

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

MARCOS MORESCO SMANIOTTO

**ANÁLISE DE UM MOTOR CICLO DIESEL OPERANDO COM BIODIESEL
ADITIVADO COM NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO**

CAXIAS DO SUL

2023

MARCOS MORESCO SMANIOTTO

**ANÁLISE DE UM MOTOR CICLO DIESEL OPERANDO COM BIODIESEL
ADITIVADO COM NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial para a obtenção do título de Engenheiro
Mecânico.

Área de Concentração: Engenharia Térmica

Orientador: Prof. Dr. Giovani Dambros Telli

CAXIAS DO SUL

2023

MARCOS MORESCO SMANIOTTO

**ANÁLISE DE UM MOTOR CICLO DIESEL OPERANDO COM BIODIESEL
ADITIVADO COM NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial para a obtenção do título de Engenheiro
Mecânico.

Área de Concentração: Engenharia Térmica

Orientador: Prof. Dr. Giovani Dambros Telli

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Josimar Souza Rosa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense - IFSul

RESUMO

O presente trabalho propôs analisar experimentalmente o desempenho e emissões gasosas de um motor de combustão interna ciclo Diesel, operando com misturas de biodiesel com nanopartículas de óxido de alumínio. Devido a crescente preocupação com a degradação do meio ambiente e deterioração da atmosfera, busca-se amenizar os efeitos nocivos à natureza vinculados ao uso de combustíveis fósseis. Ainda assim, espera-se que com a aditivação do biodiesel, alguns problemas desse biocombustível, como a menor eficiência da combustão e o maior consumo poderão ser aprimorados, o que impedem que ele substitua integralmente o óleo diesel. Estudos realizados na área comprovam a eficácia desses aditivos ao biodiesel, havendo relatos de reduções bastante significativas nos índices de emissões gasosas e melhorias no desempenho dos motores. O motor utilizado nos ensaios foi do fabricante Agrale, modelo M90, monocilíndrico, de injeção direta, em sua configuração original. Para dar suporte energético, um gerador elétrico trifásico foi montado junto ao motor. A temperatura dos gases de escape foi medida através de um termopar tipo K. Um analisador de gases possibilitou a análise dos níveis de gases produzidos da combustão, como os índices de oxigênio, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. O consumo de combustível foi avaliado através da leitura da massa de combustível que ia reduzindo no reservatório durante o tempo de operação do motor. Concentrações de 50, 100 e 150 ppm de óxido de alumínio foram utilizadas nas misturas. Para adequada homogeneização dessas misturas, foi utilizado o método de ultrassom. Durante os testes, foram monitoradas a potência e frequência do motor, e a temperatura dos gases de exaustão. Foram analisados os parâmetros de eficiência, consumo de combustível e emissões de gases de escape. Os valores obtidos foram comparados com o desempenho e emissões do motor movido a óleo diesel S500 e biodiesel B100. Foram constatados resultados satisfatórios para a redução nas emissões de CO, CO₂ e NO_x, aumento da eficiência do combustível, além da redução do consumo de combustível.

Palavras-chave: Motor de combustão interna; Emissões de gases; Óleo diesel; Biodiesel; Nanopartículas.

ABSTRACT

The present work proposed to experimentally analyze the performance and gaseous emissions of a diesel cycle internal combustion engine, operating with mixtures of biodiesel and aluminum oxide nanoparticles. Due to the growing concern about environmental degradation and deterioration of the atmosphere, a mitigation of the harmful effects on nature linked to the use of fossil fuels is needed. However, it is expected that with the addition of biodiesel, some problems with this biofuel, such as lower combustion efficiency and higher consumption, can be improved, which prevent it from fully replacing diesel oil. Studies carried out in the area prove the effectiveness of these additives on biodiesel, with reports of very significant reductions in gaseous emission rates and improvements in engine performance. The engine used in the tests was from the manufacturer Agrale, model M90, single cylinder, direct injection, in its original configuration. To provide energy support, a three-phase electrical generator was mounted next to the engine. The exhaust gas temperature was measured using a type K thermocouple. A gas analyzer made it possible to analyze the levels of gases produced from combustion, such as levels of oxygen, nitrogen oxides, carbon monoxide, and carbon dioxide. Fuel consumption was evaluated by measuring the mass of fuel that was reduced in the tank during the engine's operating time. Concentrations of 50, 100 and 150 ppm of aluminum oxide were used in the mixtures. For adequate homogenization of these mixtures, the ultrasound method was used. During the tests, engine power and frequency and exhaust gas temperature were monitored. The efficiency, fuel consumption, and exhaust gas emissions parameters were analyzed. The values obtained were compared with the performance and emissions of the engine powered by S500 diesel oil and B100 biodiesel. Satisfactory results were found for reducing CO, CO₂, and NO_x emissions, increasing fuel efficiency, in addition to reducing fuel consumption.

Keywords: Internal combustion engine; Gas emissions; Diesel oil; Biodiesel; Nanoparticles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos Motores Térmicos	14
Figura 2 – Motor quatro tempos	15
Figura 3 – Motor dois tempos	16
Figura 4 – Comprimento da cadeia carbônica X Temperatura de autoignição	22
Figura 5 – Reação de transesterificação do biodiesel com metanol	28
Figura 6 – Evolução brasileira na produção de biodiesel (B100) entre 2011 e 2020.....	29
Figura 7 – Etapas do trabalho	35
Figura 8 – Esquema de montagem do sistema	36
Figura 9 – Motor diesel Agrale M90	37
Figura 10 – Gerador de energia Kohlback	38
Figura 11 – Analisador de energia Embrasul	39
Figura 12 – Analisador de gases Optima7	41
Figura 13 – Misturador ultrassônico Hielscher	42
Figura 14 – Frasco de nanopartículas de Al_2O_3	43
Figura 15 – Balança de precisão Shimadzu.....	44
Figura 16 – 50 ppm de alumina e 50 ml de biodiesel.....	45
Figura 17 – Inserção do Becker no misturador ultrassônico	46
Figura 18 – Adição da mistura em Becker de 1000 ml	47
Figura 19 – Aspecto das amostras	47
Figura 20 – Analisador de estabilidade	48
Figura 21 – Cubetas com amostras.....	49
Figura 22 – TSI do Biodiesel + Al_2O_3	54
Figura 23 – TSI do Óleo diesel + Biodiesel + Al_2O_3	55
Figura 24 – Comparação do TSI de todas as amostras.....	56
Figura 25 – Eficiência dos combustíveis.....	57
Figura 26 – Consumo específico de combustível.....	58
Figura 27 – Temperatura dos gases de exaustão	59
Figura 28 – Emissões de O_2	61
Figura 29 – Emissões de CO_2	62
Figura 30 – Emissões de CO	63
Figura 31 – Emissões de NO_x	64
Figura 32 – Excesso de ar.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de inflamabilidade para gasolina e óleo diesel	23
Tabela 2 – PCI e densidade dos combustíveis.....	24
Tabela 3 – Propriedades Diesel S10 e S500	26
Tabela 4 – Matérias-primas para produção de biodiesel	29
Tabela 5 – Especificações do motor Agrale	38
Tabela 6 – Especificações do gerador Kohlback.....	39
Tabela 7 – Características do biodiesel adquirido	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	MOTIVAÇÃO	12
1.3	OBJETIVO GERAL	13
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	14
2.2	PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS DOS MOTORES	17
2.2.1	Potência indicada	17
2.2.2	Potência efetiva	18
2.2.3	Potência absorvida pela resistência passiva	18
2.2.4	Rendimeto mecânico	19
2.3	COMBUSTÃO EM MOTORES	19
2.3.1	Relação ar-combustível	20
2.3.2	Octanagem	20
2.3.3	Cetanagem	21
2.3.4	Limites de inflamabilidade	22
2.3.5	Temperatura adiabática de chama	23
2.3.6	Poder calorífico	24
2.4	COMBUSTÍVEIS	24
2.4.1	Óleo diesel	25
2.4.2	Biodiesel	27
2.4.3	Óxido de alumínio	31
2.4.4	Óxido de grafeno como aditivo alternativo	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	36
3.1.1	Motor	36
3.1.2	Gerador de energia	38
3.1.3	Analisador de energia	39
3.1.4	Carga elétrica	40

3.1.5	Termopar.....	40
3.1.6	Analizador de gases	40
3.1.7	Aquisição dos dados de consumo de combustível.....	41
3.1.8	Misturador ultrassônico.....	42
3.1.9	Biodiesel para mistura	43
3.1.10	Nanopartículas de Al₂O₃	43
3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	44
3.2.1	Preparação das misturas.....	44
3.2.2	Teste de estabilidade das misturas	48
3.2.3	Testes no laboratório de motores	50
3.2.4	Interpretação dos dados coletados	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	ESTABILIDADE DAS MISTURAS	53
4.2	EFICIÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS	56
4.3	CONSUMO ESPECÍFICO de combustível	58
4.4	TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO	59
4.5	ANÁLISE DE EMISSÕES	60
4.5.1	Emissões de O₂	60
4.5.2	Emissões de CO₂	61
4.5.3	Emissões de CO.....	62
4.5.4	Emissões de NO_x.....	63
4.6	EXCESSO DE AR	65
5	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos, os seres humanos buscam aprimorar suas técnicas para a realização do trabalho e substituição da força braçal ou animal. O fogo, a roda, a prensa móvel, a eletricidade, o automóvel, o motor, o avião, são alguns dos maiores exemplos.

No século XVIII, a humanidade vivenciou o marco da Primeira Revolução Industrial que trouxe inúmeras transformações e que delineou sua trajetória a partir de então. Devido à disseminação dos povos pelo planeta, juntamente com o desenvolvimento tecnológico, houve uma grande expansão do setor produtivo global. A necessidade do transporte longínquo de cargas e pessoas fez emergir um novo ciclo de consumo de energia. Dessa forma, variadas fontes de energia começaram a ser exploradas, a fim de tornar as máquinas e equipamentos mais eficazes para atenderem às demandas (PEREIRA, 2019).

Naquele período, James Watt aperfeiçoou a máquina a vapor de Thomas Newcomen, de 1698. O que ambos não imaginariam, é que seus modelos serviriam de base para o desenvolvimento de complexos motores como os existentes atualmente, dentre eles, destacam-se os motores de combustão interna, como o ciclo Diesel, Otto, Atkinson, entre outros.

Indiscutivelmente, os motores de combustão interna são largamente utilizados para as mais diversas funções do dia a dia, principalmente os motores de ignição por centelha (ciclo Otto), movidos a gasolina, e os de ignição por compressão (ciclo Diesel), movidos a óleo diesel. Os motores ciclo Diesel merecem destaque por possuírem, na grande maioria, eficiências energéticas superiores. Isso se explica pelo fato de atingirem pressões de trabalho mais elevadas, logo, maiores temperaturas de combustão, convertendo maiores quantidades de energia em trabalho (BERTUOL, 2014).

Conforme citado anteriormente, existem motores movidos a gasolina e outros movidos a diesel. Porém, existem outros modelos, alimentados por diferentes tipos de combustíveis, como etanol e gás natural, por exemplo. Cada combustível com suas particularidades energéticas, conferindo diferentes níveis de potência, consumo, eficiência e emissões de gases.

Em termos de emissões gasosas, uma pauta muito discutida atualmente são os impactos ambientais (gases poluentes e gases de efeito estufa) e sociais (intoxicações e doenças) causados pela queima de combustíveis fósseis. São denominados combustíveis fósseis, os recursos naturais não renováveis, como o gás natural, carvão mineral, derivados do petróleo (óleo diesel e gasolina), entre outros.

Os principais produtos da queima do óleo diesel são os hidrocarbonetos (C_xH_y), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e dióxido de enxofre (SO_2), e que são

considerados muito prejudiciais, não só ao meio ambiente, mas também à saúde humana. O enxofre, por exemplo, é o causador da chuva ácida que, por sua vez, contamina o solo e a água, prejudicando o desenvolvimento das formas de vida associadas a eles. Além disso, complicações cardíacas e pulmonares que afetam sobretudo crianças, idosos e portadores de doenças respiratórias, estão diretamente atreladas à poluição por esses elementos (CNT, 2012).

Neste contexto, é de suma importância que medidas sejam tomadas para reduzir os impactos ambientais causados pelas emissões dos gases poluentes e pela exploração de fontes não renováveis. Algumas medidas estão sendo tomadas, com o apoio da comunidade científica, que concentra forças na pesquisa de combustíveis provenientes de fontes renováveis e com a mínima agressão possível ao meio ambiente, os chamados biocombustíveis. Compreende-se como fonte renovável, todo recurso que conforme utilizado, não excede sua taxa de reposição na natureza (DOVICH FILHO, 2022).

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP), os biocombustíveis apresentam taxas de emissões de poluentes menores e são oriundos da biomassa renovável disponível no país, seja ela vegetal ou animal. O etanol, proveniente da cana-de-açúcar, e o biodiesel, proveniente de óleos vegetais, são os dois principais biocombustíveis produzidos pelo Brasil (ANP, 2021a).

O biodiesel, por não ser necessária nenhuma adaptação nos motores a diesel convencionais para sua utilização, tem se mostrado uma boa alternativa para substituir os combustíveis originados do petróleo. No entanto, o biodiesel puro, como é o caso do tipo B100, principalmente quando usado por um longo tempo, pode ocasionar o mau funcionamento do motor. Para minimizar os problemas, recentes estudos têm comprovado a eficácia do óxido de alumínio como aditivo.

Anchupogu, Rao e Banavathu (2018) estudaram nanopartículas de óxido de alumínio misturadas ao biodiesel B20 e concluíram que é possível reduzir a opacidade da fumaça, além de reduzir significativamente emissões de CO, NO_x e hidrocarbonetos. Já Sharma et al. (2022), utilizaram diferentes concentrações de óxido de alumínio misturadas ao biodiesel e constataram aumento expressivo no desempenho do motor e na eficiência do combustível. Ainda assim, obtiveram reduções no consumo específico de freio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e nos níveis de opacidade de fumaça. Em suma, esses aditivos proporcionaram melhoria geral no desempenho e na redução de emissões de gases poluentes.

Diante do exposto, a proposta deste trabalho é estudar o comportamento do motor, com biodiesel e aditivos de nanopartículas de óxido de alumínio, aplicados em um motor ciclo Diesel. Essas nanopartículas, conferem um grau superior de inovação ao projeto, pois ainda

fazem parte de pesquisas recentes da comunidade científica. Serão analisados índices de potência, eficiência, consumo e emissões de gases.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em virtude das perceptíveis alterações climáticas, ocasionadas essencialmente pela poluição, e devido a matriz energética global estar sofrendo repentina transformação, observa-se uma persistente busca por fontes renováveis. Para o século XXI, a sociedade possui um importante desafio, que é assegurar um futuro energético sustentável, pois aspectos sociais, tecnológicos, econômicos e políticos são intrínsecos ao progresso e a exploração de bens naturais (HOSENUZZAMAN *et al.*, 2015; H. LIU *et al.*, 2022 apud ARAÚJO *et al.*, 2022). De acordo com Bondarik, Pilatti e Horst (2018, p. 686), existem alternativas que podem contribuir com a sustentabilidade energética, como o aproveitamento da biomassa e o desenvolvimento de seus biocombustíveis, como o carvão e o gás natural, criação de parques eólicos e solares, exploração da energia das marés, sistemas de cogeração e de geração híbridos.

Dentre os biocombustíveis, o biodiesel tem assumido maior notoriedade nos últimos tempos, pois tem se mostrado como ótima alternativa para substituir o óleo diesel utilizado nos veículos automotores. Além disso, apresenta-se como um dos biocombustíveis com grande potencial sustentável, com características biodegradáveis, com baixa emissão de poluentes e gases de efeito estufa (DUARTE *et al.*, 2022).

A produção de biodiesel no Brasil obteve um grande salto entre os anos de 2009 (1,61 milhão de m³) e 2018 (5,35 milhões de m³), representando uma variação em torno de 330%. Nesse período, em média, houve um crescimento de 13% ao ano, tendo como principal matéria prima, o óleo de soja. Esse expressivo avanço foi proporcionado pelo incentivo governamental, o qual decretou, a partir de 2008, a obrigatoriedade de um percentual de biodiesel misturado ao diesel (GUIDUCCI; LAVIOLA, 2019). O Diário Oficial da União publicou no dia 29 de março de 2023, que a partir de 1º de abril do mesmo ano, valerá o percentual de 12%. Para o próximo ano, em 2024, será 13%, seguindo sucessivamente, até atingir em 2026, o percentual de 15% (DOU, 2023).

