistema de Exaustão

Um termopar do tipo K de vareta, mostrado na Figura 14, foi utilizado na medição dos dados de temperatura dos gases de exaustão do motor. Para que pudesse ser introduzido na tubulação por onde escoava o fluxo dos gases e coletar os dados de temperatura, foi realizada uma abertura na tubulação próxima à saída do escapamento dos gases, onde o mesmo foi fixado.

Figura 14 – Temperatura dos gases de exaustão.



FONTE: O autor.

3.3.2 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados (SAD), DATA TAKER DT85, apresentado na Figura 15, é responsável pelos registros e cálculos das médias dos valores de temperatura em intervalos de 10 segundos, durante o período total de ensaio de 30 minutos. Durante esse período, o gerador abastecido com uma determinada concentração de biodiesel (B20, B30, B50, B70, B100) e diesel comercial fornece energia elétrica, assumindo as variações das cargas elétricas, iniciando com a operação em vazio, 0% da potência nominal, cargas intermediárias de 25%, 50%, e cargas mais elevadas de 75% e 100% da potência nominal correspondendo a 0 kW, 3,5 kW, 7 kW, 10,5 kW e 14 kW, respectivamente. Os valores referentes à temperatura em cada um dos pontos de medição, desde a partida do motor até assumir a condição de regime permanente, são registrados através de um programa do instrumento e disponibilizados para realizar estatísticas.

FIGURA 15 – Conexão dos termopares ao DATA TAKER DT85.



FONTE: O autor.

3.3.3 Anemômetro de fio quente

O anemômetro de fio quente, apresentado na figura 16, é utilizado na medição da velocidade do ar aspirado no sistema de ar de admissão do motor. As especificações do anemômetro de fio quente VT-50 – KIMO indicam uma faixa de medição de velocidade do ar entre 0 a 30m/s, com uma resolução de 0,1 m/s, e da temperatura de 0°C a 50°C. A determinação da vazão mássica de ar introduzida no motor foi obtida, nesse procedimento, com base nas orientações do fabricante e no princípio de medição do instrumento, em que a velocidade do ar, a direção e a homogeneidade do fluxo de ar foram verificadas, sem interrupções.

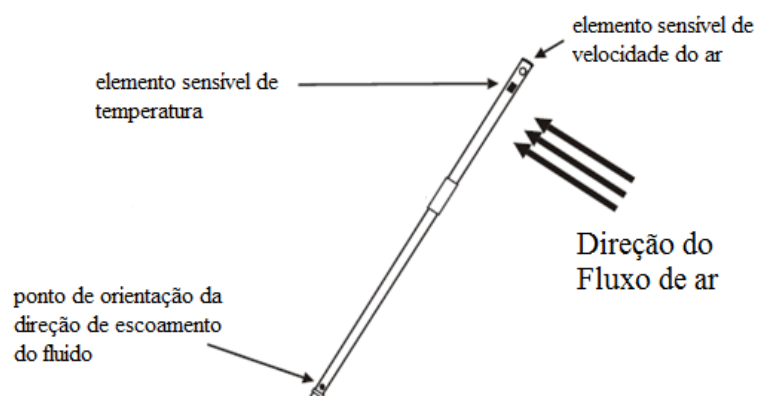
FIGURA 16 – Anemômetro de fio quente VT.



FONTE: O autor

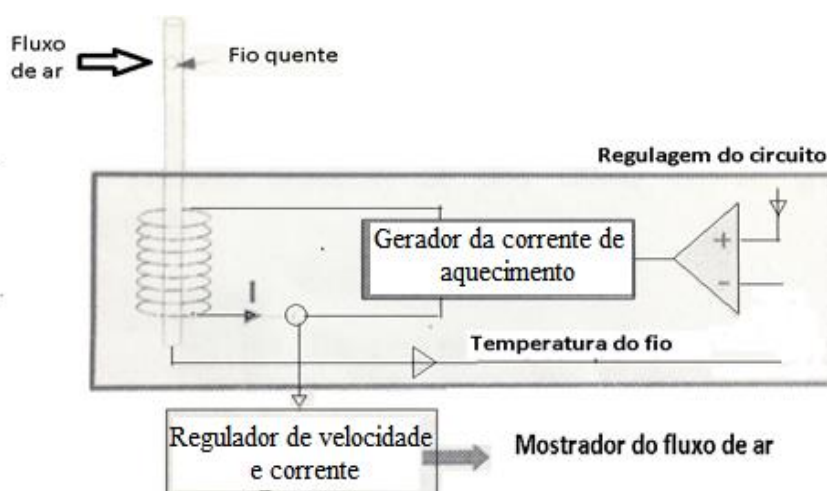
A temperatura do sensor resistivo do anemômetro varia em contato com o fluxo de ar, de maneira que o instrumento registra a alteração nos valores das resistências com a mudança da temperatura. O instrumento gera um sinal convertido em diferença de potencial ao passar pelo circuito. A Figura 17 apresenta o esquema do posicionamento correto da haste do anemômetro de fio quente. No instrumento, o processo ocorre através do calor trocado por convecção entre o fluido e o sensor de temperatura PT100, que apresenta uma resistência de coeficiente de temperatura positivo, e varia de maneira que, quanto maior o valor da temperatura, maior se torna o valor da resistência. O esquema do circuito eletrônico do instrumento é apresentado na Figura 18.

FIGURA 17 – Esquema do posicionamento da haste do Anemômetro de fio quente VT 50.



FONTE: Adaptado do manual do fabricante.

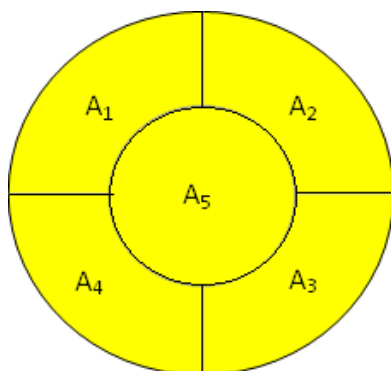
FIGURA 18 – Esquema do circuito eletrônico do anemômetro VT 50.



FONTE: Adaptado do manual do fabricante.

O esquema da Figura 19 representa a entrada do sistema de admissão dividido em cinco áreas iguais que devem receber a haste do Anemômetro. O somatório das médias de velocidade do ar foi adquirido ao final do ensaio realizado no período total de 30 minutos. De modo que a cada 5 minutos a haste do anemômetro foi inserida no sistema de admissão para medir a velocidade do fluxo do ar e através do software próprio do anemômetro foi realizado o cálculo da média dos valores de velocidade do ar registrados no intervalo de dez segundos.

Figura 19 – Esquema Método de varredura com divisão em 5 áreas.



FONTE: O autor.

3.3.4 Balança eletrônica

A medição do consumo de combustível foi realizada com uma balança eletrônica de precisão, apresentada na Figura 20, modelo 2098 – TOLEDO, com capacidade de pesagem de até 120 kg, com uma resolução de 20 g. Conforme a portaria 236/94 do Inmetro, atende à classe de exatidão III, em que a massa de combustível consumida é medida sob as condições de variação das concentrações do biodiesel nas misturas, e das cargas aplicadas ao gerador, durante o período dos testes.

O consumo específico de B100 e das misturas de combustível foi medido e comparado ao do óleo diesel. As medições do consumo foram baseadas na operação do grupo gerador diesel sem carga (operação em vazio), e sobre diferentes valores de cargas, até a plena carga, com os registros dos tempos inicial e final do ensaio e os pesos inicial e final de combustível. O consumo específico de combustível foi determinado dividindo a vazão de combustível (g/h) que alimenta o motor pela potência (kW) dissipada em um conjunto de cargas resistivas compostas por um banco de resistências e um grupo de lâmpadas incandescentes.

Os dados obtidos das leituras a partir do painel da balança em intervalos de cinco minutos foram registrados dentro de um período total de 30 minutos, para cada ensaio.

Figura 20 – Balança eletrônica de precisão modelo 2098 – TOLEDO.



FONTE: O autor

3.3.5 Analisador de gases – Sistema de exaustão

As concentrações dos componentes gasosos de oxigênio, O_2 , monóxido de carbono, CO, dióxido de carbono, CO_2 , óxido nítrico, NO, dióxido nitroso, NO_2 , (NO+ NO_2) componentes principais de formação dos óxidos de nitrogênio, NO_x , foram coletadas pelo analisador de gases, TEMPEST 100, apresentado na Figura 21. As concentrações foram registradas pelo programa próprio do instrumento e os dados enviados a um computador para efetuar estatísticas.

Os experimentos analisaram as concentrações dos gases de exaustão do B100, e das misturas de biodiesel/diesel sob condições de variações de cargas e foram comparadas às do óleo diesel comercial. O instrumento apresenta um termopar do tipo k com resolução de $1^\circ C$ e precisão $\pm 0.3\%$, a temperatura de operação da sonda é de $800^\circ C$.

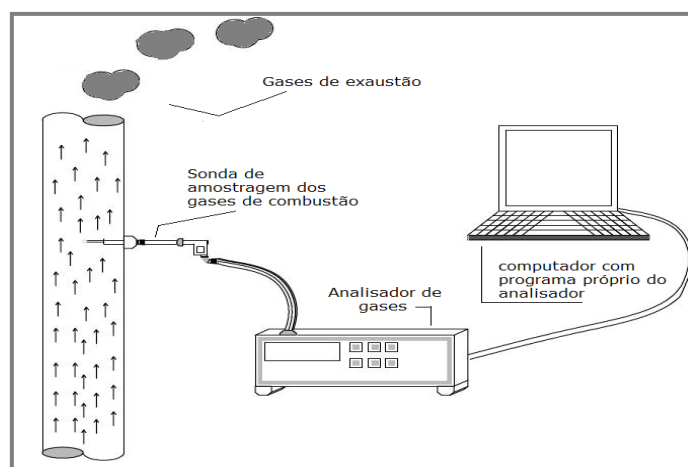
FIGURA 21 – Analisador de gases, Tempest 100.



FONTE: O autor.

O esquema da Figura 22 apresenta o procedimento de operação com o analisador de gases.

FIGURA 22 – Esquema de medição dos gases.



FONTE: O autor.

A sonda do equipamento é introduzida no sistema de escapamento dos gases de combustão do motor. Os gases de exaustão foram succionados pela sonda do instrumento, para cada ensaio realizado. Quatro medições foram coletadas a cada intervalo de 5 minutos.

A Tabela 5 fornece as especificações do Tempest 100, conforme informações cedidas pelo fabricante.

TABELA 5 - Especificações do Tempest 100.

Parâmetros medidos	Intervalo	Resolução	Precisão
Oxigênio	0 – 25%	0,1%	±0,2%
Monóxido de carbono	0 – 10.000 ppm	1 ppm	<100 ppm: ± 5ppm >100 ppm: ± 5%fsd
Oxido de nitrogênio	0 – 10.000 ppm	1 ppm	<100 ppm: ± 5ppm >100 ppm: ± 5%fsd
Dióxido de carbono	0 – 25%	0,1%	

FONTE: O autor

3.3.6 Bomba de medição de fuligem – Sistema de exaustão

Esse método permite avaliar a qualidade da atomização, acúmulo de fuligem, estando direcionado ao controle da combustão. É aplicado à medição de fuligem, baseado em normas internacionais, sob uma temperatura máxima de operação e inclui a escala de comparação.

Suas principais características são:

- Padrões aplicáveis: DIN 51402- ASTM 2156;
- Temperatura máxima de operação: 350°C;
- Escala de comparação: 10 manchas de opacidades (padrão DIN 4787).

A Bomba de fuligem (*Smoke test*) é apresentada na figura 23.

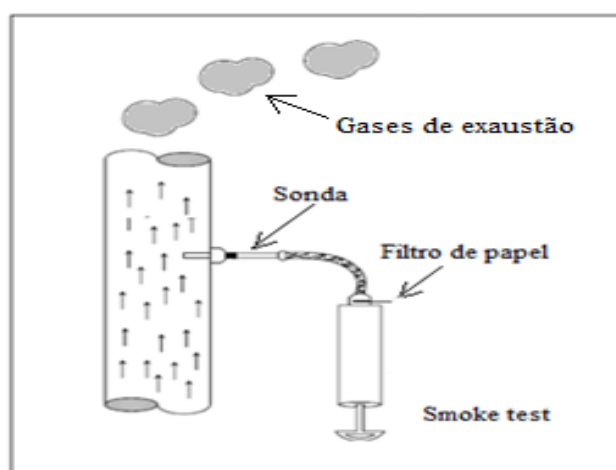
FIGURA 23 – Bomba de fuligem.



FONTE: O autor.

O índice de fuligem (índice de Bacharach) é um método aplicado na avaliação da qualidade da queima do combustível, baseado na comparação das amostras de gases retidos em um papel filtro com uma escala padrão. O equipamento de medição de fuligem, *Smoke test*, foi empregado na medição do teor de fuligem, estabelecendo a amostragem dos gases de exaustão da corrente de gases de combustão do motor, como apresentado no esquema da Figura 24.

FIGURA 24 – Esquema de medição de fuligem (opacidade)

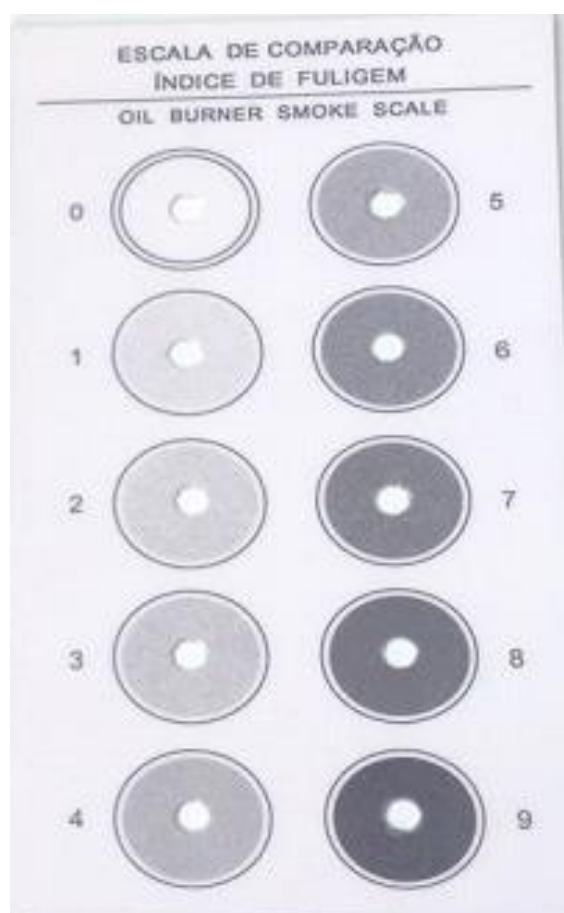


FONTE: O autor.

A sonda de amostragem que integra o equipamento foi introduzida na tubulação do sistema de exaustão do motor. Em seguida, inicia-se o procedimento de bombeamento

com a bomba de sucção manual conectada à sonda, forçando os gases emitidos com as amostras de fuligem, a atravessarem o papel filtro, fixado na extremidade da bomba. O papel filtro no qual se depositará o material particulado, retém as amostras de fuligem, permitindo a comparação dos níveis de enegrecimento com o padrão relacionado à condição de operação do motor. A mancha que aparece no papel filtro é comparada com a marca da escala de fuligem (índice de fuligem de 0 a 9), apresentada na Figura 25, que possui 10 manchas de opacidade, indo do branco (excesso de ar) ao negro (falta de ar). As manchas, por sua vez, indicaram o nível do teor de fuligem. Foram considerados adequados os níveis que não ultrapassaram o número 4 da escala de fuligem, e inadequados os que estiveram acima desse valor.

FIGURA 25 – Escala de e as amostras com papel filtro com as respectivas potências das cargas



FONTE: Adaptado da Confor Instrumentos de medição Ltda.

A Tabela 6 fornece a interpretação sobre os valores apresentados na escala de opacidade.

Tabela 6 – Interpretação da escala de comparação de fuligem.

	Significado	Comentários
0	Máximo	Excesso de ar
1	Excelente	Deve ser mantido
2	Bom	Pouca emissão de particulado/
3	Regular	Pouca fuligem, mas pode melhorar
4	Ruim	Condição de máxima operação, já entra no campo visual
5	Insatisfatório	Procure melhorar
6	Insatisfatório	Pode cair na densidade 20% da escala Ringelmann
7	Insatisfatório	Admite-se até 3 minutos para câmaras frias
8	Insatisfatório	Desligue o queimador
9	Insatisfatório	Desligue o queimador e recomece novamente

FONTE: O autor

3.3.7 Analisador de energia

Um analisador de energia elétrica modelo 434 II, FLUKE, apresentado na Figura 26, foi utilizado na medição da energia produzida pelo gerador, operando na produção de eletricidade para suprir a demanda de um conjunto de cargas elétricas resistivas. A medição de energia elétrica registrou os parâmetros elétricos de tensão, corrente, frequência e potência elétrica no barramento do gerador. As cargas foram escolhidas por conferirem maior precisão aos valores medidos dos parâmetros elétricos. Os dados coletados pelo analisador de energia, programado para registrar a variação dos parâmetros de energia em intervalos de tempo de 5 segundos, foram tratados pelo software próprio que acompanha o equipamento.

FIGURA 26 – Analisador de energia elétrica FLUKE - modelo 434 II.

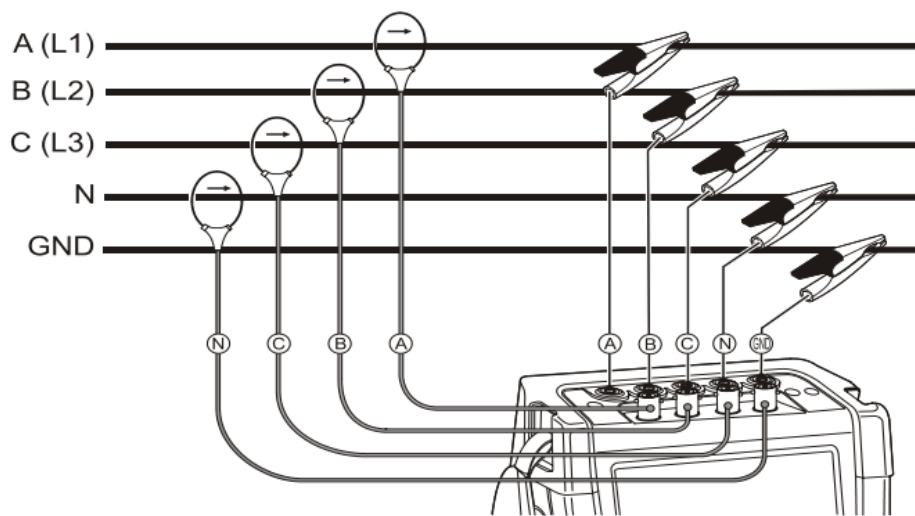
FONTE: O autor

A configuração do analisador de energia corresponde às características do sistema em teste e aos acessórios utilizados. Os seguintes aspectos foram abordados:

- Frequência nominal;
- Tensão nominal;
- Monitor de qualidade da energia e detecção de eventos;
- Propriedades de cabos de tensão e pinças de corrente.

A Figura 27 apresenta o esquema da conexão com as pinças de corrente ao redor dos condutores da fase A (L1), B (L2), C (L3) e N (neutro). As pinças estão marcadas com uma seta que indica a polaridade de sinal correta, com relação à condição de conversão.

FIGURA 27 – Esquema de conexão do analisador de energia à rede trifásica.



FONTE: Adaptado do manual do fabricante.

O medidor de energia elétrica foi utilizado na medição e registro das grandezas elétricas de tensão, corrente, potência e frequência elétrica, tanto individual em cada fase como o valor total, no terminal de saída do gerador. As características de entrada e do sistema de amostragem são apresentadas na Tabela 7.

TABELA 7 – Características de entrada e do sistema de amostragem – FLUKE 434-II.

Características de entrada - Modelo 434 II	Faixa de medição	Resolução	Precisão
Número de entradas	4 (3 fases + neutro)		
Limite de tensão nominal selecionável	1 V a 1000 V de acordo com IEC61000-4-30	0,1 V	±0,5 da tensão nominal
Limite de corrente nominal	0,5 Arms para 600 Arms com i430flex-TF** incluso (com sensibilidade 10x), 5 Arms para 6000 Arms, com i430flex-TF** incluso (com sensibilidade 1x), 0,1mV/A a 1 V/A.	0,1 A	±0,5% ± 5 contagens*
Frequência nominal 434-II	51,00 Hz até 69,00 Hz	0,01 Hz	±0,01 Hz
Energia			
Watts (VA, var)	máx. 6000 MW**	0,1 W até 1 MW	± 1% ± 10 contagens*
Sistema de amostragem			
Resolução	conversor de 16 bit analógico em digital em 8 canais		
Velocidade máxima de amostragem	200kS/s (amostras por segundo) em cada canal simultaneamente		
Amostragem rms	5000 amostras em 10/12 ciclos de conformidade com IEC 61000-4-30		
Sincronização PLL	4096 amostras em 10/12 ciclos de conformidade com IEC 61000-4-7		

FONTE: Fluke corporation fluke_434_ii_power_quality_analyzer. Users Manual. Fluke 434-II/435-II/437-II Three Phase Energy and Power Quality Analyzer. January/2012.

*dígito menos importante no medidor nesse intervalo. Disponível em:

< <https://chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/eleinst/ufrgs3.pdf> >. Acesso em: Dezembro/2016.

**O i430 Flex é uma sonda de CA que utiliza o princípio Rogowski.

3.3.8 Banco de resistores

Um banco de resistências, mostrado na Figura 28, foi utilizado com a finalidade de proporcionar um teste de capacidade e desempenho sob a carga, do Grupo Gerador. As configurações do equipamento atendem às tensões em ligação estrela. O painel de comando com sinalização e medição de tensão é disponibilizado para maior controle e segurança. São instalados disjuntores que atuam como chaves comutadoras alterando a carga acoplada ao gerador. Os resistores proporcionam uma variação da resistência com a temperatura, inferior a 3%, o que favorece a um teste eficiente.

O sistema de acoplar cargas elétricas resistivas a geradores para fins de testes de funcionamento opera em corrente alternada e, com a possibilidade de operar em vários níveis de tensão, sem que a potência do banco seja alterada.

FIGURA 28 – Banco de resistor trifásico.



FONTE: O autor.

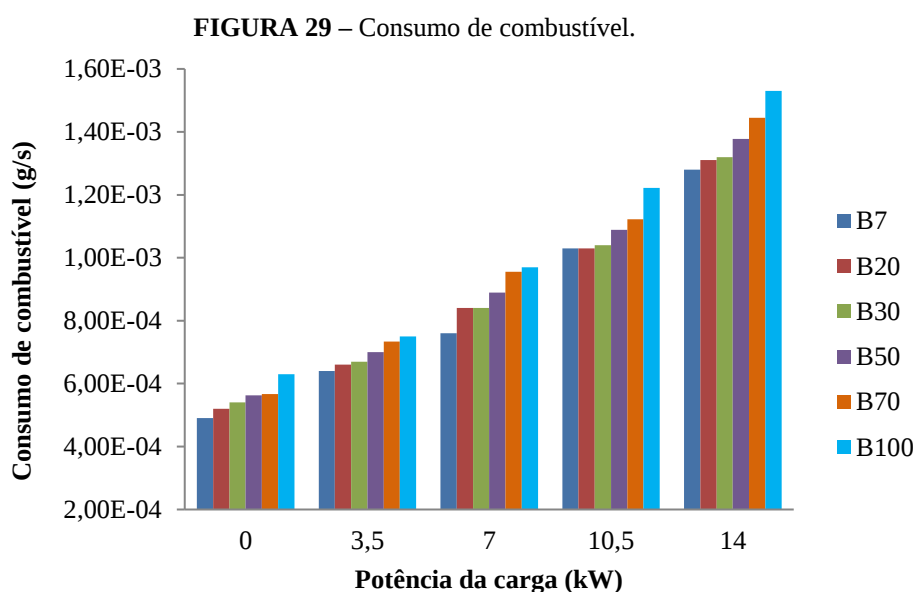
O banco de cargas resistivas possui potência total de 30kW/380V, chaveados em módulos de 3,6 kW e é usado para dissipar a energia elétrica disponibilizada no motor-gerador, com uma potência elétrica que varia de 0 kW até 14 kW.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Na Figura 29, observa-se a comparação entre o consumo de combustível utilizando as misturas de combustível B20, B30, B50 e B70 e o biodiesel de algodão puro, B100, em relação ao óleo diesel comercial, B7. Com base no fluxo mássico de combustível consumido, foi determinado o consumo horário por unidade de tempo expresso em kg/segundo.