A utilização de biodiesel puro em motores de combustão interna mostra-se viável, porém quando operados por extensos períodos, como é o caso dos caminhões que trafegam por milhares de quilômetros, os motores podem apresentar mau funcionamento. Segundo Santos (2007), algumas propriedades físicas dos óleos vegetais, como a alta viscosidade, a baixa

volatilidade e a grande variação no número de cetano, podem acarretar uma combustão incompleta desses óleos. Além disso, as moléculas de óleos vegetais contêm glicerina, e quando usados sem nenhuma alteração, podem ocasionar carbonização e depósitos nos bicos injetores, acelerado desgaste dos pistões, ineficiência térmica, dentre outros problemas.

Pensando nisso, alternativas vêm sendo buscadas na tentativa de eliminar os problemas anteriormente referidos. Estudar o óxido de alumínio como aditivo ao biodiesel, o qual é potencialmente redutor de poluentes, é uma das soluções que estão sendo exploradas. Sendo assim, se faz necessário o presente estudo para compreender os efeitos desse aditivo sobre os biocombustíveis e analisar o comportamento dos motores de combustão interna, bem como fomentar a bibliografia, já que o tema ainda é objeto de pesquisas recentes.

1.2 MOTIVAÇÃO

No dia 15 de novembro de 2022, o planeta atingiu a marca de 8 bilhões de habitantes. Um importante marco para a humanidade, que ao longo dos anos vem evoluindo em soluções de saúde pública, reduzindo a pobreza e as taxas de mortalidade materna e infantil. Reflexos disso, são o aumento da qualidade e expectativa de vida da população. Por outro lado, há o grande desafio de equilibrar a relação entre o crescimento populacional e o desenvolvimento sustentável. Projeções apontam que durante a década de 2080, a Terra alcançará 10,4 bilhões de indivíduos. O acelerado crescimento demográfico prejudica o combate das mazelas sociais, como a pobreza, fome, desnutrição e dificulta a ampliação dos sistemas de saúde e educação (UNFPA, 2022).

Ademais, a constante preocupação com a sustentabilidade, abrange também o compromisso em delinear um futuro com condições ambientais minimamente favoráveis à vida, sendo que graves intempéries climáticas já são realidade. O derretimento das geleiras, o acelerado aumento dos níveis oceânicos, a devastação dos habitats naturais da fauna e da flora, os eventos climáticos violentos, como calor ou frio extremos, devastadores ciclones e chuvas irregulares são alguns dos efeitos das observáveis mudanças climáticas que vêm acontecendo (PIRES, 2019). Não obstante, os fenômenos meteorológicos extremos são sentidos em escala mundial, no qual são mais intensificados nos países em desenvolvimento, sendo que dispõem de menos recursos financeiros para investirem em planos de adaptação (OLIVEIRA, 2019).

Portanto, a ciência investiga meios que possam suprir as demandas do mundo globalizado, de forma menos severa ao meio ambiente. Com o intuito de suceder

gradativamente os combustíveis fósseis, os biocombustíveis são um dos meios encontrados para frear o aquecimento global e o efeito estufa, garantindo assim, maior prosperidade das gerações futuras.

Os aspectos já citados servem de motivação para a realização deste trabalho. No mesmo contexto, compreender o comportamento do biodiesel em motores é essencial para o desenvolvimento de novas tecnologias vinculadas ao tema. Através da mistura de óxido de alumínio ao biodiesel, pretende-se melhorar suas propriedades, como a baixa eficiência e o maior consumo em comparação ao óleo diesel, as quais o impede de ser utilizado em larga escala. A aditivação propicia a catalisação do processo de combustão, melhora na eficiência térmica do motor, reduções no consumo de combustível e emissões de poluentes. Com isso, acredita-se que ótimos resultados serão encontrados para balancear os níveis de poluição atmosférica e da degradação dos ecossistemas.

1.3 OBJETIVO GERAL

Analisar o desempenho e as emissões de um motor ciclo Diesel movido a biodiesel com aditivo de óxido de alumínio e realizar uma comparação com os resultados obtidos da utilização do óleo diesel e biodiesel convencionais.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

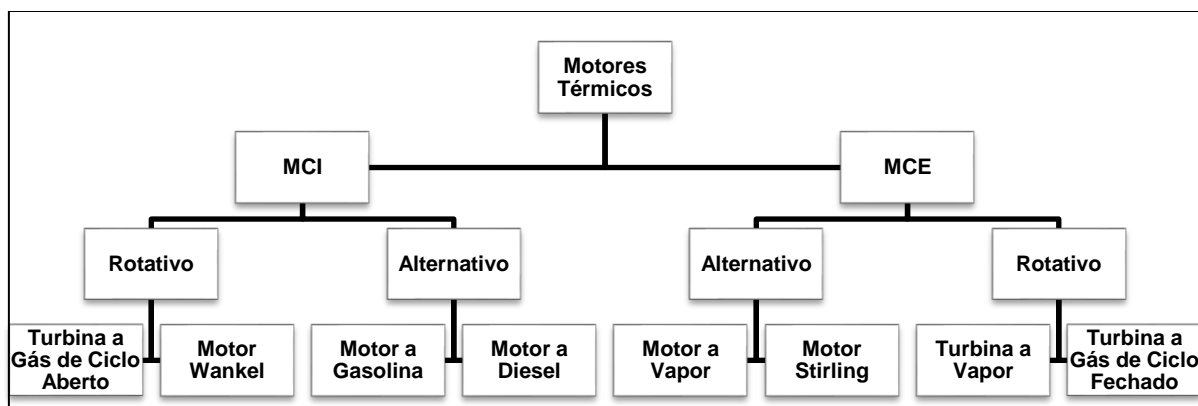
- a) Utilizar óleo diesel e biodiesel aditivados com óxido de alumínio como combustíveis em motor ciclo Diesel de bancada de testes em laboratório;
- b) Preparar os combustíveis a serem utilizados e verificar o seu grau de estabilidade (diesel e biodiesel com adição de óxido de alumínio);
- c) Avaliar a potência, eficiência, consumo e emissões de gases de escape para os diferentes combustíveis testados;
- d) Confrontar os resultados obtidos dos combustíveis utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Por definição, motores são equipamentos capazes de converter uma forma de energia em outra. Geralmente, os motores usam da energia térmica (originada da energia química dos combustíveis) para a geração de energia mecânica, por isso podem ser denominados como motores térmicos. Esses, podem ser amplamente classificados em dois grupos, sendo os Motores de Combustão Interna (MCI) e os Motores de Combustão Externa (MCE). Como os próprios nomes sugerem, a queima do combustível ocorre internamente no motor para os MCIs e externamente para os MCEs. Ainda assim, esses dois grupos podem ser divididos em dois tipos, os Motores Rotativos e os Motores Alternativos, que também possuem suas subdivisões (GANESAN, 2012). Conforme a Figura 1, essa classificação pode ser observada com maior detalhe.

Figura 1 – Classificação dos Motores Térmicos



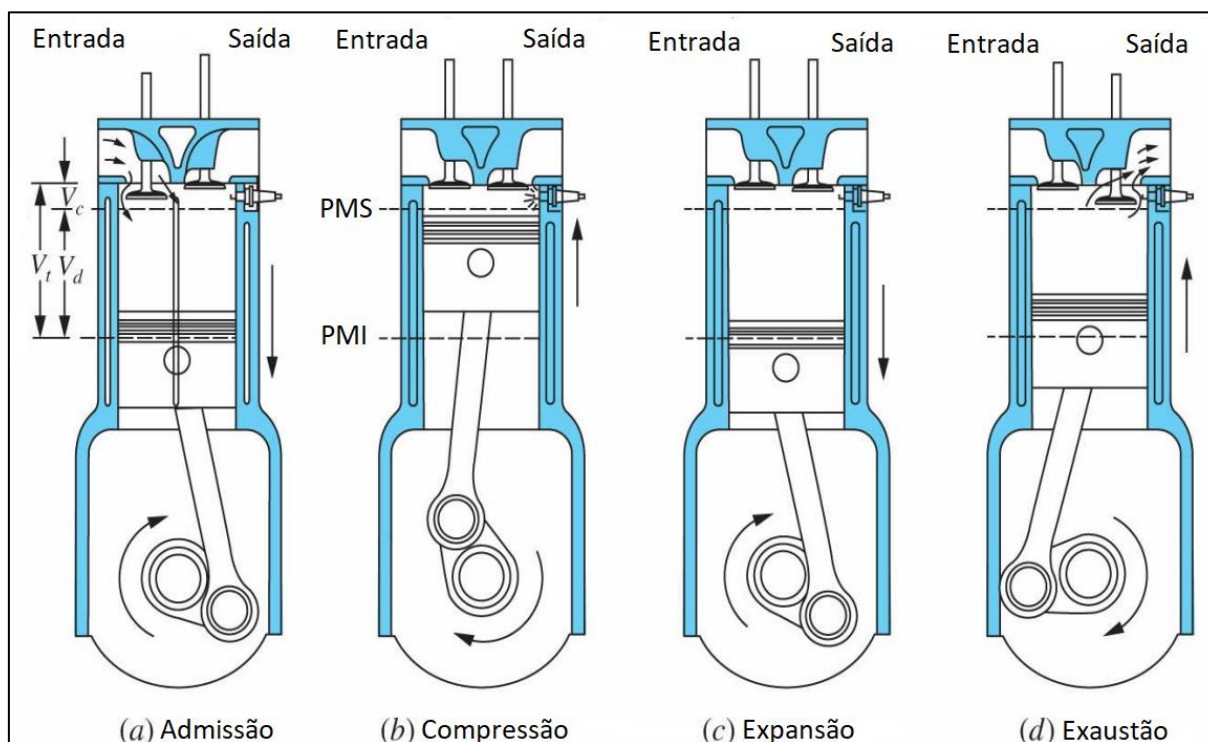
Fonte: adaptado de Ganesan, (2012).

De acordo com Stone (2012), existem dois tipos principais de motores a combustão interna, os motores de ignição por centelha, no qual a combustão é ocasionada por uma faísca, e os motores de ignição por compressão, que com o aumento da pressão e temperatura durante o tempo de compressão do cilindro são suficientes para iniciar a combustão de forma espontânea. Para tanto, associa-se aos motores de ignição por centelha, os movidos a gasolina (ciclo Otto), e aos motores de ignição por compressão, os movidos a diesel (ciclo Diesel).

Brunetti (2018) se refere a essas características pelas siglas MIF (Motores de Ignição por Faísca ou Otto) e MIE (Motores de Ignição Espontânea ou Diesel).

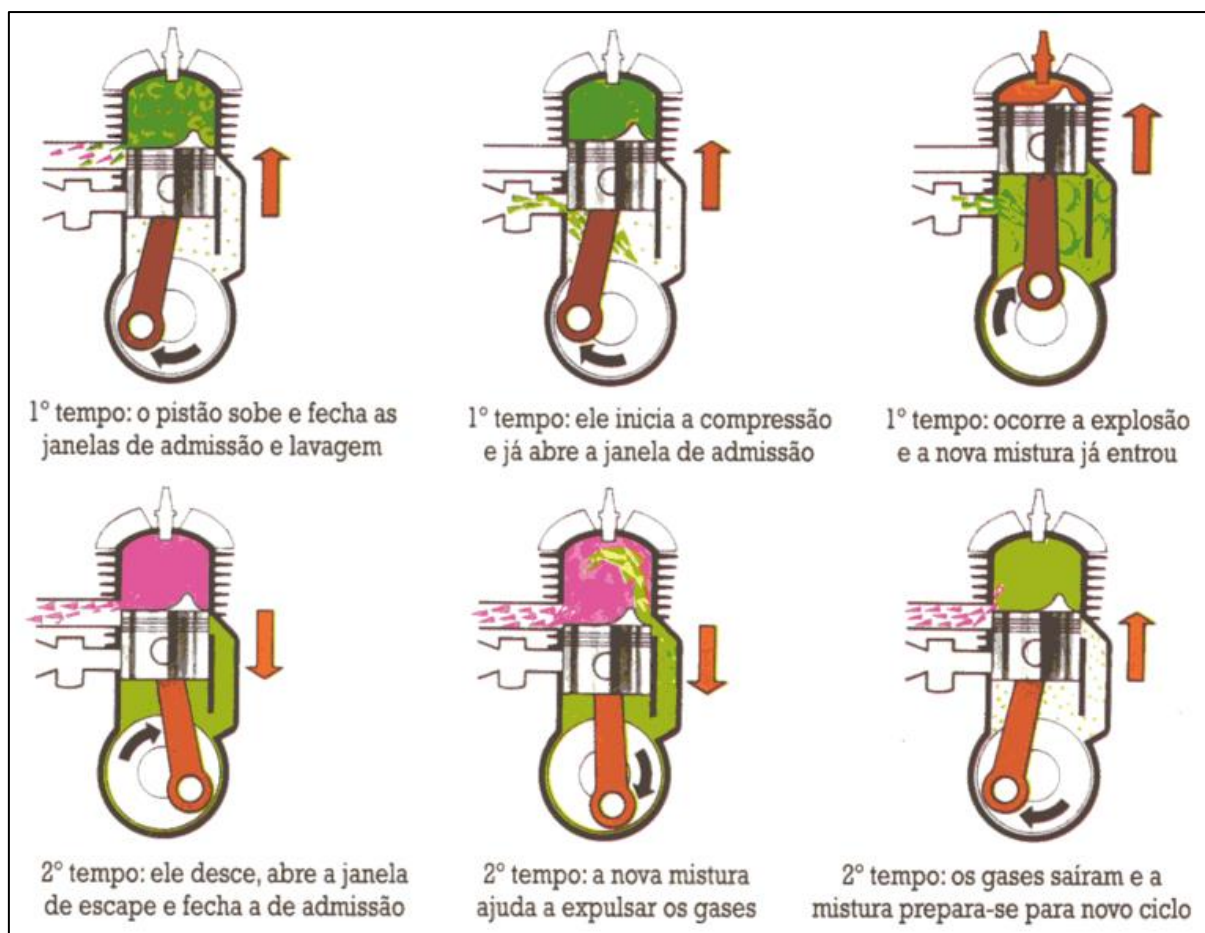
Durante cada volta completa do virabrequim, há dois estágios do pistão, o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI). O motor poderá exercer um ciclo completo com apenas uma rotação do virabrequim, sendo denominado motor dois tempos, ou duas rotações do virabrequim, sendo denominado motor quatro tempos. Entende-se por ciclo, os estágios de admissão, compressão, expansão e exaustão. Estes dois últimos, também podem ser comumente chamados de explosão e escape, respectivamente. Ambos os tipos de motores (Otto ou Diesel) podem operar em dois ou quatro tempos. Nas Figuras 2 e 3, tem-se a representação desses estágios.

Figura 2 – Motor quatro tempos



Fonte: adaptado de Heywood (2018).

Figura 3 – Motor dois tempos



Fonte: Martinelli Júnior (2001).

Brunetti (2018) explica a admissão, compressão, expansão e escape de um motor quatro tempos, conforme descrito a seguir:

Admissão: neste estágio, o pistão realiza o deslocamento do PMS para o PMI, com a válvula de admissão aberta permitindo o fluxo da mistura ar-combustível (para os MIF) ou apenas ar (para os MIE) para dentro do cilindro.

Compressão: com a válvula de admissão fechada, inicia-se o tempo de compressão, que o pistão se movimenta do PMI ao PMS para comprimir a mistura ar-combustível ou apenas ar. No caso dos MIE, o ar é aquecido graças ao aumento de pressão, que deve ser suficiente para exceder a temperatura de autoignição (TAI) do combustível injetado.

Expansão: quando o tempo de compressão estiver completo, para o MIF é gerada uma centelha pela vela de ignição, ocasionando o início da combustão da mistura ar-combustível, deslocando o pistão do PMS para o PMI. Para o MIE, basicamente o mesmo processo acontece,

com a diferença que, ao invés de ser gerada uma faísca, é injetado o combustível junto ao ar aquecido, iniciando a combustão.

Escape: esta é a última fase para a execução de um ciclo completo. Com a válvula de escape aberta, os gases oriundos da queima do combustível são exalados do cilindro. O movimento acontece do PMI em direção ao PMS. Posteriormente, inicia-se novamente o tempo de admissão para realizar um novo ciclo, dessa forma, estabelecendo o funcionamento do motor.

2.2 PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS DOS MOTORES

Propriedades fundamentais relacionadas aos motores de combustão interna estão ligadas a potência, rendimento mecânico, consumo e emissões de gases.

A potência em motores pode ser classificada em três categorias distintas que estão relacionadas entre si. Essa classificação se refere a potência indicada, potência efetiva e a potência absorvida pela resistência passiva (GIACOSA, 1970). Além disso, o rendimento mecânico, o consumo de combustível e a emissão de gases, são outros parâmetros essenciais a serem explorados.