O consumo de combustível apresentado demonstrou uma tendência de aumento verificada na aplicação de todos os combustíveis, acompanhando o aumento das cargas acopladas ao gerador. Outra tendência pode ser observada no aumento do consumo de combustível relacionada ao acréscimo da concentração de biodiesel em todas as cargas testadas.



FONTE: O autor.

A operação do motor em vazio apresentou um aumento de aproximadamente 22% do consumo de combustível quando utilizou o biodiesel puro de algodão, B100, comparado ao diesel comercial. A viscosidade maior do biodiesel em comparação a do diesel comercial pode causar o maior consumo de combustível, devido à pobre atomização do combustível.

Na operação com a carga de 3,5 kW, as comparações de consumo de combustível indicaram o aumento de 14,7%, com o uso do B100 e de 12,7% utilizando o B70, comparados ao B7, respectivamente. O B70 apresentou um aumento de 10% no consumo, em comparação ao B20. Com a evolução da carga para 7 kW, o consumo de B100 foi 21,6% maior que o de B7. A mistura de B70 apresentou aumento de 12% em comparação às de B20 e B30. Elevando a carga para 10,5 kW, os consumos de B7, B20 e B30 foram aproximadamente iguais. O consumo de B100 foi 16,6% maior que o de B7, enquanto que o de B70 ultrapassou em 8% ao consumo de B30. Durante a operação com a carga de 14 kW, o consumo de B100 aumentou em 16,3%, comparado ao B7. O B20 e o B30 praticamente não apresentaram diferença significativa. O B70 foi cerca de 11% maior que o B30. Em todas as cargas, o B50 apresentou um valor de consumo de combustível, próximo à média dos consumos das misturas de B30 e B70. Os efeitos causados devido ao aumento do biodiesel na mistura de combustível refletiram o maior consumo de combustível, esclarecido pelo menor conteúdo energético do biodiesel, observado na tabela 3, e as maiores viscosidade e densidade do biodiesel de algodão, comparado ao óleo diesel.

4.2 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL

O consumo específico de combustível (CEC) foi determinado em função da variação da potência da carga do motor-gerador abastecido com misturas de biodiesel de algodão e óleo diesel. Esse parâmetro expressa o consumo de combustível por unidade de potência elétrica fornecida ao banco de resistências elétricas (cargas resistivas). O cálculo para o consumo específico de combustível (CEC), em g/kWh, é realizado através da Equação 1.

$$CEC = \frac{3600 \cdot \dot{m}}{P} \quad (1)$$

Onde

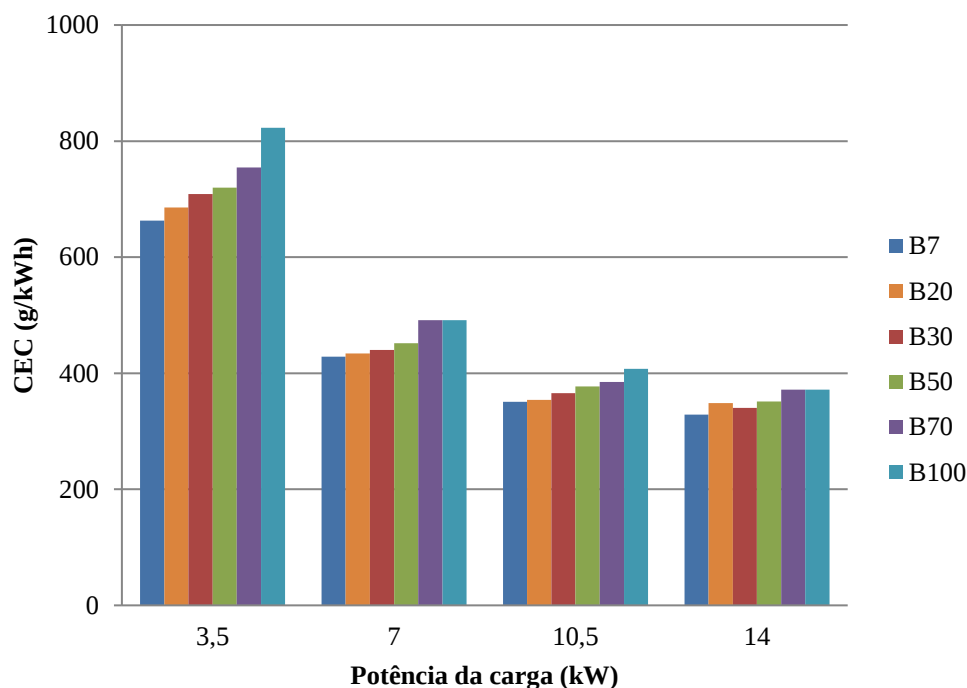
CEC – consumo específico de combustível, (g/kWh);

$\dot{m}$ - é a vazão de combustível em (kg/s);

P - é a potência elétrica dissipada nas cargas resistivas, kW.

O gráfico da Figura 30 apresenta uma redução do consumo específico de combustível com o aumento da carga e o aumento da percentagem de biodiesel nas misturas provoca um acréscimo do CEC, para todos os combustíveis.

FIGURA 30 – Consumo específico de combustível.



FONTE: O autor.

Entre os combustíveis empregados nos testes do motor-gerador foram avaliados aumentos do CEC de 19,44% com o uso do B100 e 12% com a utilização do B70, em relação ao B7, apresentando os valores de 823 g/kWh, 754 g/kWh e 663 g/kWh, respectivamente, durante a operação da carga de 3,5 kW. Na carga mais elevada, 14 kW, a diferença entre o B100, consumindo 371 g/kWh, enquanto que o B7 apresentou 329 g/kWh, foi avaliada em 11%, mostrando um aumento do consumo específico de combustível com o aumento do biodiesel. A explicação pode ser baseada nas propriedades de menor poder calorífico do biodiesel, dessa forma maior quantidade de mistura de biodiesel deve ser consumida para manter a potência fornecida pelo motor-gerador constante. Observa-se que a operação com as cargas mais baixas apresentou maior CEC. Devido ao acréscimo de biodiesel na mistura com o óleo diesel, ocorre ainda que a maior viscosidade pode causar uma pobre atomização, e por essa razão, produzir uma queima incompleta na operação com cargas baixas e médias, também observado por Castellani et al. (2008).

4.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA

O poder calorífico representa o conteúdo energético máximo dos combustíveis e este parâmetro se altera com a composição química elementar. De uma forma geral, o biodiesel possui menor conteúdo energético por unidade de massa ou volume que o óleo diesel, significando que para as mesmas condições de produção de potência haverá um maior consumo de biodiesel. O menor conteúdo energético do biodiesel poderia estar associado à presença de oxigênio na sua composição, conforme Nabi, Rahma e Akhter, 2009.

A eficiência térmica representa a conversão da energia química do combustível em energia elétrica consumida pelo banco de resistores. Para o cálculo da eficiência térmica foi utilizado um método direto que compara a energia útil com a energia primária consumida. A energia útil por unidade de tempo, neste caso a potência, é medida de forma direta pelo analisador de energia no banco de resistências. Por sua vez, a energia primária é determinada pela vazão de combustível e pelo poder calorífico inferior, que é determinado pelo valor da bomba calorimétrica (poder calorífico superior), descontada a energia associada ao calor latente correspondente à presença de vapor de água, nos produtos da combustão, na forma da Equação 2. Nesta equação, PCI e PCS representam, respectivamente, o poder calorífico inferior e o poder calorífico superior em (kJ/kg). $m_{\text{água,prod}}$ e $m_{\text{combustível}}$ são as massas de água nos produtos e massa de combustível respectivamente em (kg) e $L_{\text{água}}$ é o calor latente de condensação da água em kJ/kg de água. Considerando nesta discussão a definição do consumo específico de combustível e incorporando este na definição da eficiência, obtém-se:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - \frac{m_{\text{água,prod}}}{m_{\text{combustível}}} L_{\text{água}} \quad (2)$$

Onde:

PCI - poder calorífico inferior, (kJ/kg);

PCS - poder calorífico superior em (kJ/kg);

$m_{\text{água,prod}}$ – massa de água nos produtos, kg;

$m_{\text{combustível}}$ – massa de combustível, kg;

$L_{\text{água}}$ – calor latente de condensação da água em kJ/kg de água.

4.3.1 A eficiência térmica representando a fração de calor transformada em trabalho

A eficiência térmica é apresentada na Figura 31. Os biodieseis com misturas de diferentes concentrações, tais como B20, B30, B50, B70, o biodiesel puro, B100, e o óleo diesel comercial apresentaram as tendências da eficiência térmica semelhantes para cada carga do motor-gerador. Para o caso da carga máxima testada de 14 kW a maior diferença de eficiência ocorre entre o B7 (diesel comercial, que detém a maior eficiência) e o B30, sendo esta diferença da ordem de 1 ponto porcentual.

A Equação 3 foi utilizada no cálculo da eficiência do motor-gerador, e abordou a energia contida no combustível e sua conversão em energia elétrica.

$$\eta = \left(\frac{3600}{\dot{C}E * PCI} \right) * 100 \quad (3)$$

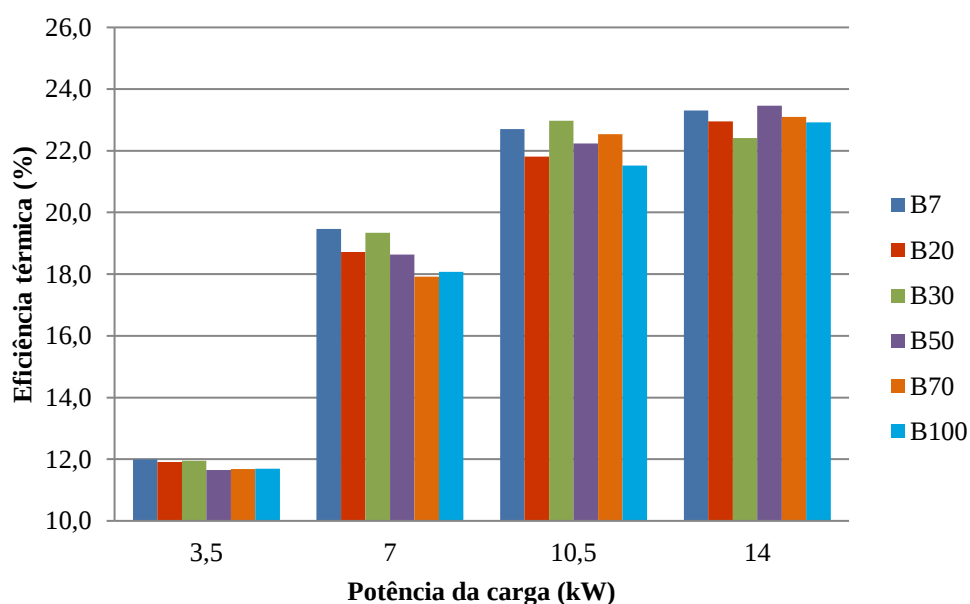
Onde,

η – Eficiência térmica do motor-gerador diesel, %;

PCI – Poder calorífico inferior, MJ/kg;

CE – Consumo específico de combustível, g/kWh.

FIGURA 31 – Eficiência térmica.



FONTE: O autor.

A eficiência térmica é inferior a 12 % até a carga de 3,5 kW, para todos os combustíveis. À medida que aumenta o CEC, devido ao aumento da concentração de biodiesel, foi verificado que a eficiência térmica demonstra redução. O aumento do CEC ocorreu devido às maiores viscosidade e densidade do biodiesel, que conduziram a uma atomização pobre das misturas de combustível.

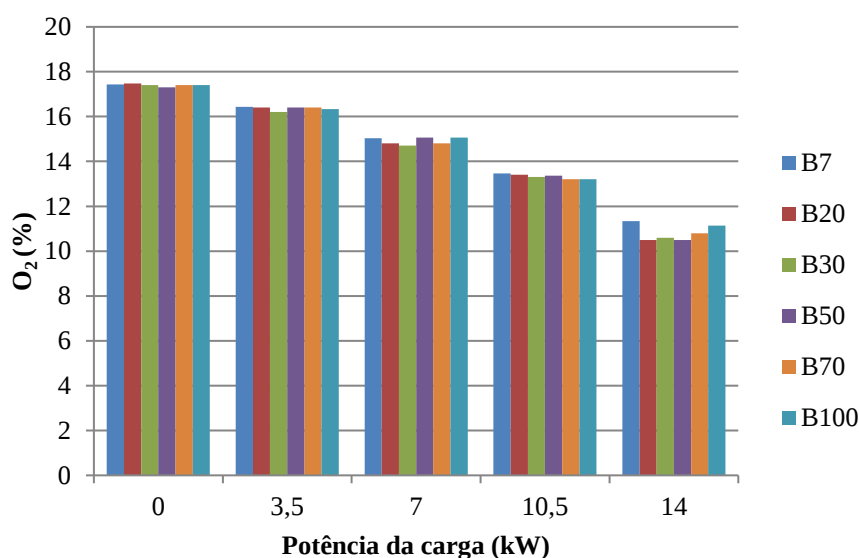
Os resultados mostram que a eficiência térmica cresce à medida que o motor é mais solicitado, apresentando um comportamento de crescimento que tende a se estabilizar em torno de 23% para as cargas maiores. Este comportamento é oposto ao consumo específico de combustível conforme mostrado na Figura 30. Por sua vez, para uma carga de 7 kW a maior diferença é da ordem de 1,6 pontos percentuais e ocorre entre o B7 (maior eficiência) e o B70.

4.4 EMISSÕES DOS GASES DE EXAUSTÃO DO MOTOR GERADOR DIESEL

4.4.1 Emissão de Oxigênio, O₂

O oxigênio envolvido no processo de combustão na câmara de combustão está contido na parcela do ar aspirado pelo motor diesel e, em outra parcela contida na estrutura molecular do biodiesel. Através dos gases de exaustão, é percebida a saída do excesso de oxigênio.

A Figura 32 apresenta a variação da emissão de oxigênio do motor-gerador em função da carga, com o biodiesel puro de algodão, B100, misturas B20, B30, B50 e B70, e óleo diesel comercial. A influência exercida pela elevação das percentagens de biodiesel nas misturas de biodiesel e óleo diesel, assim como o biodiesel puro nos testes, não foram significativas. O menor conteúdo energético do biodiesel pode estar associado à presença de oxigênio na sua composição.

FIGURA 32 – Emissão de oxigênio.

FONTE: O autor.

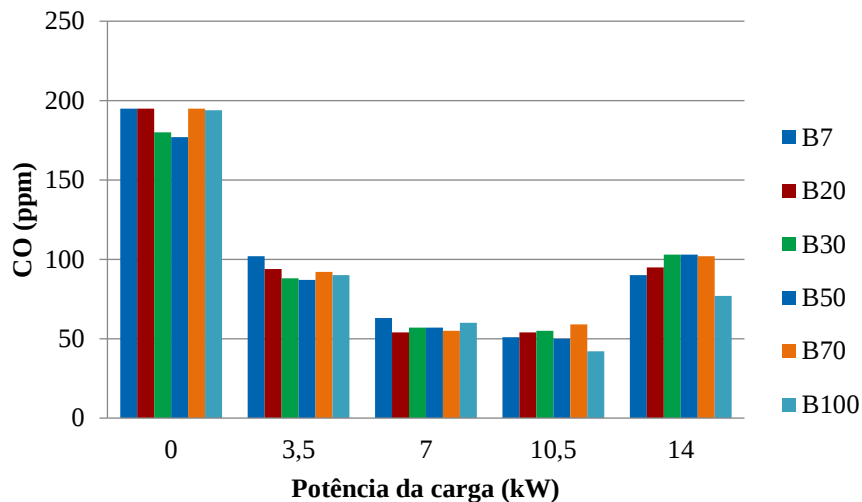
Foi verificada a redução das concentrações de oxigênio com o aumento do valor da carga, para todos os combustíveis. Na carga mais alta, a emissão de oxigênio foi a menor, o que pode ser explicado devido à combustão completa do combustível, resultado semelhante avaliado por Chattopadhyay et al. (2013). As emissões de oxigênio das misturas de B20 B30, B50, B70, assim como o B100 foram comparáveis às do óleo diesel comercial. As concentrações das emissões de oxigênio reduziram com o uso das misturas de B20, B30 e B70 e apresentaram uma redução em torno de 7% às emitidas por B100, B70 e B7, na operação a plena carga, o que poderia ser explicado por uma melhor combustão com as menores percentagens de biodiesel inseridas na mistura de combustível. A verificação dessa redução de O_2 com o uso das misturas de biodiesel /óleo diesel, pode indicar melhor combustão e economia em relação à perda de energia do gás de exaustão.

4.4.2 Emissão de Monóxido de Carbono, CO

A emissão de CO ocorre devido à combustão incompleta de combustível, mistura pobre da relação ar-combustível, em zona rica localmente e, quando os teores de CO são elevados e comparáveis em magnitudes aos demais gases principais da combustão, em decorrência de uma deficiência de ar (oxigênio) ou mistura inadequada, quando existe uma quantidade elevada de oxigênio nos produtos.

A Figura 33 apresenta a variação das emissões de monóxido de carbono, CO, em função da carga do motor-gerador.

FIGURA 33 – Emissão de monóxido de carbono.



FONTE: O autor.

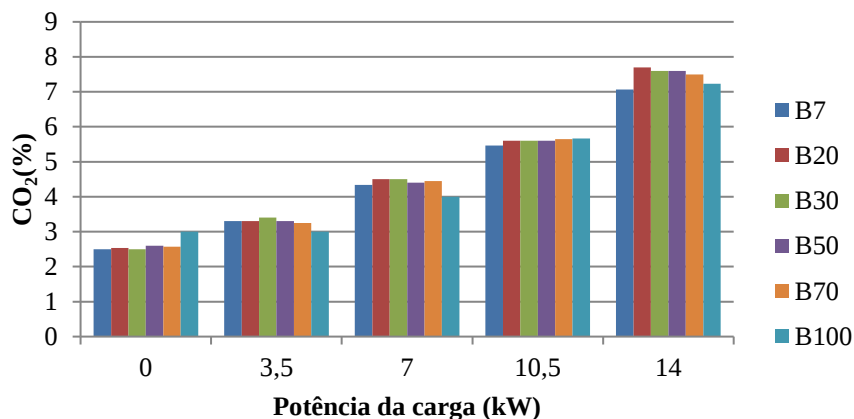
A estrutura molecular do biodiesel apresenta um conteúdo de oxigênio que auxilia na combustão mais completa na câmara de combustão e, por sua vez, na redução da emissão de CO no processo de combustão da mistura de biodiesel e óleo diesel. A elevação da emissão do CO, por meio do aumento da concentração do biodiesel na mistura, no modo de operação sem carga, pode ter ocorrido devido ao aumento da viscosidade, levando a uma pobre atomização, e da densidade, maior quantidade de massa de combustível, comparada ao B7, afetando a economia de combustível. Na faixa entre 3,5 a 10,5 kW, a concentração de biodiesel não exerceu influência significativa sobre as emissões de CO, em comparação ao B7. Na elevação em direção à carga de 14 kW, a emissão de CO aumentou e o B100 apresentou o menor valor de emissão de CO comparado aos outros combustíveis, como o teor foi medido da ordem de ppm, as razões obedecem às questões termodinâmicas e de cinética da combustão, neste caso. As concentrações de biodiesel nas misturas interferiram com pequenas reduções na formação do CO, para os ensaios com as cargas elétricas resistivas no motor-gerador. Como pode ser observado no gráfico, a formação das emissões de CO depende da concentração do biodiesel na mistura e, por sua vez, demonstra dependência das propriedades físico-químicas dos combustíveis. A emissão do CO do biodiesel de algodão é menor que a do

óleo diesel. O biodiesel por ser oxigenado, conduz a um melhor nível de combustão do combustível, resultando no decréscimo das emissões de CO, de acordo com Nabi, Rahman e Akhter, (2009). A variação de monóxido de carbono vista no gráfico, devido à formação da mistura de biodiesel/óleo diesel, revela que a mistura de ar/combustível percebe as dificuldades de uma pobre atomização, ao considerar a alta viscosidade. O resultado das misturas ricas de biodiesel localmente causa maior produção de monóxido de carbono durante a combustão. Por esse motivo, em cargas mais baixas, devido ao aumento da concentração do biodiesel, o motor obteve menor quantidade de ar para obter uma combustão completa, da mesma forma que abordam Aydin e Bayindir (2010).

4.4.3 Emissão de dióxido de carbono, CO₂

A Figura 34 apresenta as emissões de CO₂ em função das cargas do motor-gerador. Verifica-se dos resultados que a emissão de CO₂ tende aumentar com a carga, sendo neste caso da ordem de 2,5% para a condição de funcionamento do motor em vazio e da ordem de 7,5% para o caso do funcionamento em cargas nominais. Este aumento da participação do CO₂ em termos percentuais na mistura de produtos está associado a uma maior demanda de combustível com o aumento da carga, enquanto que a quantidade de ar de combustão permanece quase constante, pois depende das características geométricas do motor e da condição de funcionamento que se dá, neste caso, numa rotação quase constante por causa da aplicação (geração de energia elétrica). Isto é confirmado pela menor disponibilidade de oxigênio nos produtos com o aumento da carga conforme indicado pelos resultados da Figura 32.

FIGURA 34 – Emissão de dióxido de carbono.



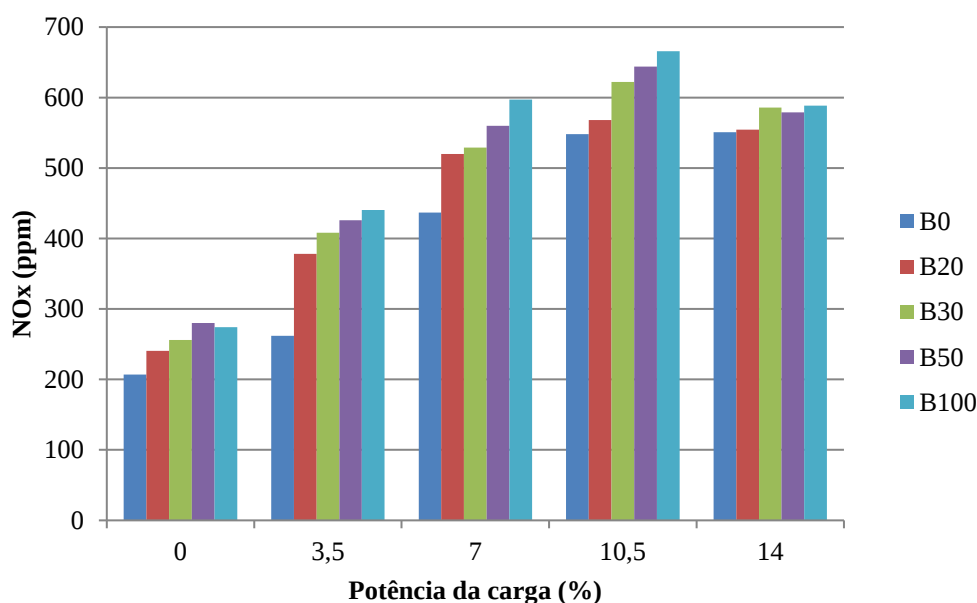
FONTE: O autor.

Outro aspecto dos resultados está relacionado à comparação do teor de emissões de CO_2 entre os combustíveis testados. A Figura 34 apresenta que, nas maiores cargas, a emissão de CO_2 é maior para as misturas diesel/biodiesel de algodão de B20 a B70, e B100, enquanto que para as cargas menores esse comportamento se inverte, com exceção do teste em vazio, onde as emissões de CO_2 para o biodiesel puro é 20% maior do que o diesel comercial (B7). As emissões de CO_2 dependem de vários aspectos associados ao processo de combustão e às propriedades dos combustíveis, tais como a presença de oxigênio na sua estrutura química que é o caso do biodiesel e que favorece a maior emissão de dióxido de carbono, o conteúdo de carbono cujos valores mais elevados no combustível também favorecem uma maior emissão de CO_2 e a viscosidade do combustível, que tem um efeito sobre a mistura ar/combustível e a combustão pela dificuldade de difusão do oxigênio no jato de combustível reduzindo a formação de CO_2 . Na base destes fenômenos é que deve radicar os diferentes comportamentos encontrados nos resultados deste estudo e nos estudos da literatura.