2.2.1 Potência indicada

A potência indicada se resume pela energia química total do combustível que é transformada em trabalho. Essa potência pode ser expressa pelo trabalho produzido dentro da câmara de combustão, exercido pelas variações contínuas de pressão dentro do cilindro. O trabalho indicado W_i é o resultado da pressão constante teórica aplicada sobre a área do pistão durante seu curso (GIACOSA, 1970). Este trabalho pode ser representado pela Equação 1.

$$W_i = \frac{\pi \times D^2}{4} \times p_i \times L \quad (1)$$

Sendo $\frac{\pi \times D^2}{4}$, a área do pistão em m^2 ; p_i , a pressão média indicada em Pa; L o curso do pistão em metros que, quando multiplicado pela área do pistão, resulta no volume unitário do cilindro V_p , em m^3 ;

Como os motores quatro tempos executam um ciclo completo quando o virabrequim conclui duas voltas, e como o número de rotações é representado por n em rpm e o número de cilindros expressado por i (sendo a cilindrada total equacionada por $V = Vp \times i$), a potência indicada (P_i) pode ser denominada pela Equação 2, em kW.

$$P_i = \frac{V \times p_i}{2} \times \frac{n}{60} \quad (2)$$

2.2.2 Potência efetiva

Também chamada de potência de freio, a potência efetiva é medida no eixo de saída do motor com o auxílio de um freio dinamométrico (GIACOSA, 1970). Pela Equação 3, é possível obter a potência efetiva (P_e) em kW.

$$P_e = \frac{T \times \omega}{1000} = \frac{T \times 2 \times \pi \times n}{1000} \quad (3)$$

Sendo T , o torque em Nm; ω , a velocidade angular em rad/s; n , a rotação em rps.

2.2.3 Potência absorvida pela resistência passiva

Esta potência é responsável por vencer o atrito existente entre as partes mecânicas do sistema que estão em movimento, bombear fluido e acionar as diversas partes que compõem o motor, como as bombas de água e óleo, entre outras (GIACOSA, 1970).

Através de uma força externa aplicada ao eixo do motor, sem que ele esteja acionado, pode-se determinar sua resistência ao atrito e, dessa forma, encontrar a potência absorvida pela resistência passiva (TURMINA, 2018).

Em suma, a potência absorvida pela resistência passiva (P_p) pode ser obtida pela subtração entre as potências indica (P_i) e efetiva (P_e), conforme a Equação 4.

$$P_p = P_i - P_e \quad (4)$$

2.2.4 Rendimento mecânico

O rendimento mecânico (η_m) dos MCIs tem relação direta com as perdas por atrito das partes móveis e a inércia necessária para manter todos os componentes em funcionamento.

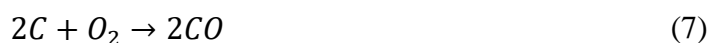
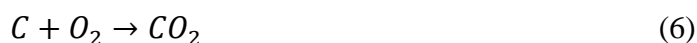
De acordo com Ganesan (2012), o rendimento mecânico pode ser entendido como a razão entre a potência efetiva e a potência indicada, conforme Equação 5, escrita abaixo.

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad (5)$$

2.3 COMBUSTÃO EM MOTORES

Segundo Costa (2007), a combustão é definida como sendo uma reação química onde um combustível é oxidado, liberando uma grande quantidade de energia. O agente oxidante (comburente) geralmente é o oxigênio contido no ar atmosférico, o qual possui, além do oxigênio, nitrogênio e argônio em sua composição. Em outras palavras, pode ser entendida como uma reação química que acontece entre os elementos do combustível, que se combinam com o oxigênio do ar, excitados por uma fonte de calor. Para Turns (2013), a combustão é responsável por converter a energia armazenada nas ligações químicas em energia térmica, cuja utilização abrange várias outras formas.

Garcia (2013) reforça que a combustão é a reação química entre o oxigênio e os constituintes de um combustível, acarretando a geração de calor e luz. Algumas reações básicas de combustão são mostradas nas equações a seguir, envolvendo a combustão de alguns elementos.



Proporções adequadas entre combustível e oxidante são muito importantes para estabelecer o comportamento da combustão, impactando nos produtos da queima, no desempenho, na temperatura de funcionamento do motor e no consumo de combustível (MARTINS, 2006). A estequiometria da combustão é responsável por determinar essas proporções ideais de mistura ar-combustível. Quando há excesso de ar, considera-se a mistura como pobre, em oposição, quando ocorre a falta de ar, a mistura é considerada como rica (GIACOSA, 1970).

2.3.1 Relação ar-combustível

Um parâmetro essencial para a combustão é a relação ar-combustível (λ), pois é ela que determina a mistura proporcional de ar necessária para a queima do combustível. Quando essa proporção é exata, cujo todo o combustível é queimado utilizando todo o ar disponibilizado, tem-se a denominação de mistura estequiométrica (MARTINS, 2006). O desempenho dos MCIs está diretamente vinculado à quantidade de ar admitido e retido no interior dos cilindros, sendo que, quanto maior a quantidade de ar admitido, maior será a quantidade de combustível adicionado para, posteriormente, ser oxidado (BRUNETTI, 2018).

Normalmente, as proporções da mistura não são exatas, podendo haver uma quantidade maior ou menor de ar fornecido à combustão. Fornecendo uma quantidade menor, haverá uma combustão incompleta, ocorrendo a geração de hidrocarbonetos nos produtos da queima. Mesmo se a carência de ar for diminuta, poderá ocasionar a união de uma pequena parcela de carbono ao oxigênio, formando monóxido de carbono (CO), invés de dióxido de carbono (CO₂). Quando a disponibilidade de ar for em excesso, também poderá acontecer a formação de CO, sendo a quantidade exata dependente do nível de mistura e de turbulência no processo de combustão (COSTA, 2007).

2.3.2 Octanagem

A octanagem ou número de octano é uma grandeza que representa a capacidade da mistura ar-combustível em resistir a autoignição durante a compressão. Este parâmetro é característico nos motores de ignição por centelha. A autoignição é responsável pela detonação (fator indesejável no ciclo Otto), a qual está relacionada com a combustão espontânea, fazendo

com que o combustível entre em combustão antes de ocorrer a centelha da vela de ignição (BRUNETTI, 2018).

Conforme Carvalho (2011), para resistir a altas pressões e temperaturas antes que ocorra a autoignição, a mistura ar-combustível precisará ter alta octanagem. Essa propriedade está vinculada ao tipo de hidrocarboneto presente no combustível. Tendo alta octanagem, a mistura poderá proporcionar ao motor melhorias no desempenho e no rendimento térmico.

De modo geral, os hidrocarbonetos que possuem maior resistência à detonação são aqueles que têm alta temperatura de autoignição, como os álcoois, compostos aromáticos e hidrocarbonetos leves (BRUNETTI, 2018).

2.3.3 Cetanagem

A cetanagem ou número de cetano é uma propriedade relativa aos motores de ignição por compressão. Pode ser definida como o fator que mede a qualidade de ignição do óleo diesel, influenciando na partida do motor, no funcionamento sob carga e nas emissões de gases (BRUNETTI, 2018).

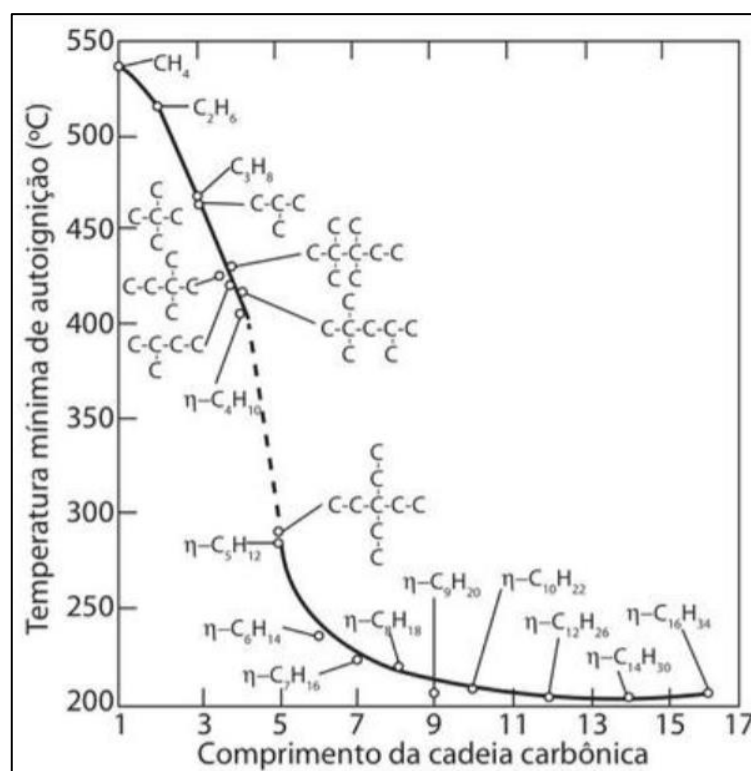
Segundo Heywood (2018), o método usado para a determinação da qualidade de ignição em termos do número de cetano é semelhante ao método utilizado para a obtenção da qualidade antidetonação da gasolina em termos do número de octano. Uma escala de referência do número de cetano é definida por dois hidrocarbonetos puros. O cetano (n-hexadecano $C_{16}H_{34}$, representado por n-cetano na Equação 12) com alta qualidade de ignição, ocupa o topo da escala com o número 100. E o iso-cetano (heptametil-nonano HMN, também $C_{16}H_{34}$) com muito baixa qualidade de ignição, ocupando o nível mais inferior da escala, com o número 15. O número de cetano (NC) pode ser calculado pela Equação 12.

$$NC = \text{percentual } n - \text{cetano} + 0,15 \times \text{percentual HMN} \quad (12)$$

Nos motores diesel, para que a mistura ar-combustível entre em autoignição sem a necessidade de uma centelha, a mistura deve ter temperatura alta o suficiente para que isso aconteça. Em outros termos, a autoignição está relacionada com a capacidade de fragmentação das moléculas da mistura, visando que quanto maior a tendência de fragmentação, maior será o número de cetano. A fragmentação por temperatura é mais passível em hidrocarbonetos de cadeia linear, sendo que se fragmentam em temperaturas mais baixas, promovendo

antecipadamente a combustão, se comparados ao estágio de ignição dos outros hidrocarbonetos (ramificados, olefínicos, cíclicos e aromáticos) (BRUNETTI, 2018). Conforme pode ser observado na Figura 4, quanto maior e mais linear for a cadeia carbônica, maior será a capacidade de fragmentação, devido a menor temperatura de autoignição.

Figura 4 – Comprimento da cadeia carbônica X Temperatura de autoignição



Fonte: Brunetti (2018).

De acordo com Martins (2006), um contraponto no aumento da cetanagem implica na redução do poder calorífico do combustível para gerar a mesma quantidade de energia. Dessa forma, seria interessante elevar o índice de cetano até certo valor, sem exceder, para que não haja o aumento no consumo de combustível.

2.3.4 Limites de inflamabilidade

A propagação da chama em uma mistura é ocasionada apenas em um intervalo de concentrações do combustível no ar. Tal intervalo é delimitado entre os chamados limites de inflamabilidade. A mistura mais pobre em que a chama pode se propagar, ou seja, com a mínima concentração de combustível, é o denominado limite de inflamabilidade inferior (LII). Já o

limite de inflamabilidade superior (LIS), com a máxima concentração de combustível, é representado pela mistura mais rica em que a chama irá atuar (TURNS, 2013).

Segundo Mannan (2005 apud RUOSO; CAETANO, 2018), os limites de inflamabilidade são influenciados por muitos fatores, dentre eles, pressão, temperatura, concentração de oxigênio, energia de ativação e direção de propagação da chama. Já para Alquati (2020), “o principal fator que determina os limites de inflamabilidade é a competição entre a taxa de geração de calor e a perda de calor pela chama para o meio externo.”

Valores típicos de limites de inflamabilidade, em percentual volumétrico no ar (% Vol.), para a gasolina e óleo diesel estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de inflamabilidade para gasolina e óleo diesel

Combustível	LII (%Vol.)	LIS (%Vol.)
Gasolina	1,3	7,1
Óleo Diesel	1,0	6,0
Biodiesel	Não disponível	Não disponível

Fonte: adaptado de Petrobras (2021a).

2.3.5 Temperatura adiabática de chama

Quando os produtos da queima atingem determinada temperatura e o processo de combustão acontece de forma adiabática (sem trocas de calor), tem-se a temperatura adiabática de chama. Nesta condição, não há geração de trabalho, nem variações de energia cinética ou potencial. De outra forma, a temperatura adiabática de chama corresponde a temperatura máxima atingida pelos reagentes da combustão. Para muitas aplicações, como em projetos de turbinas e motores, essa temperatura merece ser controlada, através da quantidade de excesso de ar mantido na mistura (COSTA, 2007).

Martins (2006) salienta que as emissões de poluentes estão diretamente atreladas a temperatura de chama, pois quanto maior ela for, níveis mais elevados de produção de NO_x estão propensos de acontecer. Temperaturas adiabáticas de chama menores podem ser obtidas por misturas pobres ou com a reutilização de gases queimados na combustão, sendo que a mesma quantidade de energia será fornecida para uma maior massa de gases.

2.3.6 Poder calorífico

Martins (2006) conceitua o poder calorífico como a quantidade de energia química disponível no combustível. Como os motores utilizam-se do volume de mistura ar-combustível, a melhor indicação para este parâmetro deve ser em base volumétrica, adotando-se a unidade de medida MJ/m^3 , mas também pode ser expresso em base mássica (MJ/kg ou kcal/kg). Em outras palavras, conforme Strey (2017), o poder calorífico pode ser entendido como a quantidade de calor liberada na queima de um combustível, em um processo estequiométrico, sendo então, o valor absoluto da entalpia de combustão (energia térmica envolvida na reação). Este parâmetro pode ser dividido em dois tipos, o poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico superior (PCS).

Devido ao fato de um dos produtos da combustão ser a água, o PCI pode ser delimitado como a quantidade de calor medida durante a queima quando a água se apresentar no estado gasoso. Todavia, quando a água gerada estiver no estado líquido, tem-se a quantidade de calor medida definida como PCS. Em vista disso, é possível constatar que a diferença entre esses dois tipos está exatamente na entalpia de vaporização da água proveniente da queima do hidrogênio contido no combustível (GARCIA, 2013).

Conforme salienta Giacosa (1970), para o uso em motores, o PCI deve ter maior relevância devido às altas temperaturas em que os gases da combustão são expelidos, impedindo que a água seja condensada para entrar em fase líquida.

Abaixo, encontra-se a Tabela 2, na qual estão relacionados os valores do PCI da gasolina, óleo diesel e do biodiesel, bem como os valores de suas respectivas densidades.

Tabela 2 – PCI e densidade dos combustíveis

Combustível	PCI (kJ/kg)	Densidade (t/m³)
Gasolina tipo A	43500	0,74
Gasolina tipo C	39300	0,75
Óleo Diesel	42200	0,84
Biodiesel B100	37600	0,88

Fonte: adaptado de ANP (2022a).

2.4 COMBUSTÍVEIS

Conforme Costa (2007), combustível pode ser entendido como uma substância que quando entra em combustão gera calor, energia e luz. Podem estar disponíveis nos estados

sólido, líquido ou gasoso. Como sólidos, os principais combustíveis naturais são a madeira e os produtos de sua decomposição, a turfa e o carvão. Os líquidos, majoritariamente obtidos a partir do petróleo e da biomassa, possuem vantagens sobre os sólidos, devido ao maior poder calorífico, facilidade e economia de armazenamento e melhor controle de seu consumo. Cita-se a gasolina, querosene, óleo diesel e os biocombustíveis (álcool e biodiesel) como os combustíveis líquidos mais notáveis. Sobre a matriz energética proveniente de combustíveis gasosos, tem-se o gás natural e o gás liquefeito de petróleo (GLP).

2.4.1 Óleo diesel

Utilizado nos motores ciclo Diesel e constituído principalmente por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos (contendo em menores parcelas, nitrogênio, enxofre e oxigênio) o óleo diesel é um combustível líquido derivado do petróleo. Sua formulação é dada pela mistura de gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, oriundos das diversas etapas do processamento do petróleo bruto (PETROBRAS, 2021b). Essas misturas são essenciais na produção do óleo diesel, que se dá por meio do processo de destilação fracionada durante o refino do petróleo. A nafta, a querosene e o gasóleo leve são obtidos em temperaturas que variam de 250°C a 350°C (CNT, 2012).

Uma das características mais importantes que se deve levar em consideração para este óleo é o índice de cetano (ou número de cetano), pois está relacionado a facilidade com a qual o diesel entrará em combustão espontânea (MARTINS, 2006). Níveis típicos dessa característica estão entre 40 e 55, em uma escala de 0 a 100. O número adequado de cetano pode ser alcançado pelo incremento de aditivos oxidantes, como o nitrato de alquila (HEYWOOD, 2018).