4.4.4 Emissão de óxidos de nitrogênio, NO_x

A variação da concentração da emissão de NO_x em função da carga e da concentração de biodiesel na mistura de combustível é apresentada na Figura 35.

FIGURA 35 – Emissão de óxido de nitrogênio.



FONTE: O autor.

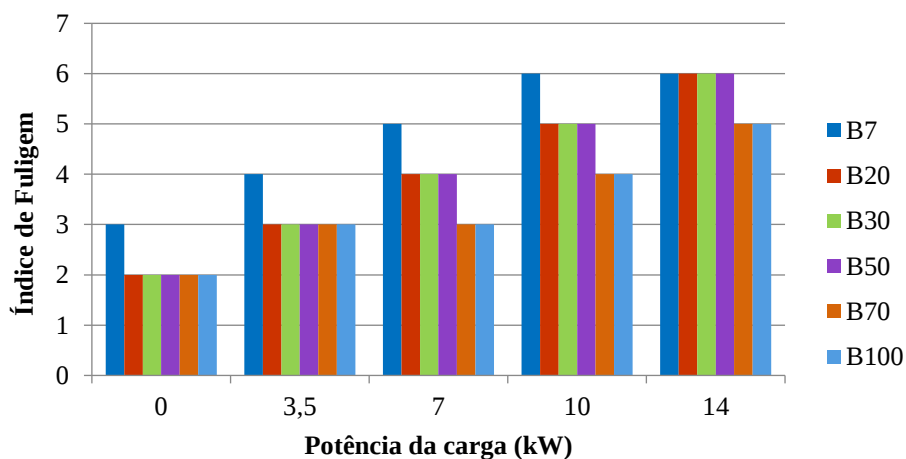
Foi observado o aumento da emissão do NOx com o aumento da carga para todos os combustíveis, assim como, em relação ao aumento de biodiesel na mistura de combustível, quando comparado aos testes com diesel comercial B7. Foi observado que o B100 apresentou maior emissão de NOx em todos os testes, seguido pelo B50, em comparação ao diesel comercial. O aumento do NOx com a carga pode ser explicado pelo aumento da temperatura no interior da câmara de combustão, à medida que o motor é mais exigido energeticamente e se for considerado que a produção desta espécie química radica no mecanismo de NOx térmico.

Diferentemente dos outros casos, as medições de B70 foram retiradas, devido a problemas com a célula de NOx do Tempest 100.

4.4.5 Emissão de Fuligem

A Figura 36 apresenta os valores médios, em triplicata, dos índices de fuligem dos gases de exaustão em função da carga elétrica acoplada ao gerador. Foi observado que o teor de fuligem contido nos gases de escapamento, encontrado na operação do gerador, aumenta com o acréscimo da carga, para todos os combustíveis testados. 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, responsáveis pela formação de particulados e fuligem.

FIGURA 36 – Índice de fuligem dos gases de exaustão.



FONTE: O autor.

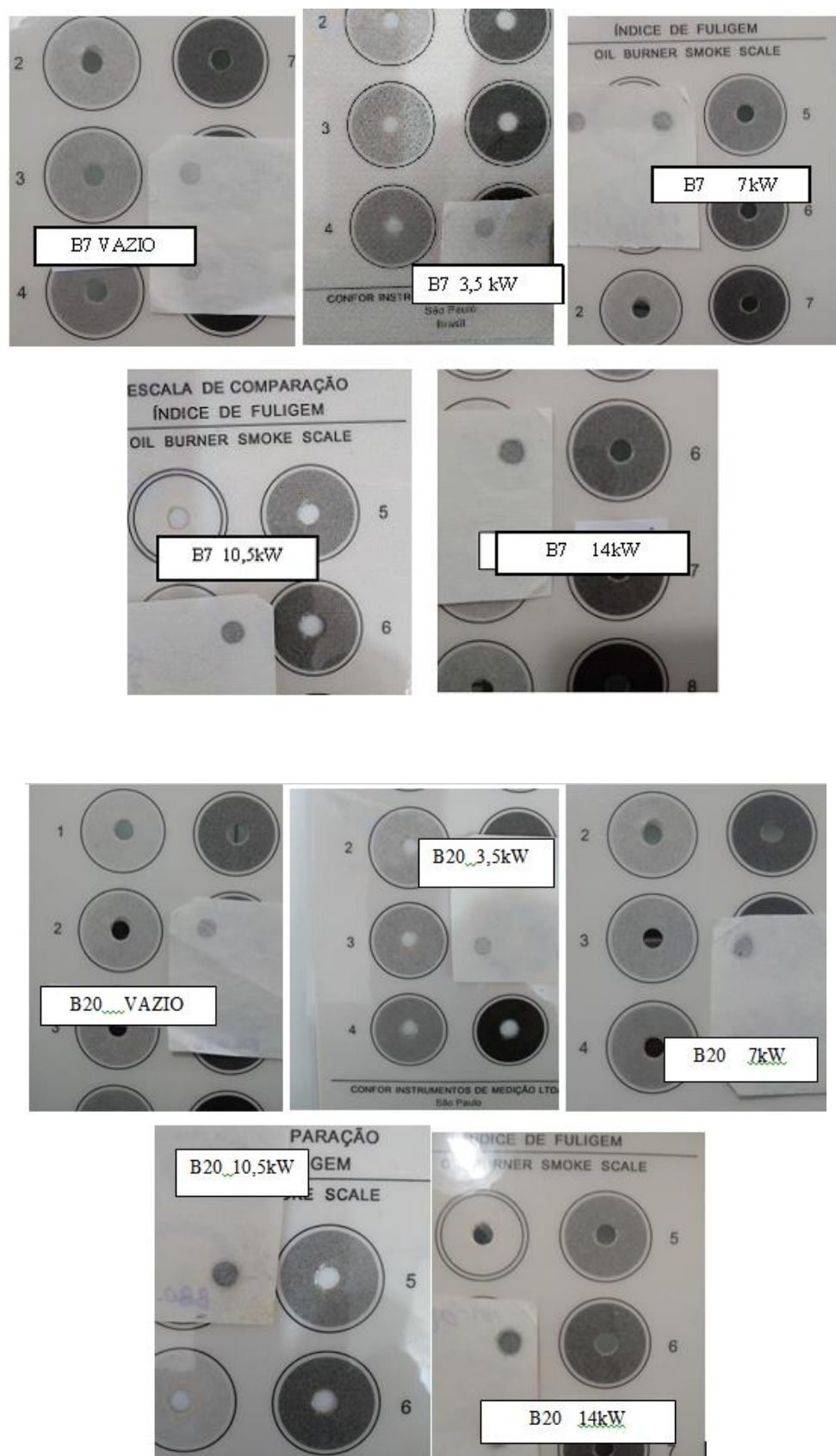
Outra razão pode estar no maior índice de cetano que apresenta o biodiesel e que está associada a uma combustão mais eficiente. Ainda, uma menor razão C/H também atua no sentido de uma redução nas emissões de fuligem.

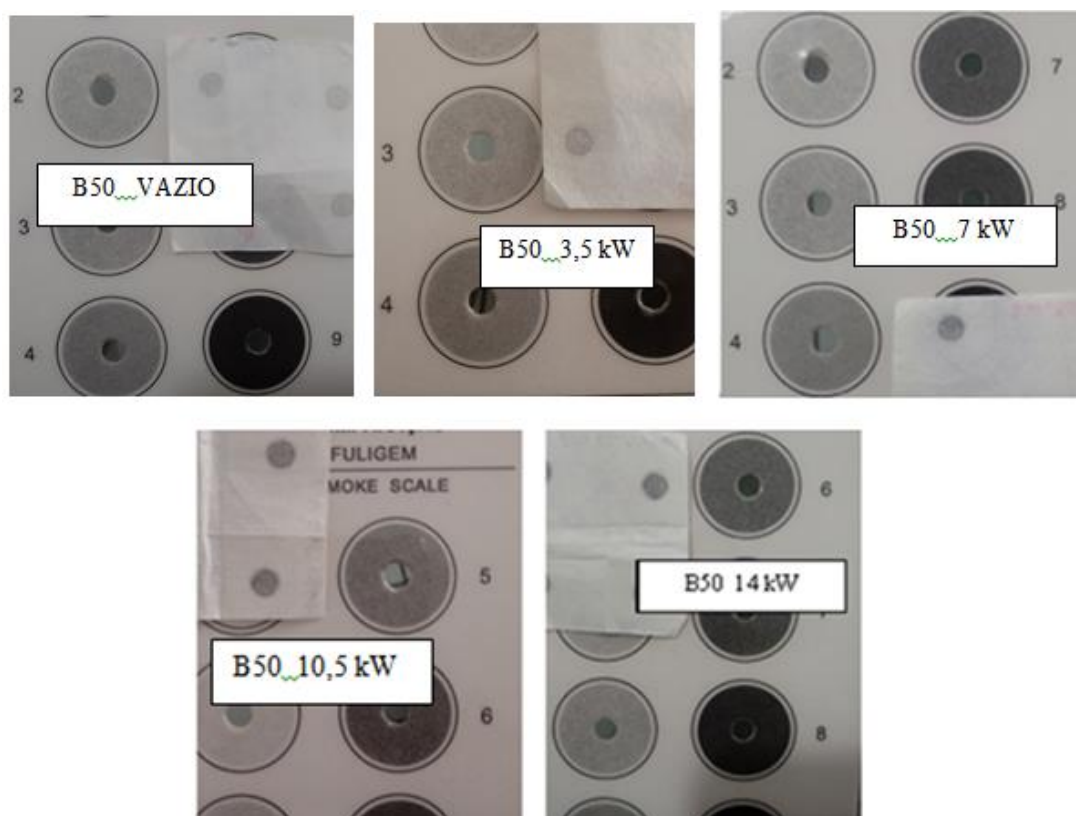
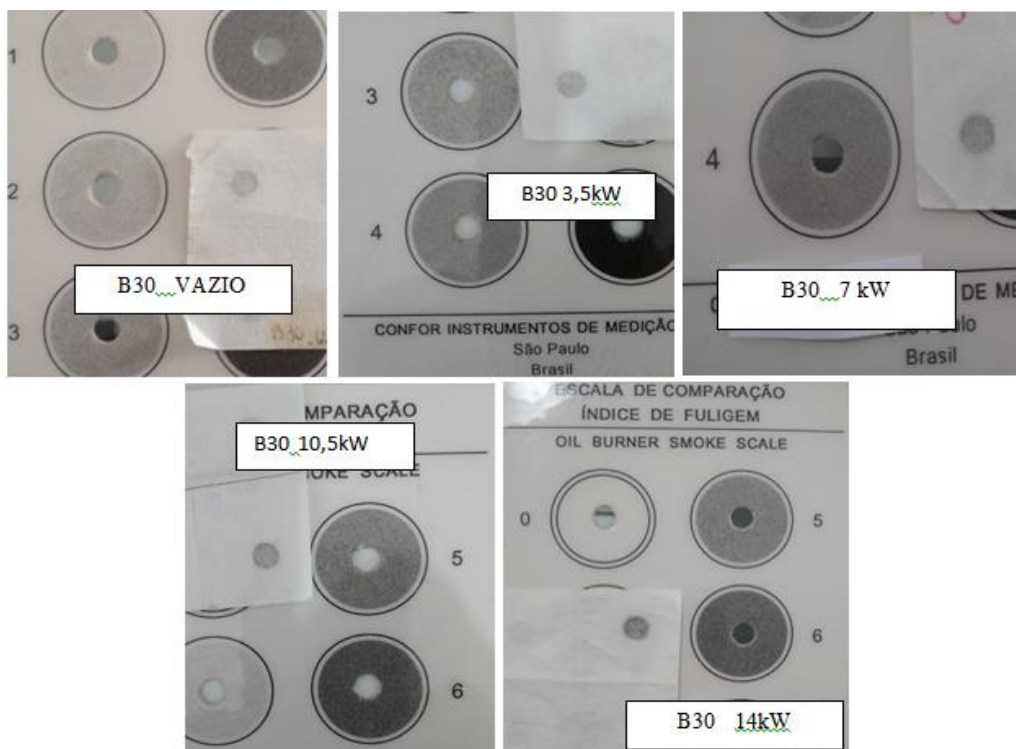
A operação em vazio apresenta o índice de fuligem 2, devido ao uso das misturas avaliadas e B100, enquanto que, o B7 apresentou índice de fuligem igual a 3, significando que o motor opera de maneira regular. Em 3,5 kW, à medida que as misturas e o B100 alcançaram satisfatoriamente o índice 3, o B7 apresentou índice 4, que é uma condição ruim de operação do motor, de acordo com a escala de fuligem. Na aplicação da carga de 7 kW, o B7 atingiu o índice 5, considerado insatisfatório, enquanto que B20, B30, B50 indicaram índice 4 e, B70 e B100 alcançam a condição de índice 3, nas mesmas condições de carga. Apesar dos teores de fuligem fornecidos pelas misturas se apresentarem abaixo dos valores produzidos pelo uso do diesel comercial, os índices de fuligem nas condições de cargas mais altas com 10,5 kW e 14 kW, mantiveram-se acima dos índices considerados adequados às exigências da qualidade da combustão.