Conforme Stone (2012), outro fator relevante é a viscosidade, especialmente para aqueles combustíveis de qualidade inferior usados em motores maiores, nos quais muitas vezes é necessário manter as linhas de combustível aquecidas para garantir fluxo. Este autor ressalta também que, em locais com temperaturas mais baixas, outro problema é a precipitação dos componentes de alta massa molecular, podendo formar depósito ceroso. Isso se define pelo ponto de entupimento de filtro a frio.

Além disso, Heywood (2018) também considera outros parâmetros significativos. A relação ar-combustível, pois delimita as características da combustão. A densidade, pois os sistemas de injeção são projetados para fornecer determinado volume de combustível, tendo

relação com a viscosidade e a volatilidade. A volatilidade por sua vez, é definida por outros dois aspectos, a curva de destilação e o ponto de fulgor. O primeiro estabelece a vaporização do diesel dentro do cilindro, enquanto que o segundo, é a temperatura mínima em que o diesel deve ser aquecido para formar vapor inflamável na presença de uma chama. Algumas dessas propriedades do diesel S10 e S500, além de outras, estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades Diesel S10 e S500

Propriedade	Unidade	S10	S500
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas	
Cor	-	Tonalidades de amarelo, laranja ou marrom	Tonalidades de vermelho
Destilação (50% vol)	°C	245,0 a 295,0	245,0 a 310,0
Massa específica (a 20°C)	kg/m ³	815,0 a 850,0	815,0 a 865,0
Ponto de fulgor (mínimo)	°C		38
Viscosidade cinemática (a 40°C)	mm ² /s	2,0 a 4,5	2,0 a 5,0
Número de cetano (mínimo)	-	48	42
Teor de água (máximo)	mg/kg	200	500
Estabilidade à oxidação (máxima)	mg/100mL	2,5	Não informado
Inflamabilidade	-	Produto inflamável	
Poder calorífico inferior	kJ/kg		42200
Poder calorífico superior	kJ/kg		45000
Temperatura de auto-ignição	°C		225

Fonte: adaptado de Petrobras (2021b); Lima (2019).

O óleo diesel é largamente utilizado no setor de transporte, por caminhões, ônibus, navios, locomotivas, além de geradores, máquinas de grande porte e outras aplicações. Esse combustível é um produto inflamável, considerado mediano em toxicidade, com baixa volatilidade, sem material em suspensão, límpido e com odor característico (CNT, 2012). Os produtos originados pela sua combustão incluem o NO_x, SO₂ e CO, além de material particulado não queimado, todos nocivos para o meio ambiente (STREY, 2017).

Visando atender as novas exigências de emissões atmosféricas, os órgãos governamentais vêm estabelecendo restrições quanto a comercialização do óleo diesel. Em consonância a isso, para controlar o teor de enxofre na composição, foram criadas diferentes classificações, como o S10, S50, S500 e S1800. A partir do dia primeiro de janeiro de 2014,

tornou-se obrigatória a comercialização apenas do óleo diesel S10 e S500 (uso rodoviário), conduzida pela Resolução ANP nº 50 de 23/12/2013 (ANP, 2022b). O S10 é delimitado com 10 ppm (partes por milhão) de enxofre em sua composição, enquanto o S500 possui 500 ppm (a unidade ppm, significa mg de enxofre para cada kg de óleo diesel). O óleo diesel comercializado no Brasil está dividido em dois tipos: o óleo diesel A, obtido a partir do refino do petróleo e processamento de gás natural, sem adição de biodiesel; e óleo diesel B, com adição de biodiesel ao óleo diesel A, em teores estabelecidos por legislação (PETROBRAS, 2021b).

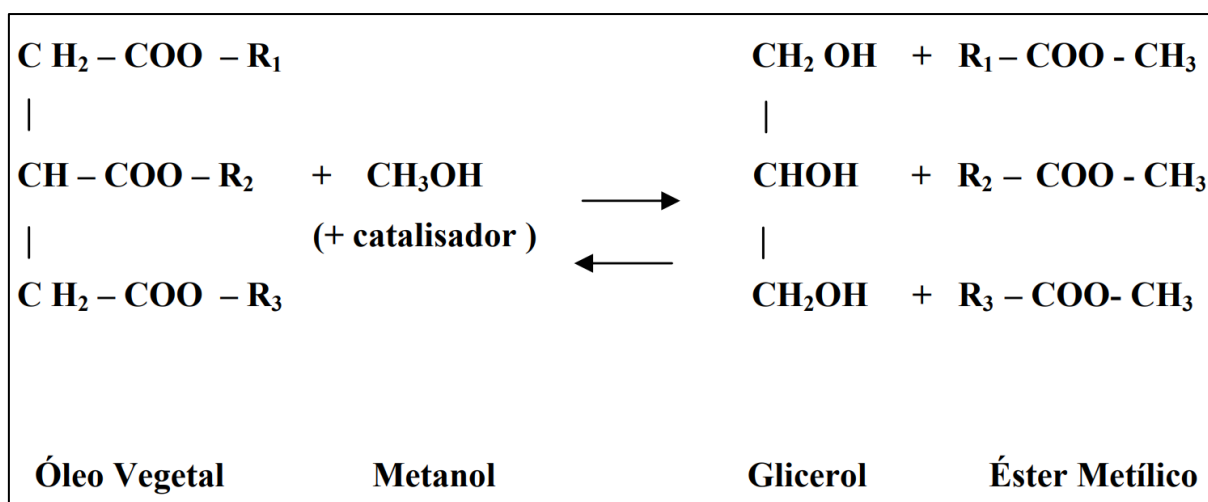
2.4.2 Biodiesel

O biodiesel é um combustível derivado da biomassa renovável, podendo ser produzido por diferentes processos como craqueamento, esterificação e outros. Comumente é obtido a partir da reação química de óleos e gorduras de origem animal e vegetal com álcool na presença de um catalisador (CNT, 2012). Contudo, o principal meio de se obter o biodiesel é a partir de um processo denominado transesterificação. Esse processo consiste na reação entre os triglicerídeos existentes nos óleos e gordura animal com um álcool primário (metanol ou etanol), originando dois produtos, o éster e a glicerina. Para a comercialização do éster como biodiesel, é preciso realizar sua purificação para adequá-lo às especificações de qualidade, estando então, disponível para utilização nos motores ciclo Diesel (ANP, 2020).

A transesterificação em meio alcalino homogêneo é o método mais utilizado na indústria para a obtenção do biodiesel. Esta técnica consiste na reação química de uma molécula de triacilglicerol com três moléculas de um álcool de cadeia curta, formando três moléculas de ésteres e uma molécula de glicerol. Para que esta reação aconteça, fatores essenciais devem ser verificados como a temperatura durante a reação, a proporção de álcool e óleo, o tempo reacional, o tipo do catalizador usado, bem como sua concentração, o teor de ácidos graxos livres e o teor de água no óleo. Por apresentar menor custo, o metanol é o álcool mais utilizado para a produção do biodiesel, quando comparado ao etanol (DUARTE *et al.*, 2022).

A Figura 5 mostra a reação de transesterificação para a obtenção do biodiesel com metanol.

Figura 5 – Reação de transesterificação do biodiesel com metanol

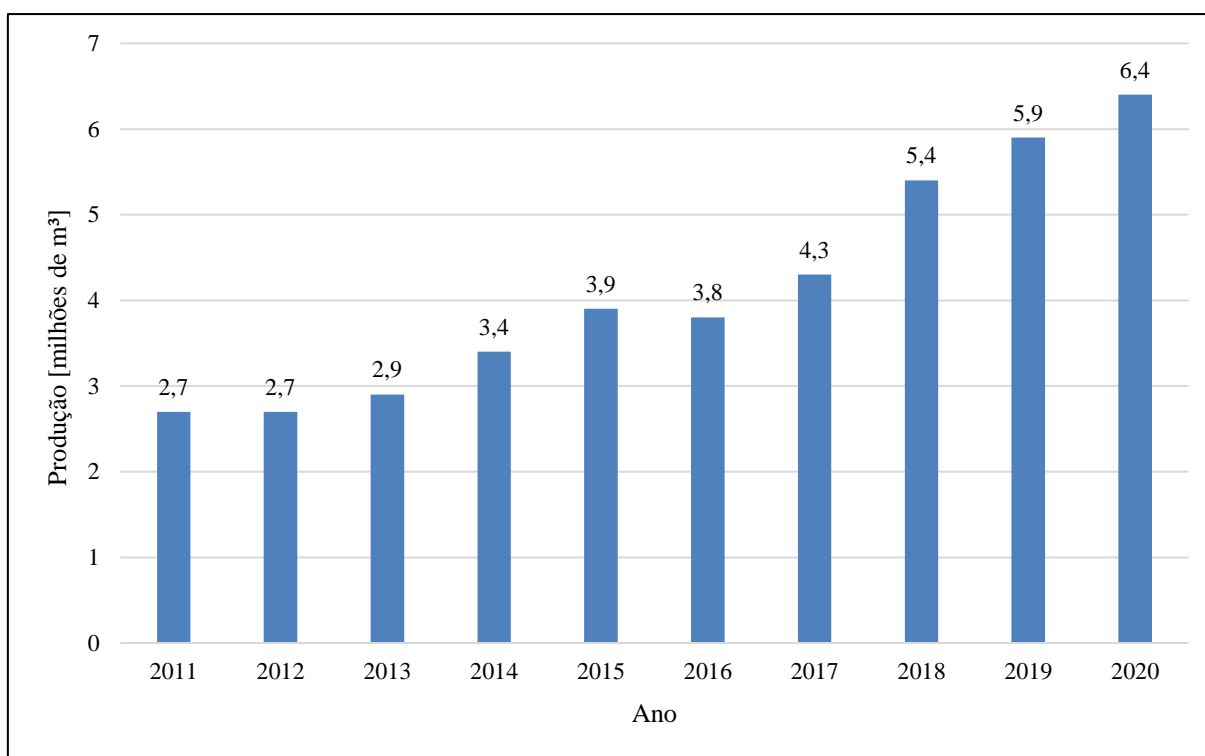


Fonte: Santos (2007).

Dependendo do processo e da matéria-prima utilizados para a produção de biodiesel, o consumo de metanol pode variar. No ano de 2020, o biodiesel produzido a partir do processo de transesterificação superou em 9,1% o ano anterior, sendo equivalente a 710,8 mil m³. Dentre as regiões com maior consumo de metanol, destaca-se a Região Sul do país, com 303,8 mil m³, representando 42,7% do total consumido no país. Logo atrás, vem a Região Centro-Oeste, com 272,4 mil m³ e 38,3% do total. Na sequência e com menores parcelas, vêm as Regiões Sudeste, Nordeste e Norte (ANP, 2021b).

Nessa perspectiva, ainda segundo dados publicados no Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis, em 2020 a capacidade de produção nacional de biodiesel (tipo B100) foi de 6,4 milhões de m³, que se comparado ao ano anterior, houve um aumento de 9%. O Rio Grande do Sul, por anos continua sendo o maior produtor de biodiesel, com volume de 1,8 milhão de m³, expressando 27,9% do total nacional. No gráfico da Figura 6, pode se ter uma noção quanto a progressão da produção brasileira de biodiesel entre os anos de 2011 e 2020.

Figura 6 – Evolução brasileira na produção de biodiesel (B100) entre 2011 e 2020



Fonte: adaptado de ANP (2021b).

Segundo Barbosa (2018), o biodiesel é um combustível biodegradável oriundo de fontes renováveis, como soja, palma, girassol, babaçu, amendoim, mamona, entre outros. Por esse motivo, são menos poluentes em comparação aos combustíveis derivados de fontes não renováveis. Para Brunetti (2018), na utilização de biodiesel como alternativa ao óleo diesel, há uma significativa redução nas emissões de CO, HC, NO_x, fumaça preta, além de atuar na eliminação do enxofre e minimizar a mutagenicidade por não possuir compostos aromáticos.

A Tabela 4 apresenta algumas matérias-primas que podem ser utilizadas para a produção de biodiesel.

Tabela 4 – Matérias-primas para produção de biodiesel

Óleos comestíveis	Conteúdo de óleo (%)	Óleos não comestíveis	Conteúdo de óleo (%)	Gordura animal e outras fontes	Conteúdo de óleo (%)
Óleo de girassol	25 – 30	Óleo de mamona	30 - 40	Sebo	30 – 70
Óleo de soja	15 – 20	Óleo de stillingia	40 - 44	Sobras de processamento de frango	30 – 70
Óleo de colza	38 – 46	Óleo de karanja	27 - 39	Óleo de algas	30 – 70

Tabela 4 – Matérias-primas para produção de biodiesel

(continuação)

Óleos comestíveis	Conteúdo de óleo (%)	Óleos não comestíveis	Conteúdo de óleo (%)	Gordura animal e outras fontes	Conteúdo de óleo (%)
Óleo de amendoim	45 - 55	Óleo de neem	20 - 30	Óleo de cozinha usado	30 – 70
Óleo de oliva	45 - 70	Óleo de rícino	45 - 50	Óleo microbiano	30 – 70
Óleo de canola	40 - 45	Óleo de silimarina	45 - 50	Óleo de peixe	30 – 70
Óleo de palma	30 - 60	Óleo de seringueira	54 - 68	Microalga	30 – 70
Óleo de coco	63 - 65	-	-	Óleo de pinho	30 – 70
Óleo de mostarda	63 - 65	-	-	Óleo de mafumeira	30 – 70
Óleo de linhaça	40 - 44	-	-	-	-

Fonte: ANP (2021c).

Turmina (2018) expõe que uma grande vantagem do biodiesel é que ele pode substituir total ou parcialmente o combustível dos motores de ignição por compressão, sendo possível utilizá-lo de forma pura ou em percentuais misturados com o óleo diesel. Para a correta designação da mistura de diesel com biodiesel deve-se utilizar a letra B (do inglês *Blend* - mistura), seguida pelo número que representa o percentual de biodiesel na mistura. Por exemplo, B2 que significa que 2% de biodiesel está presente na mistura ou B100, que significa que há 100% de biodiesel no combustível.

No ano de 2008, a legislação brasileira estabeleceu como obrigatória a adição de percentuais de biodiesel ao óleo diesel comercial. De acordo com as normativas atuais, a partir do dia 1º de abril de 2023, passou a contar o percentual de 12% de biodiesel presente na composição do óleo diesel disponível nos postos de abastecimento. Para o ano de 2024, a perspectiva será evoluir a graduação para 13% e, dessa forma, seguir aumentando gradativamente os níveis, até se atingir 15% no ano de 2026 (DOU, 2023).

A utilização de biocombustíveis vem sendo a grande aposta ao longo dos anos devido a sua vasta contribuição para o meio ambiente e como alternativa estratégica para a substituição das energias não renováveis, como o óleo diesel e outros derivados de petróleo (GALVÃO, 2007). Apesar de já ser um mercado consolidado, ainda há muito potencial de melhorias, que através de sua aditivação, com óxido de alumínio por exemplo, será possível evoluir suas

propriedades para minimizar ainda mais seu impacto ambiental e sua aplicação nos motores a combustão interna.

2.4.3 Óxido de alumínio

Nanopartículas metálicas estão sendo largamente empregadas como aditivos de biocombustíveis, em especial do biodiesel, por se mostrarem uma nova alternativa para melhoria de propriedades. Ao mesmo tempo, influenciam positivamente na eficiência dos motores e na redução de emissões de poluentes nocivos. Óxidos metálicos formados por alumínio (Al_2O_3), titânio (TiO_2), cobre (CuO), entre outros, são usados para auxiliar o processo de combustão e desempenho desejados nos motores (SHARMA et al., 2022). Para tais efeitos, esses aditivos podem atuar de duas maneiras distintas: os metais reagem com a água, produzindo radicais de hidroxila que aumentam a oxidação da fuligem; ou reagem diretamente com os átomos de carbono agregados a fuligem, reduzindo a temperatura de oxidação (CLAVON; QUILUMBANGO; BENAVIDES, 2022).

Akkoli *et al.* (2022), revelam que o óxido de alumínio, usualmente chamado de alumina, é um composto químico obtido a partir de duas fontes, o minério de bauxita (principal fonte, formado pela mistura de óxidos de alumínio como magnetita, quartzo, hematita, diversos não metais e metais) e a alumina reciclada. Geralmente se apresentam como partículas únicas em forma de esfera ou fibras inclinadas, adquiridas por técnicas como processo sol-gel, pirólise, ablação a laser e pulverização catódica. Devido a sua abrasividade e disponibilidade em grandes quantidades, a alumina é muito utilizada em diversas aplicações da indústria. Os mesmos autores, pesquisaram a adição de alumina (em concentrações de 5 mg/l, 10 mg/l, 15 mg/l e 20 mg/l) a uma mistura de éster metílico de óleo de peixe com biodiesel, encontrando vantagens em comparação ao óleo diesel. Os resultados apontaram reduções de 48,3% em CO, 17,5% em HC, 16,5% em NO_x e 20,9% em geração de fumaça.