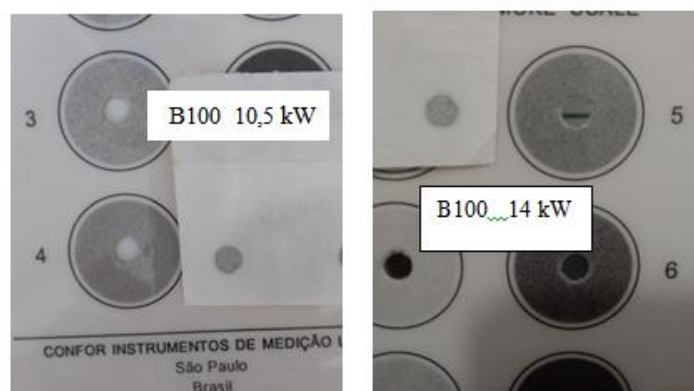
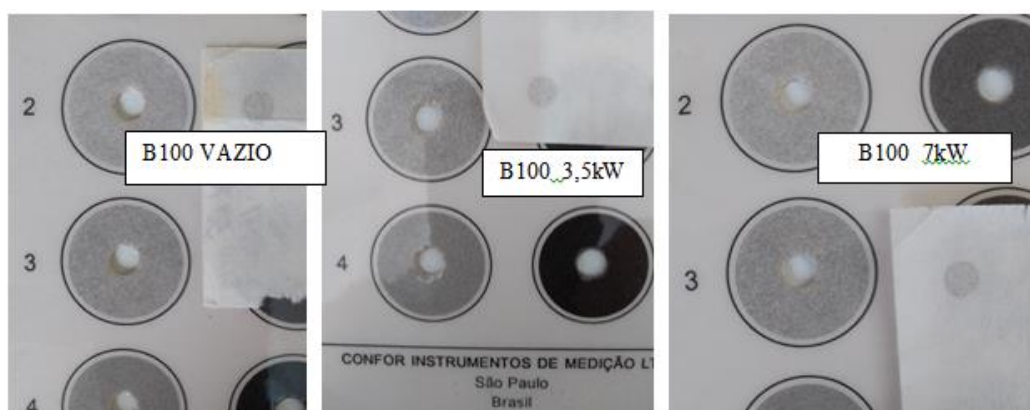
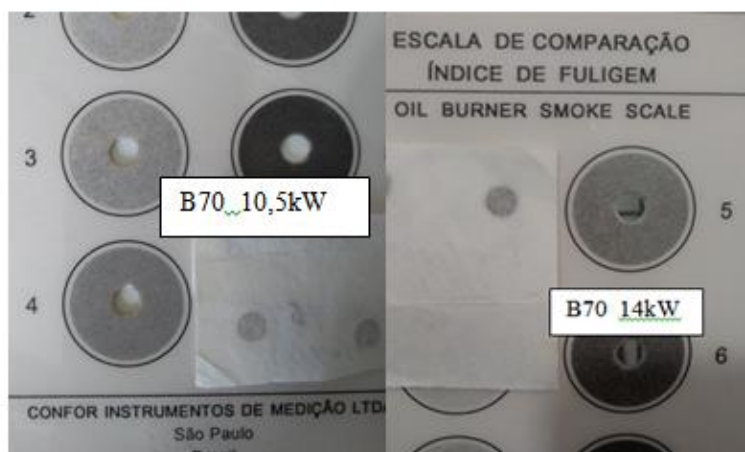
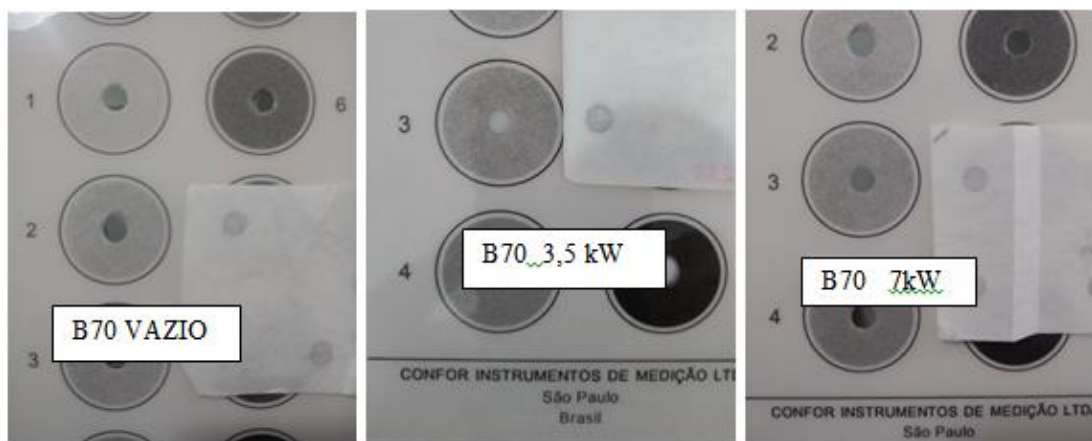
Em complementação à explicação relacionada ao método de Bacharach, com início na seção 3.3.6, realizou-se o procedimento de identificação do índice de fuligem, através da comparação entre a imagem de referência da escala de fuligem e uma determinada mancha de fuligem retida no papel filtro. A avaliação dos índices de fuligem é observada, de maneira que a escala é colocada sobreposta ao papel filtro e, dessa forma, a mancha no papel filtro deve aparecer quando a posição da abertura que fica na parte central de uma determinada figura da escala coincide com a mancha, contendo o material particulado coletado pela bomba de fuligem. Dever ser associada uma marca a um valor da carga e a uma mistura de combustível. Os resultados observados nos ensaios demonstraram que as manchas retidas no papel filtro, não foram exatamente iguais às de referência, da escala de fuligem. O método de Bacharach oferece uma comparação com os valores da escala que decorre em valores discretos, observados na escala de fuligem. Contudo, o teor pertinente ao material particulado coletado, que fica contido no papel filtro, pode diferir sutilmente da referência. Ou seja, os dados introduzidos para a produção do gráfico da Figura 36, correspondem, em algumas medições, a aproximações que através da percepção de uma inspeção visual, exige do técnico escolher a figura da escala de fuligem, por comparação, com maior afinidade à amostra.

A figura 37 apresenta o combustível B7, as misturas B20, B30, B50, B70 e o B100, a carga que identifica a condição de operação, assim como o resultado do bombeamento da fuligem representado pela mancha com tonalidade escura registrada no papel filtro.

FIGURA 37 – Escala de fuligem, as amostras de combustível, papel filtro com fuligem e as respectivas potências das cargas.



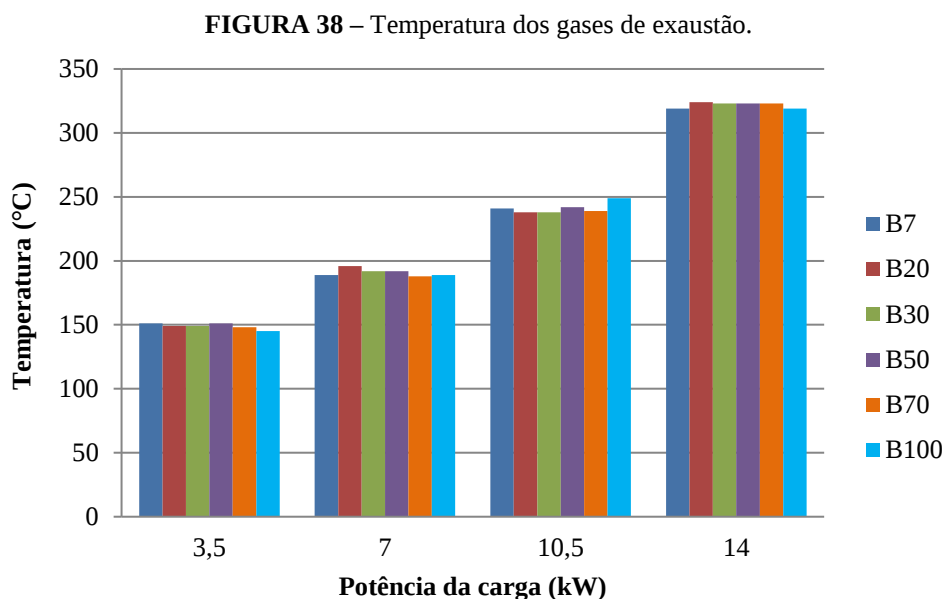




FONTE: O autor.

4.5 TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA

A avaliação da TGE é associada ao nível da qualidade da combustão na câmara de combustão. A TGE acrescenta a informação de que mais combustível deve ser consumido para produzir a potência necessária a um aumento na carga. Os valores médios corrigidos de temperatura dos gases de escape em função da potência das cargas acopladas ao gerador são indicados no gráfico da Figura 38.



FONTE: O autor.

A temperatura é aproximadamente a mesma para misturas dos combustíveis testados, nas aplicações para todas as cargas. Por tanto, a variação das concentrações do biodiesel na mistura de combustível ao óleo diesel não causaram diferenças significativas de temperatura, durante a operação do motor-gerador. Os combustíveis, na carga de 3,5 kW, atingiram o nível médio de temperatura de 149°C, para a carga de 7 kW, verificou-se 189°C, à carga de 10,5 kW, foi estabelecida em cerca de 241°C. Entretanto, com o gerador assumindo o funcionamento à plena carga, 14 kW, a temperatura média de B100, foi de 314°C, ficando abaixo da temperatura dos demais combustíveis, que se aproximaram dos 324°C. A temperatura do gás recebe a influência pelo número de cetano do combustível, que opera tornando o período de atraso de ignição mais longo. Um maior atraso de ignição resulta maior quantidade de queima de combustível devido à combustão mais longa,

acarretando em um aumento da temperatura dos gases de exaustão. Também, o menor número de cetano do combustível estabelece um tempo maior de atraso de ignição. A temperatura do gás de exaustão sobe como um resultado da combustão que prolonga o período de alimentação no interior do cilindro.

A maior temperatura de exaustão pode ser o resultado da combustão ineficiente de misturas de biodiesel mais elevadas. A Figura 37 mostra a temperatura do gás de escape de amostras com variação nas condições de carga.

A temperatura dos gases de escapamento aumentou em função da carga para todos os combustíveis. A menor temperatura de exaustão é um indicador de que a combustão ocorre mais cedo e de um maior poder calorífico. A combustão ocorrendo mais cedo permite mais tempo e ângulo de manivela para o processo de expansão.

4.6 PARÂMETROS ELÉTRICOS DO GERADOR DIESEL

Os valores médios de tensão, corrente, potência e frequência elétrica foram medidos durante a operação do gerador adequando o fornecimento de energia às variações das cargas do banco de resistores, em acréscimos de 3,5kW, entre 0 e 14 kW, acopladas ao barramento do gerador alimentado com B7, B50 e B100.

A tabela 8 apresenta os resultados dos parâmetros elétricos obtidos nas medições efetuadas nos ensaios do grupo gerador, o percentual das cargas utilizadas e os combustíveis avaliados.

TABELA 8 - Resultados obtidos sobre os parâmetros elétricos medidos, para cada ensaio do grupo gerador

Parâmetros	Óleo Diesel – B7	B50	B100
Tensão (V)			
Vazio	220,11	222,42	222,42
Carga de 25%	222,13	222,41	222,12
Carga de 50%	221,51	222,25	221,77
Carga de 75%	220,23	220,75	219,61
Carga de 100%	203,6	205,2	209,1
Corrente (A)			
Carga de 25%	5,29	5,24	5,22
Carga de 50%	11,12	10,76	11,09
Carga de 75%	16,02	15,89	16,1
Carga de 100%	22,68	22,80	22,31
Frequência (Hz)			
Vazio	61,5	62,4	62,4
Carga de 25%	60,6	61,2	60,9
Carga de 50%	59,7	60,5	60,1
Carga de 75%	59,3	60,1	59,5
Carga de 100%	59	58,8	59,1

FONTE: O autor.