Sharma *et al.* (2022), examinaram a aplicação de nanopartículas de óxido de alumínio como aditivo ao biodiesel, com tamanhos de 20 nm e 30 nm e concentrações de 25 ppm, 50 ppm e 75 ppm. Os autores constataram aumento no desempenho do motor, eficiência do combustível e NO_x , além de reduções no consumo de combustível específico do freio, hidrocarbonetos, CO e opacidade de fumaça. Esses resultados foram convincentes para considerar esses aditivos como meios suficientes para melhorar as propriedades dos novos

combustíveis, como a transferência de massa radiativa, atraso de ignição reduzido e autoignição dentro das condições ideais de combustão no motor.

Kaushik *et al.* (2022), estudaram a inclusão de concentrações de 25 ppm e 50 ppm de nanopartículas de alumina em misturas de diesel e biodiesel, a fim de analisar o desempenho de um motor diesel monocilíndrico e seus níveis de emissões. A conclusão foi que o desempenho do motor apresentou melhoras, juntamente com uma redução dos gases poluentes na exaustão, assim a incorporação de nanopartículas de alumínio ao biodiesel pode ser vantajosa. Foi possível atingir percentuais em torno de 37% de redução nas emissões de CO e 31% em HC.

Anchupogu, Rao e Banavathu (2018), investigaram os efeitos de nanopartículas de óxido de alumínio como aditivos a uma mistura de 20% de biodiesel (extraído a partir de *Calophyllum inophyllum*) e 80% de diesel. A concentração de alumina utilizada foi de 40 ppm. O teste foi operado em um motor diesel, com auxílio de uma válvula de recirculação de gases de escape para controlar as emissões de NO_x. As características da mistura foram comparadas as da mistura com adição de alumina e as da mistura com adição de alumina mais a utilização da recirculação dos gases. Os resultados indicaram um aumento de 5,0% e 7,7% na eficiência térmica e redução de 11,5% e 17,8% do consumo de combustível específico. Com adição de alumina, houve uma diminuição na emissão de CO de 6,0% e de NO_x em 7,8%, sendo mais expressivo com o uso de recirculação de gases, alcançando uma redução de 36,8%. A opacidade da fumaça decresceu em torno de 7,3%. As emissões de HC foram reduzidas em 12,2% com nanopartículas de alumina na mistura. Isso justifica-se pela redução na temperatura de ativação do carbono que promove aprimoramento da combustão. O teste também indicou um aumento na pressão no cilindro do motor e na liberação de calor do combustível com o uso de alumina e a recirculação dos gases.

2.4.4 Óxido de grafeno como aditivo alternativo

Aproveita-se para explicar sobre nanopartículas de materiais avançados, como o óxido de grafeno, que também vêm sendo empregadas como aditivos do biodiesel. Isso é importante para incentivar os estudos de novos materiais como alternativa para aprimorar os combustíveis. Leite (2017) menciona que o óxido de grafeno é um material de baixo custo, de fácil obtenção e possui propriedades que vêm estimulando sua utilização como catalisador heterogêneo, pelo fato de ser um material com elevada resistência mecânica, ter mobilidade de carga favorável

(armazenando cargas em suas finas camadas) e ser compatível com diversos substratos. Para sua sintetização, é utilizado o método Hummers, que consiste na oxidação de grafite submetido a intensas condições ácidas. Ao longo da síntese, diversos grupos funcionais portadores de oxigênio (álcoois, epóxidos e carboxilatos) e sulfatos são incorporados ao plano do grafeno, sendo suficientes para tornarem o óxido de grafeno um bom catalisador ácido para diversas reações químicas de oxidação.

Hoseini *et al.* (2019a) exploraram que as partículas de grafeno têm espessuras médias em torno de 1,2 nm e área superficial de 900 m²/g. Diâmetros típicos de nanopartículas de grafeno, em média, estão na faixa de 150 nm. O óxido de grafeno dispõe de características únicas, que o conferem excelentes vantagens como, propriedades mecânicas e eletrônicas, mobilidade de partículas portadoras de carga, condutividade térmica, magnetismo específico, grande área superficial, condutividade elétrica, resistência mecânica e atividades electrocatalíticas extraordinárias. Esses autores, compararam três diferentes tipos de biodiesel, dos quais, óleo de semente de Onagra, óleo de semente de Árvore-do-céu e óleo de semente de Camélia, todos incrementados com óxido de grafeno. Os resultados indicaram uma atenuação nos níveis de hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono e consumo específico de combustível. Porém, para os três biodieseis, foram elevadas as emissões de óxido de nitrogênio, o que não impediu os pesquisadores de concluir que o óxido de grafeno é um aditivo vantajoso para melhorar a qualidade dos combustíveis.

Em outro trabalho realizado por Hoseini *et al.* (2019b), foram utilizadas nanopartículas de óxido de grafeno como aditivos em biodiesel B20 (de origem da Onagra), com concentrações de 30 ppm, 60 ppm e 90 ppm. O experimento foi realizado em um motor diesel com rotação constante de 2100 rpm, variando com cargas de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Foram investigados parâmetros como potência, temperatura dos gases de escape, níveis de CO, CO₂, hidrocarbonetos não queimados e óxidos de nitrogênio. Resultados significativos foram atingidos quanto ao aumento de potência, que atingiu o maior valor com a mistura de biodiesel acrescida de 90 ppm de óxido de grafeno. Com a mesma mistura, a temperatura dos gases de escape também elevou, mantendo-se como superior, as demais, em todos os níveis de carga. Houve reduções consideráveis de CO, variando de 5% a 22% dependendo da concentração de aditivo. Hidrocarbonetos não queimados reduziram em um intervalo de 17% a 26% em comparação ao óleo diesel. Entretanto, nas condições dessa análise, foi observado um ligeiro aumento nas emissões de CO₂, chegando a valores de 7% a 11%, e nos índices de óxidos de nitrogênio, com percentuais oscilando de 4% a 9%. Por fim, esses pesquisadores constataram

que o óxido de grafeno pode ser empregado como aditivo alternativo adequado para o biodiesel utilizado na análise.

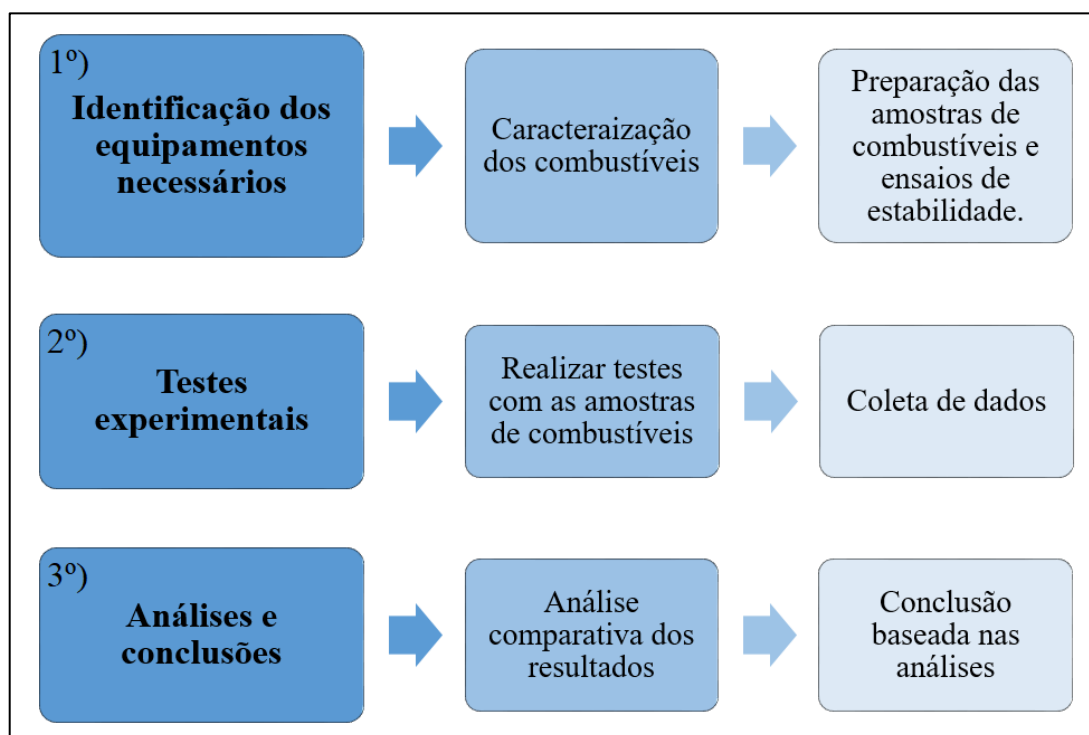
O artigo elaborado por Chacko e Jeyaseelan (2020), relata as características de combustão e emissões de um motor diesel turbo alimentado, abastecido com diesel e biodiesel B20 sob o efeito de nanopartículas de grafeno e nanoplaquetas de grafeno, em concentrações de 20 ppm, 40 ppm e 60 ppm. Os resultados indicaram uma redução máxima no índice de fumaça de 29,2% com 40 ppm de nanopartículas de grafeno. Com 60 ppm de nanoplaquetas de grafeno, houve uma redução de 26,4% nas emissões de NO_x. Dessa forma, percebe-se que as nanopartículas apresentam menor tendência de geração de fuligem, enquanto as nanoplaquetas possibilitam maior redução de emissões de NO_x. Com as nanoplaquetas, maiores reduções de CO (30%) e HC (23,2%) foram verificadas. Somado a isso, com 40 ppm de nanopartículas, atingiu-se uma redução de 9% do consumo de combustível específico, enquanto que com 60 ppm de nanoplaquetas, houve uma redução de 5,8% dessa característica. A eficiência térmica do freio aumentou 2,3% com 40 ppm de nanopartículas. Ainda assim, o coeficiente de atrito no injetor de combustível e a tendência de bloqueio do filtro não foram afetados pela utilização de nano aditivos.

EL-Seesy, Hassan e Ookawara (2018), também pesquisaram os impactos da adição de nanopartículas de óxido de grafeno, porém aplicados ao biodiesel de pinhão-manso (*Jatropha Metil Ester*), em um motor diesel de injeção direta operando a velocidade constante de 2000 rpm. As concentrações utilizadas de nanopartículas misturadas ao biodiesel foram de 25 mg/l, 50 mg/l, 75 mg/l e 100 mg/l, sendo essas variações comparadas com as propriedades do biodiesel puro. Os resultados apontaram que a eficiência térmica do freio melhorou 17% em comparação ao biodiesel sem aditivo. O pico de pressão no cilindro e a taxa máxima de liberação de calor aumentaram em 8% e 6%, respectivamente. Em relação as emissões de gases, reduções bem expressivas foram alcançadas, sendo 60% de CO e 50% de HC. Quando em alta carga do motor, os índices de NO_x decaíram em 15%, também comparado ao biodiesel puro. Em geral, os melhores resultados de desempenho do motor e emissões foram obtidos com concentração de 50 mg/l de nanopartículas de óxido de grafeno.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, analisou-se o desempenho de um motor ciclo Diesel operando com óleo diesel S500 (*baseline*), biodiesel B100 e com mistura de 50% óleo diesel e 50% biodiesel, além desses combustíveis aditivados com nanopartículas de óxido de alumínio. Parâmetros de potência, eficiência, consumo e emissões de gases de escape foram avaliados. Os valores obtidos foram comparados com as características do motor alimentado com óleo diesel e biodiesel puros. Esta análise foi elaborada com base em dados experimentais, tendo a metodologia elucidada ao longo deste capítulo. Os ensaios foram realizados no laboratório de motores da Universidade de Caxias do Sul, localizado no Bloco U. A Figura 7 sintetiza resumidamente a sequência seguida pelo trabalho.

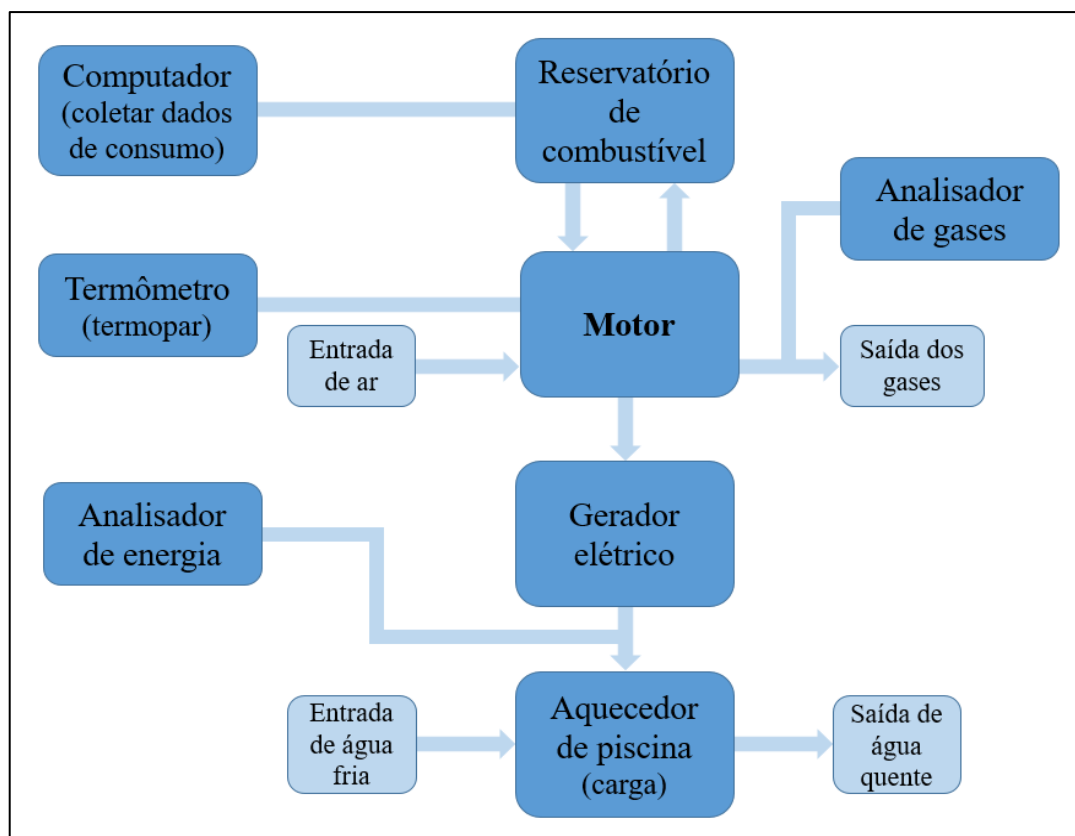
Figura 7 – Etapas do trabalho



Fonte: o Autor (2023).

Os equipamentos que foram utilizados para a realização do projeto são apresentados nessa seção. A Figura 8 apresenta o esquema experimental para esse trabalho. Basicamente motor, gerador de energia, analisador de energia, analisador de gases, computador para aquisição dos dados de consumo e o termômetro constituíram o sistema.

Figura 8 – Esquema de montagem do sistema



Fonte: o Autor (2023).

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Nesta etapa, apresenta-se os equipamentos e instrumentos que auxiliaram na obtenção dos resultados dos testes práticos, desde os dispositivos para a caracterização dos combustíveis em estudo, passando pelos de avaliação de desempenho do motor, até aqueles utilizados para análises de emissões gasosas.

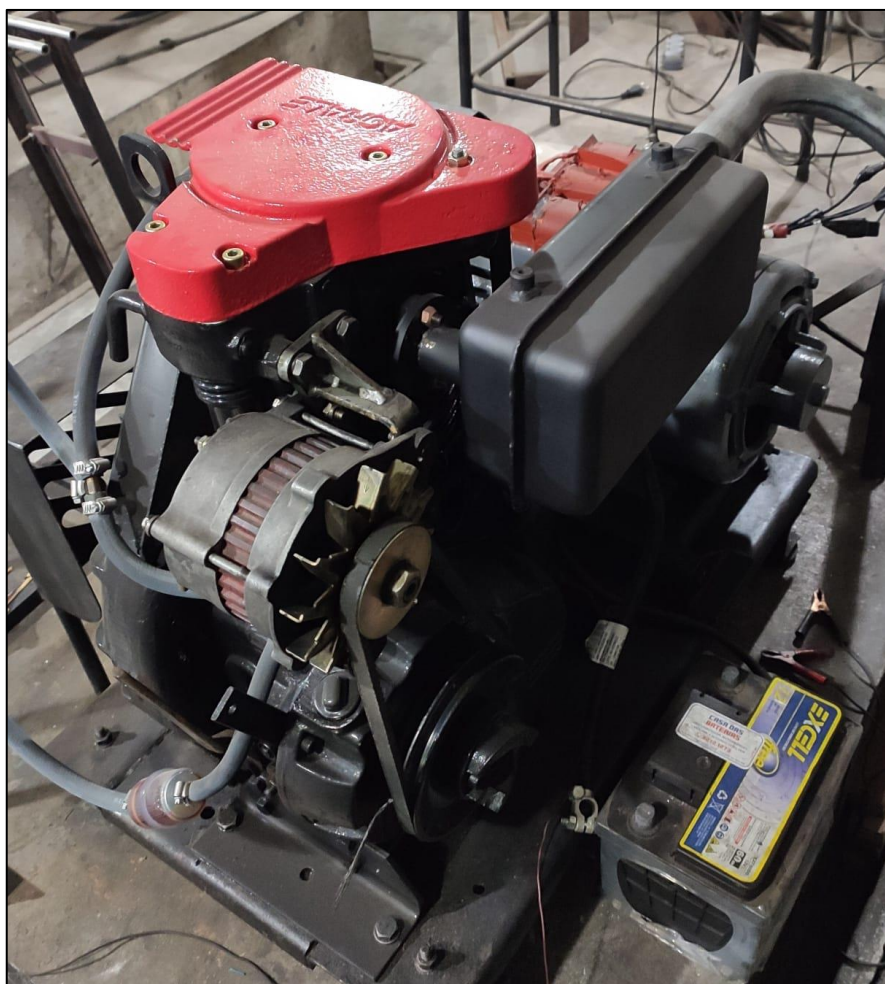
3.1.1 Motor

Para a realização dos testes, foi utilizado um motor monocilíndrico, ciclo Diesel, da marca Agrale, modelo M90. Uma bomba injetora, um bico injetor e um regulador de velocidade interno coordenam o sistema de injeção de combustível, que ocorre, na configuração original, 21 graus antes do ponto morto superior.

A bomba injetora funciona por meio de um ressalto em seu eixo, deslocando um êmbolo, o qual faz com que o combustível seja conduzido até o bico injetor. A pressão ocasionada no bico injetor permite que o combustível acesse a câmara de combustão do cilindro.

O funcionamento do sistema regulador de velocidade é responsável por manter a rotação constante. É composto por um sistema centrífugo de contrapesos e molas que atuam sobre o débito da bomba injetora nos instantes de aplicação ou falta de carga. A Figura 9 e a Tabela 5 ilustram, respectivamente, o motor utilizado e algumas de suas especificações.

Figura 9 – Motor diesel Agrale M90



Fonte: o Autor (2023).

Tabela 5 – Especificações do motor Agrale

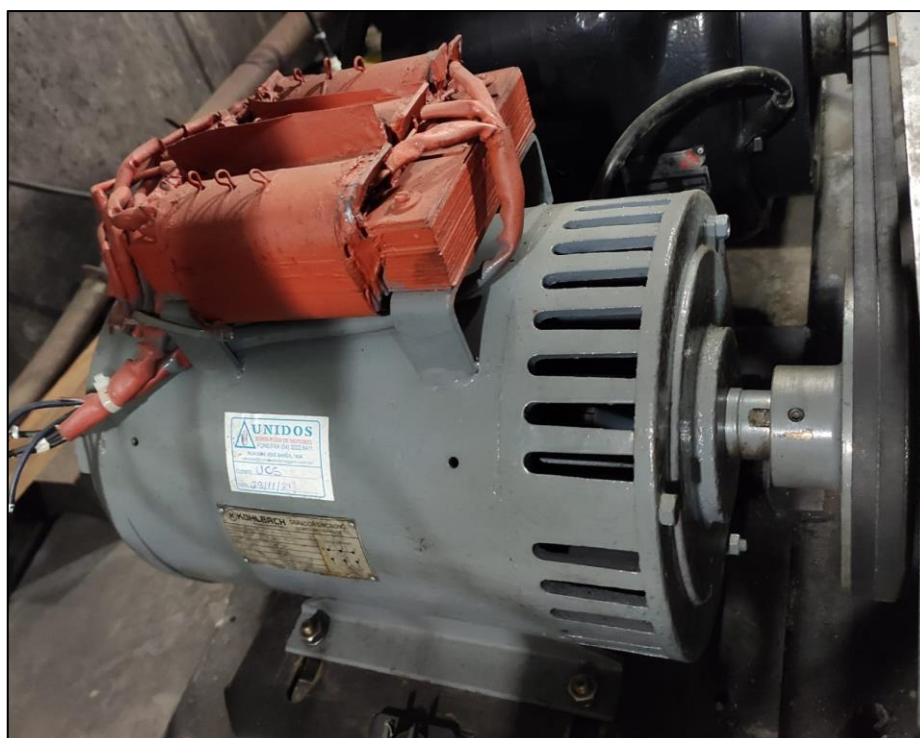
Característica	Unidade	Especificação
Nº de cilindros / disposição	-	1 / Vertical
Potência a 2500 rpm	cv / kW	13 / 9,6
Ciclo	-	4 tempos
Deslocamento volumétrico	cm ³	668
Taxa de compressão	-	20,5:1
Sistema de injeção	-	Direta Bosch
Refrigeração	-	A ar
Pressão de abertura do injetor	kPa	Aprox. 1900
Consumo específico, em dinamômetro	g/kWh	240
Diâmetro do cilindro	mm	90
Curso do pistão	mm	105

Fonte: o Autor (2023).

3.1.2 Gerador de energia

Um gerador elétrico trifásico estava montado junto ao motor, para dar o suporte energético, sendo da marca Kohlback, modelo 132 LA. A Figura 10, ilustra o gerador e a Tabela 6, mostra algumas de suas especificações.

Figura 10 – Gerador de energia Kohlback



Fonte: o Autor (2023).

Tabela 6 – Especificações do gerador Kohlback

Característica	Unidade	Especificação
Potência aparente	kVA	10
Potência efetiva	kW	8
Fator de potência	-	0,80
Tensão	V	220
Frequência	Hz	60
Rotação	rpm	1800
Fases	-	3

Fonte: o Autor (2023).

3.1.3 Analisador de energia

As grandezas elétricas do gerador foram adquiridas através de um analisador de energia, modelo RE6000 da marca Embrasul. Este aparelho é capaz de retornar valores de corrente, tensão entre fases, tensão entre fase e neutro, frequência, potência, fator de potência, entre outros. Para tensão e corrente, este equipamento possui resoluções de medição de, respectivamente, 0,01 V e 0,01 A, com precisão de 0,2% para ambas as grandezas. A faixa de operação para tensão alternada está situada entre 50 V e 500 V, enquanto que para a corrente está entre 0,2 A e 1000 A.

A potência medida pelo analisador de energia representa a potência final do conjunto motor e gerador, tendo, as perdas de energia do processo de queima do combustível até a geração de energia, já sido consideradas pelo equipamento. Na Figura 11, pode-se observar o analisador que auxiliou nos testes deste trabalho.

Figura 11 – Analisador de energia Embrasul



Fonte: o Autor (2023).

3.1.4 Carga elétrica

Para a dissipação da energia produzida pelo gerador e promover carga no motor, foi instalado um aquecedor de piscina no sistema, alimentado por um fluxo constante de água conectado a uma torneira existente no laboratório. Esse sistema foi capaz de gerar potência constante em torno de 3,15 kW. Importante sempre certificar-se de que a torneira esteja ligada para evitar que o aquecedor funcione sem fluxo de água e ocasione a queima desse equipamento.

3.1.5 Termopar

Foi utilizado um termopar (tipo K) da marca Novus, modelo 305, para a medição da temperatura dos gases de exaustão. Este aparelho tem a capacidade de medição limitada entre os valores de -50°C e 1300°C , com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ e registro de cinco medições a cada dois segundos. As leituras foram realizadas durante o pleno funcionamento do motor, através de um furo realizado no coletor de escape.

3.1.6 Analisador de gases

As emissões de gases de escape foram investigadas com o uso de um analisador de gases da marca MRU Instruments, modelo Optima7. Este dispositivo permite a aquisição dos índices em percentual ou ppm de gases como O_2 (faixa de medição 0 a 21%, resolução padrão de 0,1% com opção de 0,01% e precisão de $\pm 0,2\%$ em volume), CO_2 (faixa de medição de 0 a 40% em volume, resolução de 0,01% em volume e precisão de $\pm 0,3\%$ em volume), CO (faixa de medição de 0 a 10000 ppm, resolução de 1 ppm e precisão de ± 10 ppm), NO (faixa de medição de 0 a 1000 ppm, resolução de 1 ppm e precisão de ± 5 ppm), NO_2 (faixa de medição de 0 a 200 ppm, resolução de 1 ppm e precisão de ± 5 ppm), NO_x e SO_2 (faixa de medição de 0 a 2000 ppm, resolução de 1 ppm e precisão de ± 10 ppm), além do percentual de excesso de ar. As leituras foram obtidas através de um compartimento de acesso à parte interna do escapamento do motor, por onde havia fluxo constante dos gases de exaustão. O equipamento em questão pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Analisador de gases Optima7



Fonte: o Autor (2023).

3.1.7 Aquisição dos dados de consumo de combustível

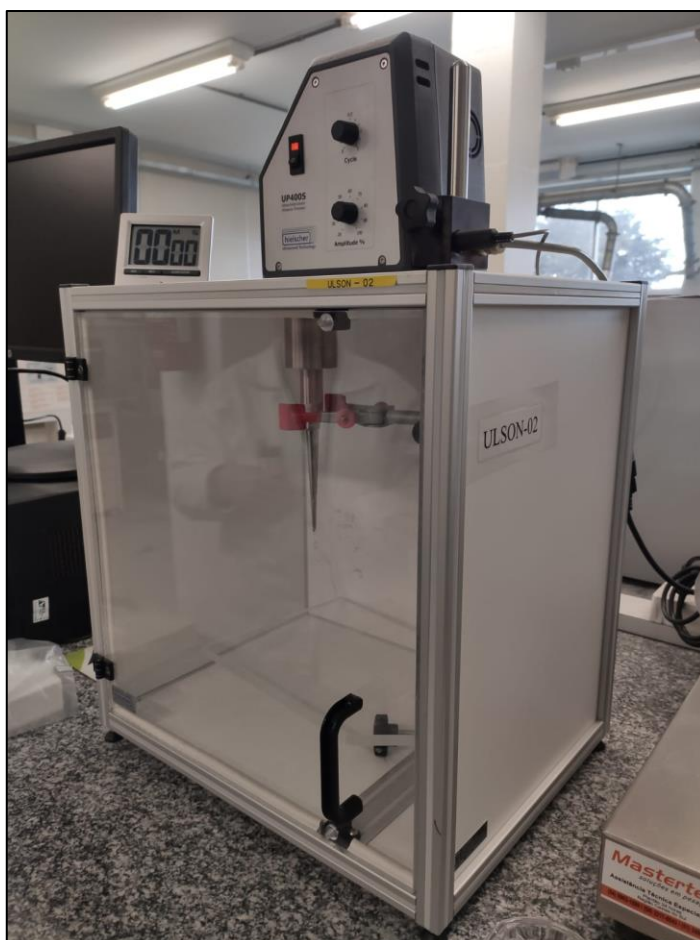
Para a aquisição dos dados de consumo, foi utilizado um computador, uma placa de aquisição de dados e uma célula de carga disponibilizados pela própria universidade. A placa de aquisição é da marca HBM, modelo QuantumX MX440B, a qual foi responsável por coletar os dados da célula de carga e enviar as informações para o software Catman DAQ®, instalado no computador e utilizado para processamento, visualização e tratamento de dados. A célula de carga, com capacidade para 2 kg, ficou encarregada pela leitura da variação da massa de combustível que estava sendo consumida durante a operação do motor.

3.1.8 Misturador ultrassônico

Para misturar adequadamente as nanopartículas de óxido de alumínio ao biodiesel, foi utilizado o método de ultrassom, o qual consiste na geração de ondas sonoras de alta frequência na mistura, geralmente superiores a 20 kHz. Esse processo é capaz de provocar a agitação do fluido e das nanopartículas em escala microscópica, ocasionando cavitação (formação de pequenas bolhas que implodem violentamente) na mistura, aumentando a miscibilidade da solução e possibilitando sua homogeneização (ECO-SONICS, 2023). O processo de sonicação das amostras do presente trabalho, foi realizado com o auxílio dos profissionais integrantes do Laboratório de Materiais (LAMAT), localizado no Bloco G da Universidade de Caxias do Sul.

O equipamento utilizado é da marca Hielscher, modelo UP400S, com 400 watts de energia ultrassônica e frequência de 24 kHz, possuindo a faixa de sonicação para volumes de 5 a 4000 ml, em fluxo de 10 a 50 litros por hora, podendo emitir as ondas constantemente ou de forma intermitente. O aparato em questão pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Misturador ultrassônico Hielscher



Fonte: o Autor (2023).

3.1.9 Biodiesel para mistura

As misturas foram compostas por biodiesel com diferentes concentrações de aditivos, sendo 50 ppm, 100 ppm e 150 ppm de Al_2O_3 . Foram adquiridos, por doação, em torno de 40 litros de biodiesel da empresa Bocchi Agrobios e mais 40 litros da empresa 3tentos. O biodiesel é do tipo B100, proveniente 100% do óleo de soja. Algumas características predeterminadas do biodiesel são apresentadas na Tabela 7, conseguidas a partir dos certificados de qualidade fornecidos pelas empresas doadoras.

Tabela 7 – Características do biodiesel adquirido

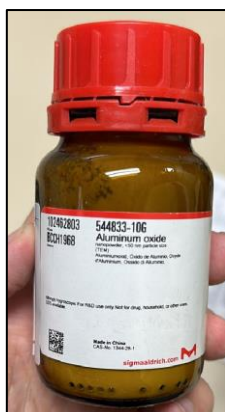
Característica	Unidade	Especificação
Massa específica a 20 °C	kg/m ³	881,40
Viscosidade cinemática a 40°C	mm ² /s	4,06
Teor de água	mg/kg	185,30
Ponto de fulgor	°C	123,62
Número de Cetano	-	Não informado
Ponto de entupimento de filtro a frio	°C	-1
Estabilidade à oxidação a 110 °C	h	17,57

Fonte: Certificado de Qualidade Biodiesel Bocchi Agrobios (2023).

3.1.10 Nanopartículas de Al_2O_3

As nanopartículas de óxido de alumínio foram compradas da empresa Sigma Aldrich Brasil. O frasco, contendo dez gramas do material, foi adquirido pelo valor de R\$ 338. Conforme informação do rótulo do frasco, o tamanho das nanopartículas não excede 50 nm. O frasco adquirido pode ser verificado na Figura 14.

Figura 14 – Frasco de nanopartículas de Al_2O_3



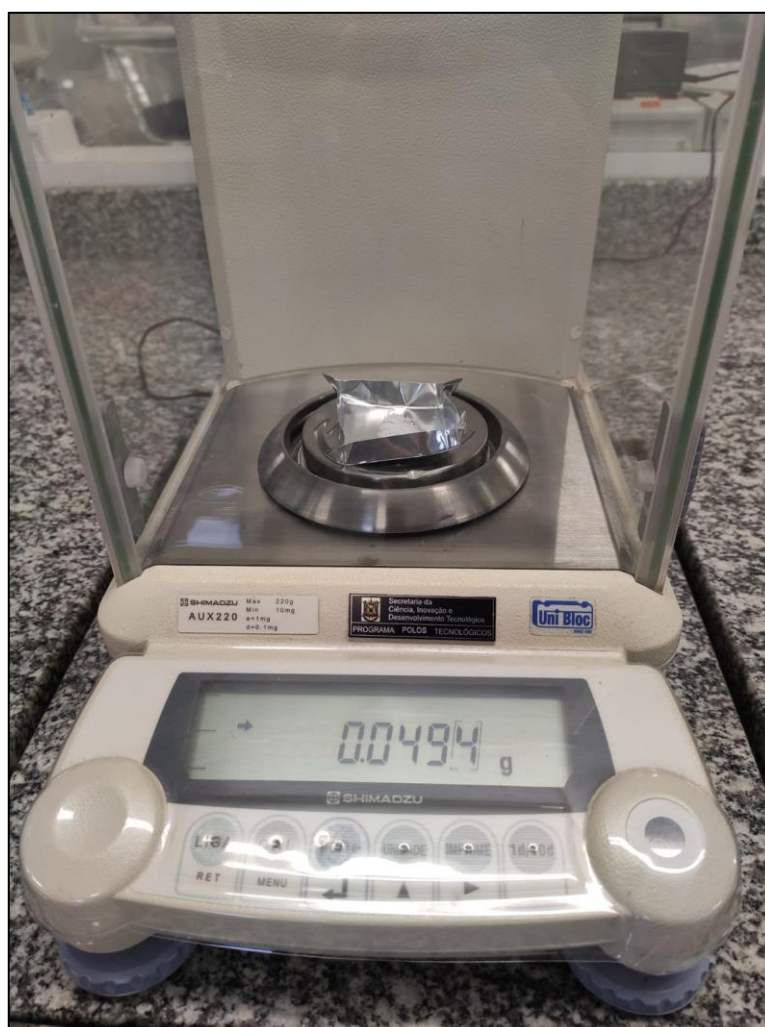
Fonte: o Autor (2023).