4.6.1 Tensão elétrica

Os valores estabelecidos de tensão elétrica de acordo com as normas da concessionária de energia elétrica e da ANEEL, nas avaliações das faixas de classificação de tensões de regime permanente, foram medidos nos pontos de conexão em tensão nominal. Foram obtidos os valores de tensão estipulados por norma, igual ou inferior a 1 kV (220V/127V), no intervalo $201V \leq \text{Tensão de Leitura} \leq 231V$.

4.6.2 Frequência elétrica

Os requisitos técnicos mínimos de controle para a conexão de geradores termoelétricos são definidos pelo ONS, com o objetivo de garantir os padrões de desempenho da rede. A frequência do gerador é determinada pelo número de polos existentes na máquina e pela frequência de rotação, apresentada na Equação 4.

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (4)$$

Onde:

f - frequência da tensão gerada (Hz);

p - número de pares de polos do rotor;

n é a velocidade de rotação do rotor (rpm).

4.6.3 Potência elétrica

Os ensaios referentes ao motor-gerador abastecido com as diferentes proporções de biodiesel/diesel, operando em regime permanente, indica que os parâmetros elétricos envolvidos na análise da qualidade da energia elétrica produzida pelo gerador, para cada ensaio, assumem praticamente os mesmos valores comparados aos obtidos com o uso do B7. Foi observado que na transição de carga o gerador responde prontamente, de maneira satisfatória, no momento de partida, ou, da entrada das cargas no barramento.

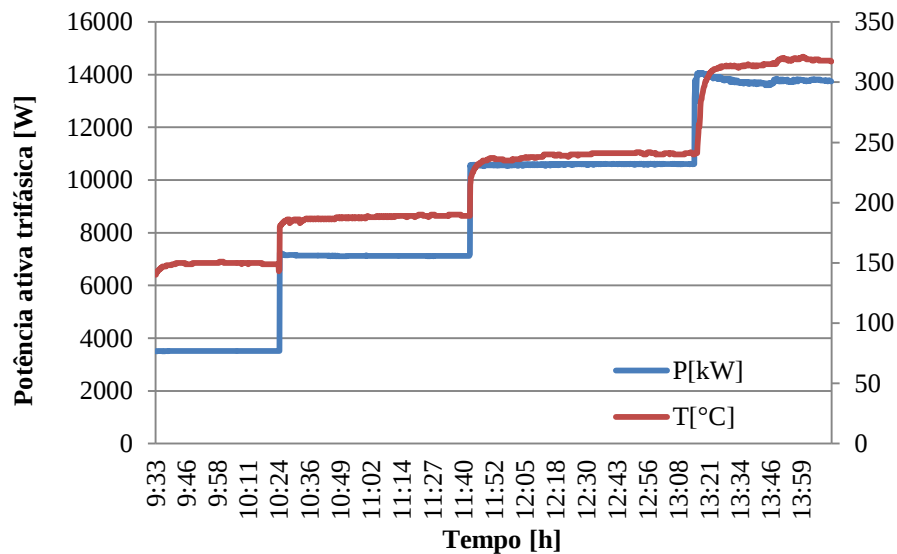
A tabela 9 fornece os valores de potência elétrica medidos no barramento elétrico na saída do gerador.

TABELA 9 – Valores de potência elétrica medidos no barramento elétrico do gerador.

Combustível/ Potência padrão [kW]	B7/ potência medida	B20/ potência medida	B30/ potência medida	B50/ potência medida	B70/ potência medida	B100/ potência medida
3,5	3,510	3,499	3,522	3,510	3,510	3,505
7	7,024	7,027	7,046	7,016	7,126	7,108
10,5	10,524	10,528	10,508	10,428	10,524	10,499
14	13,789	14,011	14,000	13,916	14,043	13,886

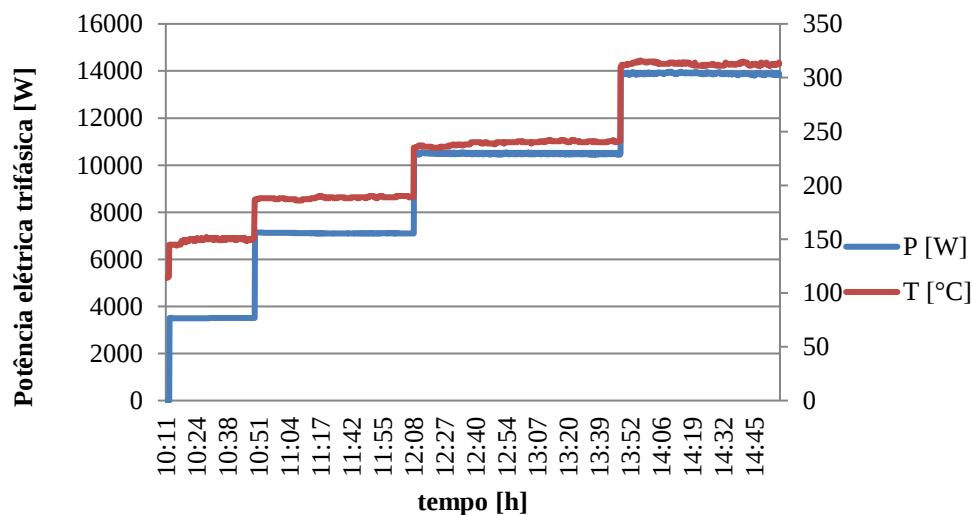
FONTE: O autor.

O gráfico da figura 39 apresenta os registros de medição de potência elétrica em função do tempo, fornecida pelo gerador às diferentes cargas elétricas, tomando como base o gerador alimentado pelo combustível B7. Para todos os combustíveis testados, a potência foi elevada para atendimento à demanda. Os níveis de potência entregue à carga foram praticamente os requeridos pelas cargas.

FIGURA 39 – potência elétrica produzida com o B7.

FONTE: O autor.

O gráfico da figura 40 apresenta os registros de medição de potência elétrica em função do tempo, fornecida pelo gerador às diferentes cargas elétricas, tomando como base o gerador alimentado pelo combustível B7. Para todos os combustíveis testados, a potência foi elevada para atendimento à demanda. Os níveis de potência entregue à carga foram praticamente os requeridos pelas cargas.

FIGURA 40 – Potência elétrica produzida com o B100.

FONTE: O autor.

Os parâmetros de temperatura dos gases de exaustão e potência de saída do grupo gerador foram analisados devido à relevância nos estudos de desempenho do motor gerador. Os gráficos expressam os valores médios de temperatura e potência da carga na

saída do gerador, com o biodiesel de algodão B100, comparado aos resultados obtidos com o óleo diesel comercial B7. A temperatura dos gases de exaustão que acompanha no gráfico os valores registrados de potência de saída é utilizada como referência de que o processo de combustão ocorra a contento, conforme detectadas alterações dos níveis de potência produzida pelo gerador.

O processo onde ocorre um resfriamento dos gases de exaustão pode ocorrer por excesso de oxigênio, assim como a elevação da temperatura pode ser avaliada em uma mistura rica.

Em resposta à leitura da potência de saída do motor gerador, não deverá apresentar significativas alterações, mas para que seja mantida tal potência em que serve a determinada carga poderá ocorrer aumento do consumo específico de combustível para estabelecer a potência da carga.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Essa tese apresenta a metodologia experimental aplicada e os dados adquiridos nos ensaios de um motor-gerador a ciclo diesel, abrangendo a avaliação do biodiesel de óleo de semente de algodão, como alternativa ao óleo diesel comercial, de maneira total ou parcial. Foram analisados os efeitos dos parâmetros físico-químicos dos combustíveis de biodiesel, assim como dos modos de operação em diferentes condições de cargas, sobre os parâmetros de desempenho do gerador diesel e nas emissões de poluentes de exaustão.

5.1 CONCLUSÕES

- As avaliações das propriedades dos combustíveis são de fundamental importância para o entendimento das características de desempenho e de emissões de exaustão do motor-gerador;
- A densidade e a viscosidade são parâmetros frequentemente relacionados para efeitos de comparação dos diferentes biodieseis produzidos, e têm um efeito direto no tamanho da gota e da energia gasta na atomização do combustível, e isto tem um efeito na qualidade da combustão e na eficiência térmica global do motor;
- Os resultados de eficiência térmica e de consumo específico de combustível demonstraram grande proximidade entre todos os combustíveis testados, e também, aos do óleo diesel comercial em vigor nos postos da rede de abastecimento de combustíveis no Brasil;
- O CEC aumentou com a carga e com a porcentagem do biodiesel na mistura, o que pode ser atribuído ao menor poder calorífico do biodiesel comparado ao óleo diesel. A eficiência térmica das misturas apresentaram-se praticamente iguais em cargas baixas, enquanto que as misturas foram ligeiramente maiores comparadas ao B100.
- As emissões de oxigênio das misturas de biodiesel e óleo diesel reduziram com o aumento da carga, e em relação às concentrações de biodiesel as emissões de O₂,

foram semelhantes. A redução de oxigênio pode representar que a combustão nas cargas mais elevadas obteve um melhor grau de combustão.

- As emissões de CO reduziram com o aumento da carga. As cargas de 10,5 kW e 14 kW, o B100 apresentaram uma redução na emissão de CO comparadas aos demais combustíveis. Entretanto, nos valores com uma elevação de CO, na carga mais alta, pode ser avaliado como a mistura rica de ar-combustível ter sido queimada na câmara de combustão com deficiência de oxigênio.
- A emissão de NOx aumentou com a elevação das cargas e alta temperatura, e com excesso de oxigênio na câmara de combustão.
- O índice de fuligem considerado regular com as misturas e biodiesel puro testados em comparação ao óleo diesel comercial, e foi considerado ruim, ou, insatisfatório para as cargas acima de 7 kW.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

- Realizar estudos sobre o efeito da recirculação de gases, no motor diesel, sobre as emissões de NOx;
- Realizar estudos, a partir de dados experimentais obtidos nos testes sobre eficiência exergética do motor diesel;
- Desenvolver estudos numéricos que envolvam a simulação de um ciclo motor diesel, visando verificar a influência da variação da taxa de compressão do motor, para diferentes tipos de combustível (mistura diesel/biodiesel). Complementarmente, a partir do modelo numérico avaliar o processo de injeção de combustível, considerando o processo tanto de atomização, quanto a duração, para diferentes condições de operação, com extensão para avaliação do consumo de combustível, e influência sobre as emissões de exaustão;
- Avaliar a repercussão sobre os aspectos econômicos do uso do biodiesel a depender dos preços de mercado deste tipo de combustível.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Grupos geradores - Requisitos gerais para telecomunicações. ABNT NBR 14664: Abril/2001.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Motor diesel - Análise e determinação dos gases e do material particulado emitidos por motores do ciclo diesel - Ciclo de 13 pontos. ABNT NBR 14489:Abril/2000. Versão Corrigida: 2001.

ABUHABAYA, Abdullah ; Fieldhouse, John ; Brown, David. Influence of production variables for biodiesel synthesis on yields and fuel properties, and optimization of production conditions. Fuel 103 (2013) 963–969.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - MME. RESOLUÇÃO Nº 45, DE 25.08.2016 - DOU 26.08.2014 .

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. RESOLUÇÃO Nº 30, DE 23.06.2016 - DOU 24.06.2016 .

ALTUN, Sehmus. Effect of the degree of unsaturation of biodiesel fuels on the exhaust emissions of a diesel power generator. Fuel 117 (2014). 450-457.

ANAND, R.; Kannan, G. R.; Reddy, K. R.; Velmathi, S.. The Performance and Emissions of a Variable Compression Ratio Diesel Engine Fuelled with Bio-Diesel from Cotton Seed Oil. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. VOL. 4, Nº. 9, 2009.

AYDIN, Huseyin ; Bayindir, Hasan . Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. Renewable Energy 35 (2010) 588–592.

BEJAN, A., Tsatsaronis, G. e Moran, M., *“Thermal Design & Optimization”*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., USA, 1996.

Canal Jornal da Bioenergia. Brasil – Segundo Maior Produtor de Biodiesel no Mundo. Disponível em: <http://www.canalbioenergia.com.br/brasil-segundo-maior-produtor-de-biodiesel-no-mundo/>. Acesso em: Dezembro 2016.

BEN - Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2016.

CARVALHO JÚNIOR, João Andrade de; LACAVA, Pedro Teixeira. Emissão em processos de combustão. São Paulo. Editora UNESP, 2003.

CASTELLANELLI, Marcio; DE SOUZA, Samuel. N. M., SILVA, Suedêmio L., KAILER, Euro K.. Desempenho de Motor Ciclo Diesel em Bancada Dinamométrica Utilizando Misturas Diesel/Biodiesel. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.28, n.1, p.145-153, jan./mar. 2008.

CHATTOPADHYAY, Soham ; SEM, Ramkrishna . Fuel properties, engine performance and environmental benefits of biodiesel produced by a green process . Applied Energy 105 (2013) 319–326.

CONAMA RESOLUÇÃO Nº 451/2012. Disponível em:
<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=675>> Acesso em:
Dezembro 2016.

CONAMA RESOLUÇÃO Nº 433/2011: Disponível em:
<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=654>> Acesso em:
Dezembro 2016.

Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. Algodão em Mato Grosso – Fevereiro/2016. Conjuntura Mensal – Ano 2. Nº 10.

De Paulo, A.A.; Silvestre da Costa, Ronaldo; Rahde, Sergio Barbosa, Dalla Vecchia, Felipe; Seferin, Marcus; dos Santos, Carlos Alexandre. Performance and emission evaluations in a power generator fuelled with Brazilian diesel and additions of waste frying oil biodiesel. Applied Thermal Engineering 98 (2016) 288–297.

FAN, XiaoHu; Wang, Xi; Chen, Feng; Geller, Daniel P.; Wan, Peter J.. Engine Performance Test of Cotton seed Oil Biodiesel. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, 2008, 1, 40-45.

FERREIRA, Vitor Pinheiro; Martins , Jorge; Torres , Ednildo Andrade ; Pepe,Iuri Muniz ; De Souza, João M.S. Ramos. Performance and emissions analysis of additional ethanol injection on a diesel engine powered with A blend of diesel-biodiesel. *Energy for Sustainable Development* 17 (2013) 649–657.

HELTON, Aparecido Rosa; Willian Tenfen Wazilewski; Deonir Secco; Luiz Inácio Chaves; Gustavo Veloso; Samuel Nelson Melegari de Souza; Marcelo José da Silva; Reginaldo Ferreira Santos. Biodiesel produced from crambe oil in Brazil - A study of performance and emissions in a diesel cycle engine generator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38 (2014) 651 – 655.

IARC - International Agency for Research on Cancer. Diesel engine exhaust as carcinogenic. World Health Organization, 2012. Press realease, n.213.

INCROPERA, F.P.; Dewitt, D.P.; Bergman, T. L. e Lavine. A.S., “Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa”, John Wiley& Sons, Inc., N.Y., USA, 2007.

IT-ATM-O8.2. Instrucción técnica IT-ATM-O8.2. Métodos de medida no normalizados, Medida opacidade Bachrach. Disponpivel em : <file:///C:/Users/RENATO/Documents/tese%20corre%C3%A7%C3%A3o/Bacharach.pdf>. Acesso em: Novembro/2016.

KALGUDI, Shankarappa & Suresh, K V. An Experimental Study of Performance and Emission Characteristics of CI Engine Fuelled with Hybrid Blends of Biodiesels, *International Journal of Technical Research and Applications*, India, Volume 2, p. 71-74, set/out 2014.

KHAN, N.U.; Marwat, K.B.; Hassan, G.; Farhatukkah, S.; Batool, S.; Makhdoom, K.; AHAMAD, W.; KHAN, H.U. Genetic variation and heritability for cotton seed, fiber and oil traits in *Gossypium hirsutum* L. *Pakistan Journal of Botany*, v.42, p.615-625, 2010.

KUMAR, A. Siva; Maheswar, D.; Reddy, K. Vijaya Kumar. Comparision of Diesel Engine Performance and Emissions from Neat and Transesterified Cotton Seed Oil. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering . Volume 3, Number 3, September 2009.

KUMAR, Niraj; Goel, Varun; Chauhan Sant Ram. Performance and emission characteristics of biodiesel from different origins: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 21, 633-658, May 2013.

KUMAR, Prashanth; Vijeth, Peter Fernandes, K. Raju¹. A Study on Performance and Emission Characteristics of Cotton Seed Methyl Ester, Sapindous Mukorossi Seed Oil, and Diesel Blends on CI Engine. Energy and Power 2015, 5(1A): 10-14.

LAVIOLA, Bruno Galvêas. Disponibilidade de Matérias Primas e Oportunidades de Diversificação da Matriz Energética do Biodiesel. EMBRAPA. Brasilia – DF. Setembro, 2015.

Lei Nº 11.097/2005. Presidência da República Casa Civil Subchefia para Assuntos Jurídicos. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm>. Acesso em: Dezembro 2016.

MARTIN, M. Leenus Jesu; Geo, V. Edwin ; Singh, D. Kingsly Jeba ; Nagalingam, B. A comparative analysis of different methods to improve the performance of cotton seed oil fuelled diesel engine. Fuel 102 (2012) 372–378.

MME - Ministério de Minas e Energia - Boletim mensal dos combustíveis renováveis. Secretaria de petróleo, gás natural e combustíveis renováveis - Departamento de combustíveis renováveis. Edição nº92 – Setembro/2015.

MME - Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis.. Ed. Nº106. Dezembro, 2016.

MOHAMMADI, P.; Nikbakht, A. M.; Tabatabaei, M.; Farhadi, K.; Mohebbi, A.; Mehdi Khatami far. Experimental investigation of performance and emission characteristics of

DI diesel engine fueled with polymer waste dissolved in biodiesel-blended diesel fuel, Energy 46 (2012) 596-605.

MURPHY, Fionnuala ; DEVLIN, Ger ; DEVERELL, Rory; MCDONNELL, Kevin. Potential to increase indigenous biodiesel production to help meet 2020 targets – An EU perspective with a focus on Ireland. Renewable and Sustainable Energy Reviews 35 (2014) 154–170.

NABI, Md. Nurun; RAHMAN, Md. Mustafizur; Akhter, Md. Shamim. Biodiesel from cotton seed oil and its effect on engine performance and exhaust emissions. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 2265–2270.

NALGUNDWAR, Ankur; Paul, Biswajit; Sharma, Sunil Kumar. Comparison of performance and emissions characteristics of DI CI engine fueled with dual biodiesel blends of palm and jatropha. Fuel 173 (2016) 172–179.

NEHA, Patni; CHINTAN, Bhomia; PALLAVI, Dasgupta and NEHA, Tripathi. Use of Sunflower and Cottonseed Oil to prepare Biodiesel by catalyst assisted Transesterification. Research Journal of Chemical Sciences. Vol. 3(3), 42-47, March (2013).

ÖZENER, Orkun; Levent Yüksek; Alp Tekin Ergenç; Muammer Özkan. Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics Vol. 115 (2012), 875-883,.

ÖZER, Can. Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture. Energy Conversion and Management 87 (2014) 676–686.

PEREIRA, J.C.. Motores Diesel e Geradores de Energia - Informações Técnicas. Disponível em: < <http://www.joseclaudio.eng.br/apost.html> >. Acesso em: agosto de 2016.

Plano Nacional de Agroenergia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Secretaria de Produção e Agroenergia EMBRAPA, 2006 – 2011.

REN 21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Disponível em: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf>. Acesso em: Dezembro de 2016.

SATHIYAGNANAM, A.P.; IAENG, Member; and Saravanan, C.G. . Experimental Studies on the Combustion Characteristics and Performance of A Direct Injection Engine Fueled with Biodiesel/Diesel Blends with SCR. Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol III. WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K. obtained from waste oils from the Turkish industry. Fuel 128 (2014) 288–295.

SINHA, Duple; MURUGAVELH, S. . Biodiesel production from waste cottonseed oil using low cost catalyst: Engineperformance and emission characteristics. Perspectives in Science (2016) 8, 237-240.

Valente, Osmano Souza, Vanya Márcia Duarte Pasa, Carlos Rodrigues Pereira Belchior, José Ricardo Sodré. Exhaust emissions from a diesel power generator fuelled by waste cooking oil biodiesel. Science of the Total Environment 431 (2012) 57–61.

XUE, Jinlin; Combustion characteristics, engine performances and emissions of waste edible oil biodiesel in diesel engine. Renewable and Sustainable Energy Reviews 23 (2013) 350–365.

YANG, Po-Ming;Yuan-Chung; LIN,; Kuang C. Syu-Ruei Jhang, ;Shang-Cyuan Chen,; Chia-Chi Wang,; Ying-Chi Lin. Comparison of carbonyl compound emissions from a diesel engine generator fueled with blends of n-butanol, biodiesel and diesel. Energy 90 (2015) 266 e 273.

YU MA, Mingming Zhu ; Zhang, Zhezi ; Zhang, Dongke. Effect of a homogeneous combustion catalyst on the nanostructure and oxidative properties of soot from biodiesel combustion in a compression ignition engine. Proceedings of the Combustion Institute 35 (2015) 1947–1954.

APÊNDICES A – CALIBRAÇÃO DE TERMOPARES

Esse apêndice apresenta as curvas de calibração dos termopares tipo T e tipo K, utilizados nas medições dos dados de temperatura do ambiente, ar de admissão, água do sistema de arrefecimento e gases de exaustão do gerador diesel.

Após ajustar o forno de calibração com uma determinada temperatura de referência, os registros das temperaturas médias dos termopares foram utilizados para a composição da curva de calibração termopares.

A tabela A.1 apresenta os dados de temperatura de referência fornecida pelo forno de calibração e dados de temperatura das medições efetuadas pelos termopares.

Tabela A.1. Indicação das temperaturas de referência e das temperaturas medidas com o uso dos termopares tipo T e K.

Forno de calibração (valores de referência)	Termopar tipo T	Forno de calibração (valores de referência)	Termopar tipo K
30	28,9	150	149,3
50	49,1	200	199,7
70	68,7	250	249,1
90	87,8	300	299,3
120	118,2	350	349,6

As etapas do processo de calibração utilizando o forno de calibração de termopares foram as seguintes:

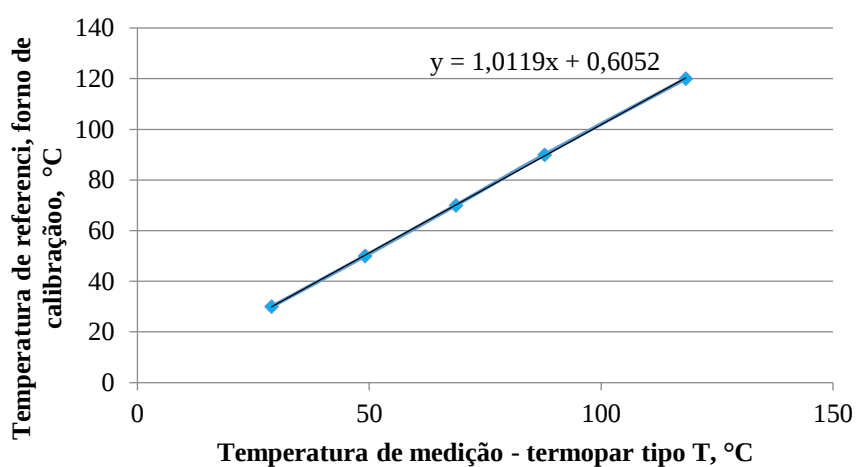
- a. Determinação dos termopares;
- b. Determinação dos comprimentos dos termopares;
- c. Confecção das terminações dos termopares (corte e junção dos fios com solda ponto);
- d. Introdução do terminal do lado da junção dos termopares, nos cadinhos do forno de calibração;
- e. Conexão dos terminais de cobre e constantan dos termopares ao sistema de aquisição de dados (logger);
- f. Determinação do intervalo de tempo para registro dos dados de temperatura;

g. Estabelecimento do número de dados em triplicata para realização de estatísticas;

h. Leitura e registro simultâneos dos dados de temperatura obtidos dos termopares e forno de calibração;

i. Levantamento da curva de calibração dos dados de temperatura dos termopares em função dos valores obtidos no forno de calibração, através do uso do programa Excel.

Calibração do termopar tipo T



Calibração do termopar tipo K