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.2.1 Preparação das misturas

Para a preparação das misturas utilizando óleo diesel, biodiesel e nanopartículas de óxido de alumínio, foi solicitada a instrução e acompanhamento dos profissionais do LAMAT. O procedimento em questão, está descrito a seguir. Primeiramente, utilizando-se de uma balança de precisão da marca Shimadzu, foram pesados 50, 100 e 150 mg de alumina (correspondentes a 50, 100 e 150 ppm). Abaixo, segue Figura 15 que demonstra essa etapa.

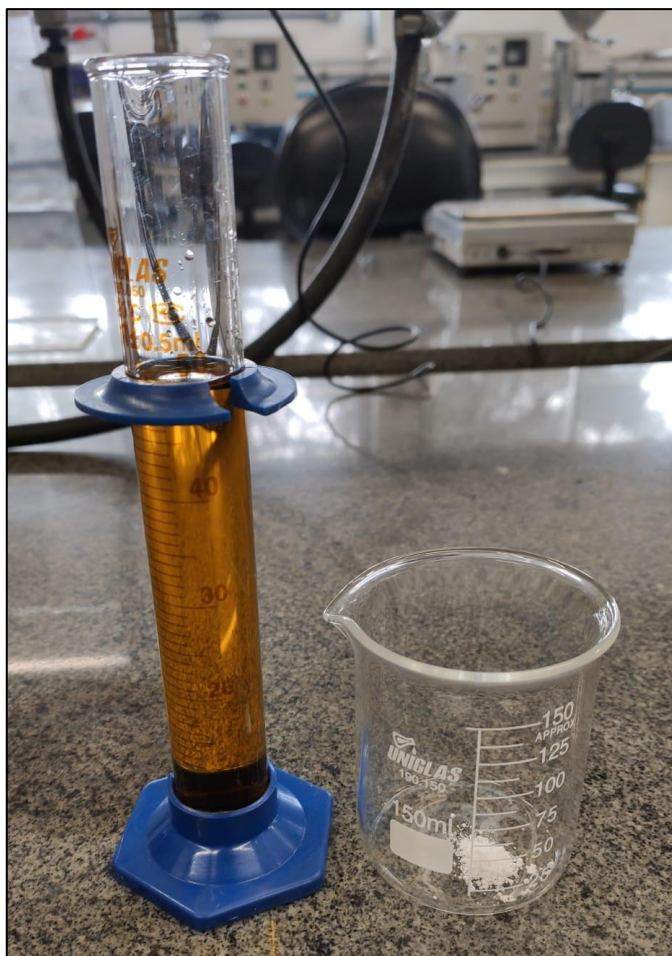
Figura 15 – Balança de precisão Shimadzu



Fonte: o Autor (2023).

Posteriormente, colocou-se os 50 mg de alumina em um Becker graduado e foram reservados 50 ml de biodiesel em uma proveta graduada, a fim de facilitar a manipulação das misturas. Na Figura 16, verifica-se o Becker com 50 mg de alumina e a proveta com 50 ml de biodiesel.

Figura 16 – 50 ppm de alumina e 50 ml de biodiesel



Fonte: o Autor (2023).

Em seguida, os 50 ml de biodiesel foram adicionados ao Becker junto da alumina, para então, serem levados para o misturador ultrassônico, permanecendo em torno de cinco minutos sob o efeito do ultrassom, conforme pode ser observado na Figura 17.

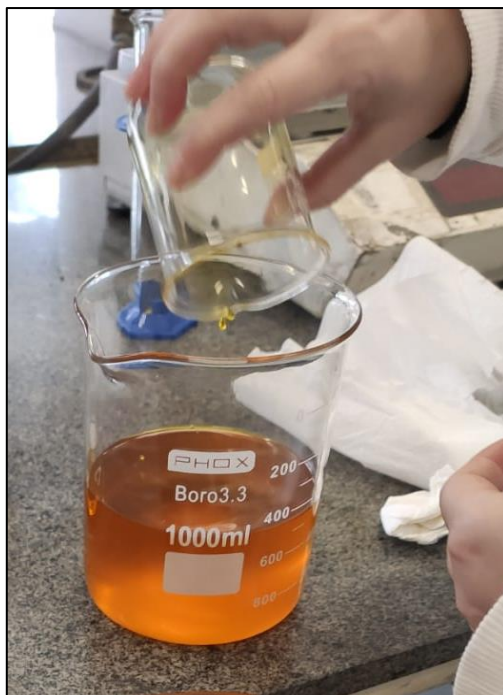
Figura 17 – Inserção do Becker no misturador ultrassônico



Fonte: o Autor (2023).

Logo após, a mistura já homogeneizada foi adicionada em um Becker de maior capacidade, conforme pode ser observado na Figura 18. Nesse Becker, foi adicionado o restante de biodiesel até chegar a 1000 ml, com o objetivo de atingir a solução com a concentração desejada de 50 mg/litro.

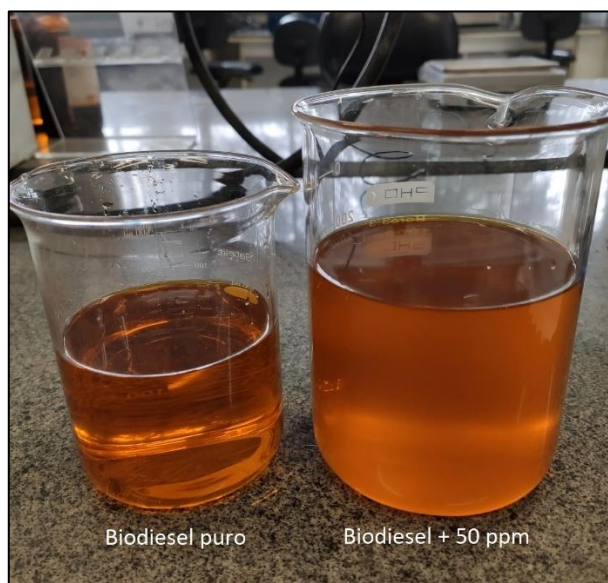
Figura 18 – Adição da mistura em Becker de 1000 ml



Fonte: o Autor (2023).

Toda a solução foi agitada manualmente para garantir uma homogeneidade final e estar pronta para utilização. Uma notável diferença no aspecto das amostras foi observada após todo o processo, sendo perceptível a homogeneidade da mistura, como pode ser notado na Figura 19.

Figura 19 – Aspecto das amostras



Fonte: o Autor (2023).

Achou-se prudente a preparação de dois litros de cada mistura, sendo suficiente à realização dos testes e coleta de dados. O mesmo procedimento foi seguido para a preparação das misturas com cada uma das diferentes concentrações, sendo:

- Dois litros de Biodiesel + 50 ppm de Al_2O_3 ;
- Dois litros de Biodiesel + 100 ppm de Al_2O_3 ;
- Dois litros de Biodiesel + 150 ppm de Al_2O_3 ;
- Dois litros de Biodiesel + Diesel + 50 ppm de Al_2O_3 ;
- Dois litros de Biodiesel + Diesel + 100 ppm de Al_2O_3 ;
- Dois litros de Biodiesel + Diesel + 150 ppm de Al_2O_3 ;

3.2.2 Teste de estabilidade das misturas

Após finalizar a preparação das misturas, as amostras foram levadas para um analisador de estabilidade de formulações da marca Formulation, modelo Turbiscan Lab, mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Analisador de estabilidade



Fonte: o Autor (2023).

Esse equipamento utiliza a técnica de espalhamento múltiplo da luz e transmitância para detectar a desestabilização das misturas. A fim de comparação, o fabricante relaciona a capacidade do equipamento como sendo 200 vezes mais eficaz que a percepção humana da desestabilização de uma amostra. Além disso, é possível monitorar a estabilidade em temperaturas específicas e a evolução do processo de desestabilização através dos mecanismos de desestabilização, como a formação de creme, sedimentação, floculação e coalescência (FORMULACTION, 2023; MCTI, 2022).

As etapas para a realização dos testes de estabilidade das misturas estão descritas abaixo:

- As amostras foram inseridas em cubetas até o nível ideal indicada no porta-cubetas, conforme pode ser visto na Figura 21.
- O analisador de estabilidade foi ajustado para manter o ensaio sob temperatura controlada de 30 °C.
- Nos horários de interesse, cada cubeta foi colocada no equipamento e feita a leitura de transmitância durante aproximadamente dois minutos.
- Em seguida, a cubeta foi retirada e deixada em repouso sobre a bancada, para então, ser colocada a próxima cubeta no equipamento.
- A movimentação das cubetas foi feita cuidadosamente, com a mínima agitação possível, para não interferir nos resultados do ensaio.
- As misturas foram deixadas sob análise pelo período de 7 dias.

Figura 21 – Cubetas com amostras



Fonte: o Autor (2023).

3.2.3 Testes no laboratório de motores

Os testes para validar o desempenho das misturas foram realizados no laboratório de motores da Universidade de Caxias do Sul, no Bloco U, sala 200, conforme o procedimento a seguir:

- Antes de iniciar as coletas de dados, o motor foi aquecido durante 30 minutos abastecido com óleo diesel S500, sem carga, com frequência em torno de 60 Hz (rotação de 1800 rpm), ajustada pela alavanca de aceleração do motor e com auxílio do analisador de energia;
- Em seguida, o gerador de energia foi ligado, ativando o aquecedor de piscina para gerar carga no motor;
- A rotação foi reduzida por conta da carga aplicada ao motor, logo, foi ajustada novamente para 60 Hz.
- Após o aquecimento, aproveitou-se para coletar os dados de potência, frequência, temperatura, consumo e índices dos gases de exaustão do óleo diesel S500.
- A potência e frequência foram anotadas conforme eram fornecidas pelo analisador de energia.
- A temperatura dos gases foi medida com o uso do termopar, o qual foi inserido em um furo feito no coletor de escape do motor.
- Os dados para consumo de combustível foram adquiridos através do software Catman, instalado no computador do laboratório.
- Os índices de emissões gasosas foram adquiridos pelo analisador de gases, inserindo a ponteira de leitura no interior do escapamento do motor, onde havia fluxo constante dos gases.
- Após todos os dados serem anotados, o motor foi desligado.
- Em seguida, foi retirada completamente a sobra de combustível do reservatório para, então, abastecê-lo com a próxima amostra.
- O reservatório foi abastecido com o biodiesel B100 e aguardou-se em torno de dez minutos para iniciar a coleta dos dados, a fim de garantir que apenas o novo combustível estivesse em circulação no sistema.

- Após a aquisição de dados com óleo diesel e biodiesel puros, o mesmo procedimento foi realizado com a utilização das misturas com as diferentes concentrações de nanopartículas, conforme sequência abaixo.

- Teste e coleta de dados da mistura de biodiesel e 50 ppm de Al_2O_3 .
- Teste e coleta de dados da mistura de biodiesel e 100 ppm de Al_2O_3 .
- Teste e coleta de dados da mistura de biodiesel e 150 ppm de Al_2O_3 .
- Teste e coleta de dados da mistura de óleo diesel e biodiesel.
- Teste e coleta de dados da mistura de óleo diesel, biodiesel e 50 ppm de Al_2O_3 .
- Teste e coleta de dados da mistura de óleo diesel, biodiesel e 100 ppm de Al_2O_3 .
- Teste e coleta de dados da mistura de óleo diesel, biodiesel e 150 ppm de Al_2O_3 .

3.2.4 Interpretação dos dados coletados

Após a realização dos testes em laboratório, os dados coletados foram analisados durante os meses de setembro e outubro de 2023, a fim de refiná-los para serem expostos inteligivelmente no presente trabalho.

Os valores adquiridos foram transferidos para uma planilha de Excel, facilitando assim os cálculos para obtenção da média das coletas, referentes a potência e frequência medidas, tempo transcorrido para aquisição, variação da massa de combustível, consumo de combustível, consumo específico, poder calorífico e eficiência. Da mesma forma foi feito com os valores de emissões gasosas, sendo avaliados os parâmetros de temperatura e índices dos gases de exaustão, assim como os resultados dos ensaios de estabilidade das misturas.

O consumo de combustível foi calculado pela Equação 13, representado pela taxa de massa, sendo a razão entre a variação de massa do combustível (detectada pela célula de carga e adquirido pela placa de aquisição) e a variação do tempo transcorrido para leitura (realizado pelo software Catman).

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (13)$$

Onde \dot{m} , representa a taxa de massa em kg/s; Δm , variação de massa em kg; Δt , a variação do tempo em s (segundos).

Em seguida, calculou-se o consumo específico de combustível, utilizando os dados de variação de massa, variação do tempo e potência (medida com o analisador de energia). Esse cálculo foi feito através da Equação 14, na qual a variação de massa é multiplicada por 1000 para convertê-la para gramas e a variação de tempo é dividida por 3600 para convertê-la para horas, resultando no consumo específico em g/kWh.

$$C_e = \frac{\Delta m \times 1000}{Pot \times \frac{\Delta t}{3600}} \quad (14)$$

Sendo C_e , o consumo específico em kg/kWh; Pot , a potência em kW.

Utilizando-se dos valores de referência da ANP para o PCI do óleo diesel e do biodiesel, sendo 10100 kcal/kg (aproximadamente 42200 kJ/kg) e 9000 kcal/kg (aproximadamente 37600 kJ/kg), respectivamente, foi possível determinar a eficiência dos combustíveis pela Equação 15, na qual são aplicados também os valores de potência e do consumo de combustível.

$$\eta_i = \frac{Pot}{C \times PCI} \times 100 \quad (15)$$

Sendo η_i , a eficiência em percentual; PCI o poder calorífico inferior em kJ/kg de cada amostra de combustível.

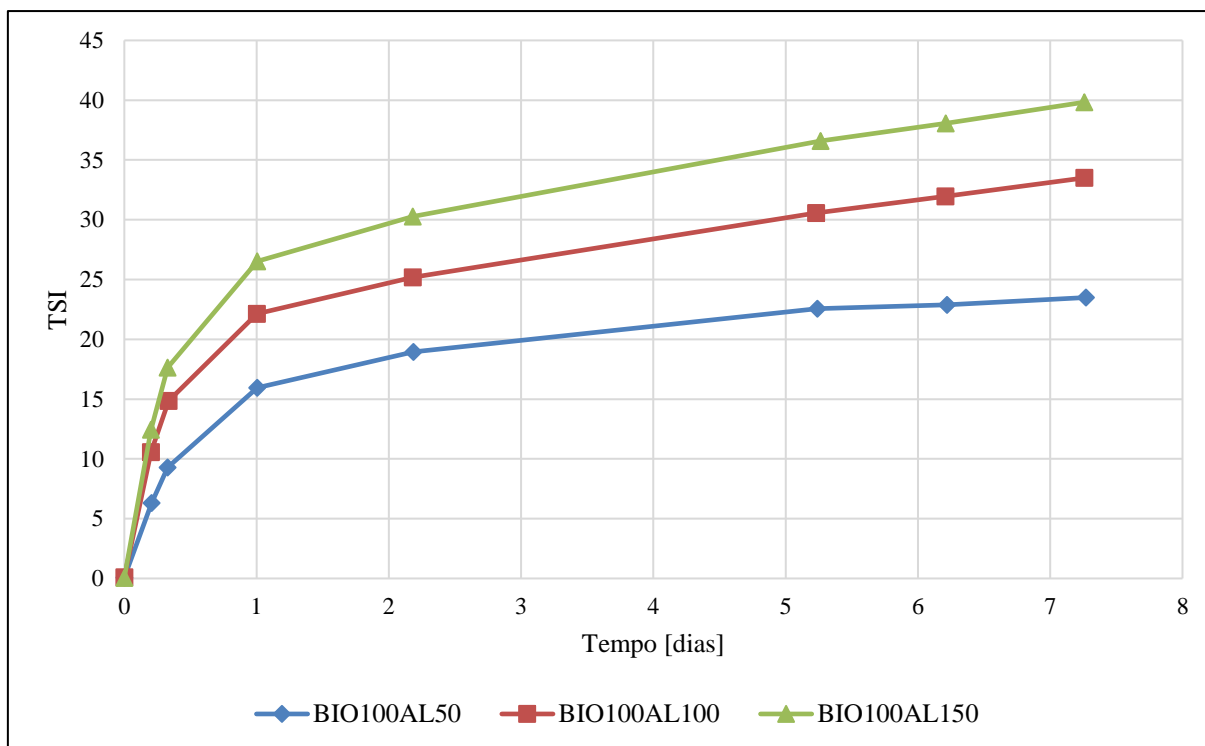
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a abordagem neste capítulo, foram adotadas as seguintes nomenclaturas para se referir as diferentes amostras:

- OD100 – 100% óleo diesel;
- BIO100 – 100% biodiesel;
- BIO100AL50 – 100% biodiesel + 50 ppm de Al_2O_3 ;
- BIO100AL100 – 100% biodiesel + 100 ppm de Al_2O_3 ;
- BIO100AL150 – 100% biodiesel + 150 ppm de Al_2O_3 ;
- OD50BIO50 – 50% óleo diesel + 50% biodiesel;
- OD50BIO50AL50 – 50% óleo diesel + 50% biodiesel + 50 ppm de Al_2O_3 ;
- OD50BIO50AL100 – 50% óleo diesel + 50% biodiesel + 100 ppm de Al_2O_3 ;
- OD50BIO50AL150 – 50% óleo diesel + 50% biodiesel + 150 ppm de Al_2O_3 ;

4.1 ESTABILIDADE DAS MISTURAS

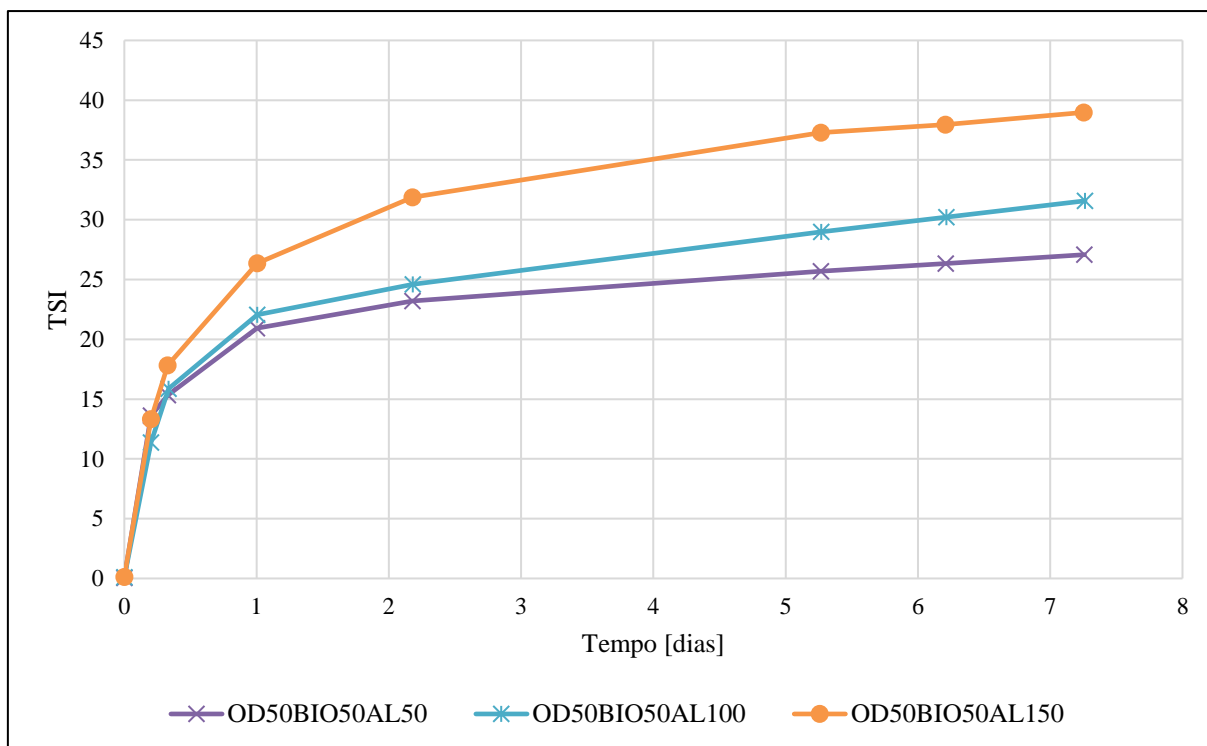
A análise de estabilidade foi feita com auxílio do software Turbisoft Lab®, disponível no analisador de estabilidade utilizado, mediante a escala TSI (*Turbiscan Stabilization Index*), o Índice de Estabilidade Turbiscan. Esse índice utiliza a soma de todas as variações (formação de creme, sedimentação, floculação, coalescência) que acontecem na amostra dentro de um determinado tempo. Quanto maior for o valor do TSI, significa que menos estável é a mistura, conforme pode ser comprovado na Figura 22.

Figura 22 – TSI do Biodiesel + Al₂O₃

Fonte: o Autor (2023).

A Figura 22 mostra o Índice de Estabilidade Turbiscan para as três misturas de biodiesel com suas diferentes concentrações de nanopartículas de Al₂O₃, sendo a com 150 ppm a de maior valor, sendo assim, a mistura mais instável dentre as três. Isso se deve pela maior quantidade de partículas presentes na solução, o que implica em uma maior tendência em sedimentar na amostra.

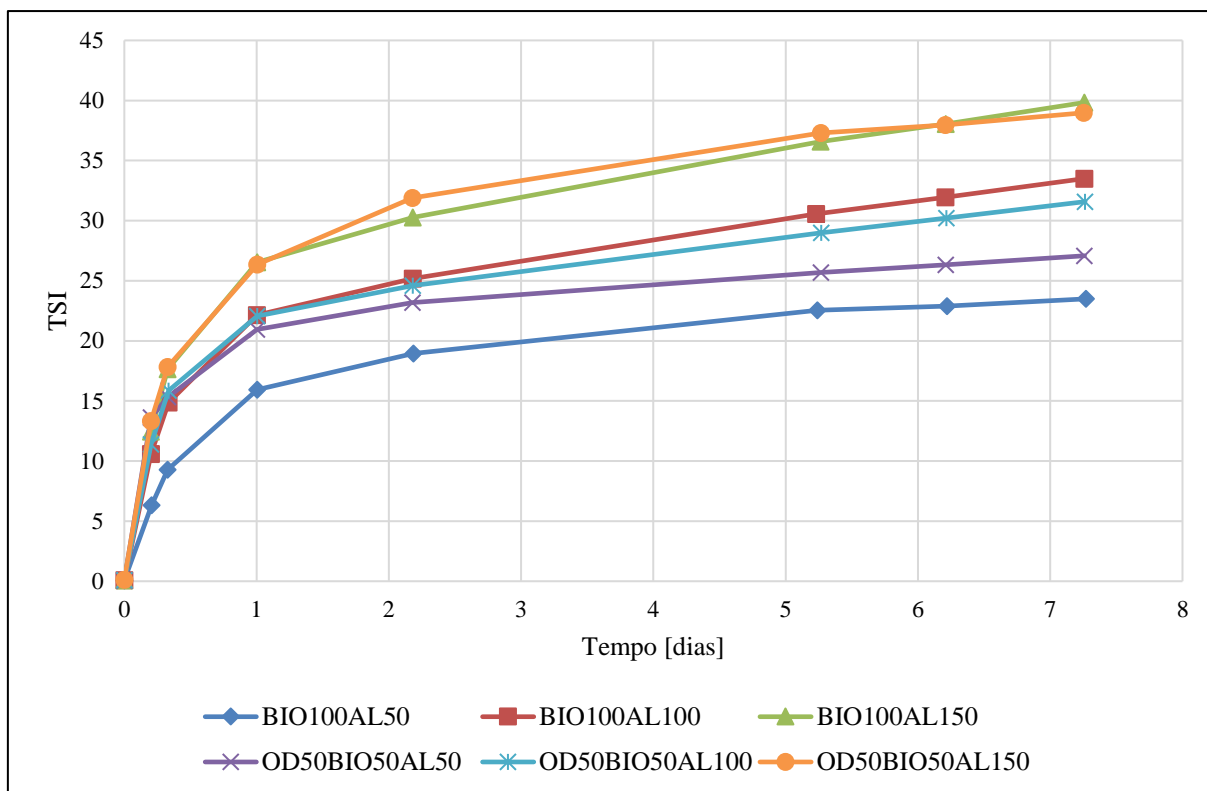
Na Figura 23, estão presentes as curvas de estabilidade das misturas de óleo diesel, biodiesel e as diferentes concentrações de óxido de alumínio. Neste gráfico, observa-se que a mistura mais instável é representada pela amostra que contém a maior concentração, 150 ppm, assim como as amostras presentes na Figura 22. As soluções que se mostraram mais estáveis foram aquelas que portavam a menor concentração de nanopartículas, ou seja, com 50 ppm.

Figura 23 – TSI do Óleo diesel + Biodiesel + Al₂O₃

Fonte: o Autor (2023).

A fim de comparação, na Figura 24 foram reunidas as curvas de todas as amostras, sendo a mistura BIO100AL50 a mais estável dentre todas e a BIO100AL150 a mais instável de todas, mas tendo a OD50BIO50AL150 estado muito próxima. Observa-se dentre as misturas com a mesma concentração de nanopartículas, as com 50 ppm foram as que apresentaram maior variação de estabilidade, enquanto as amostras com 100 e 150 ppm apresentaram valores mais próximos.

Figura 24 – Comparação do TSI de todas as amostras

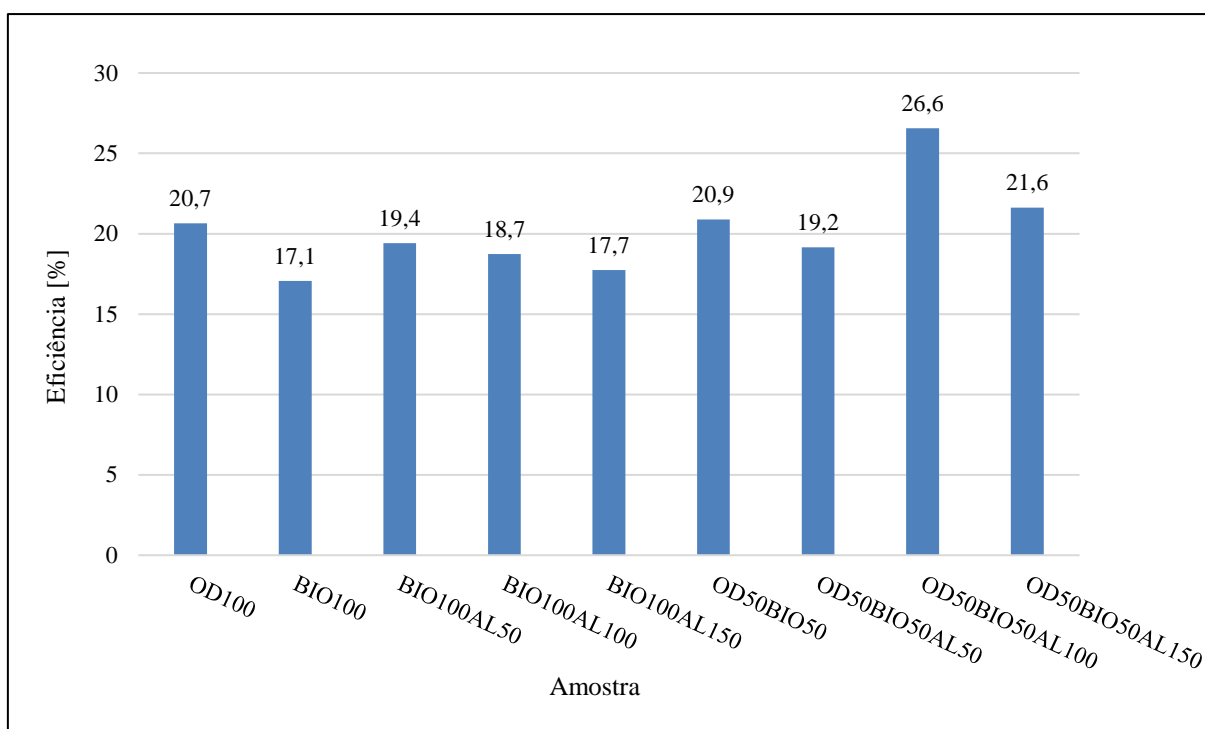


Fonte: o Autor (2023).

4.2 EFICIÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS

Um dos principais indicadores de desempenho refere-se à eficiência de conversão de combustível, a qual está atrelada a potência desenvolvida pelo motor, consumo e o poder calorífico inferior do combustível. A Figura 25 apresenta a eficiência para cada uma das amostras utilizadas nos testes.

Figura 25 – Eficiência dos combustíveis



Fonte: o Autor (2023).

Como pode ser observado, dentre as amostras com apenas biodiesel e alumina, ocorreu um perceptível aumento na eficiência com o incremento de 50 ppm (BIO100AL50), em comparação com a BIO100, passando de 17,1% para 19,4%. À medida que se aumentou a concentração de alumina para 100 e 150 ppm, a eficiência reduziu, sendo de 18,7% para a BIO100AL100 e 17,7% para a BIO100AL150, mesmo assim, mantiveram-se superiores aos 17,1% da BIO100.

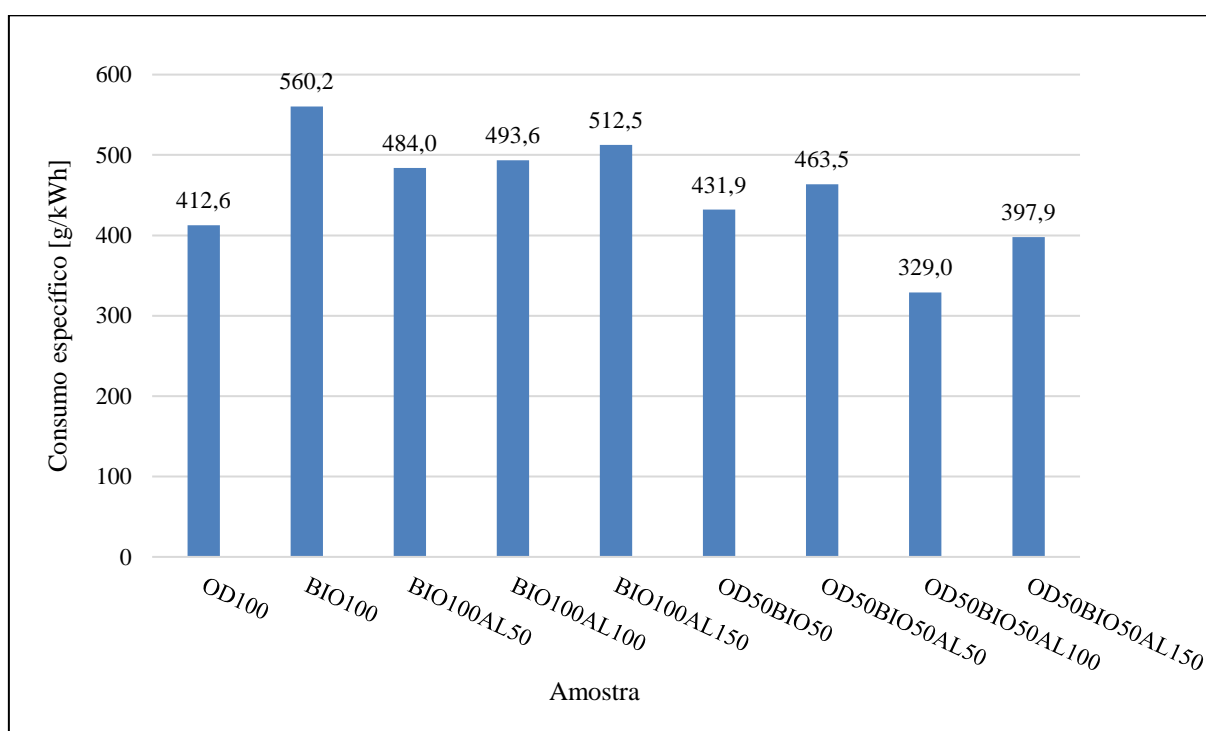
Avaliando a eficiência dos combustíveis puros, o biodiesel (17,1%) apresentou uma evidente redução em relação ao óleo diesel (20,7%). Isso se deve a maior viscosidade e ao menor poder calorífico do biodiesel, exigindo maior vazão desse combustível para manter o motor em operação, nas mesmas condições de quando estava operando com o óleo diesel.

Analisando a amostra OD50BIO50, obteve eficiência de 20,9%, praticamente não sofreu alteração em comparação a eficiência da OD100. A amostra OD50BIO50AL50 obteve eficiência de 19,2%, sendo menor em comparação a OD50BIO50. Já a eficiência da amostra OD50BIO50AL150, foi superior a OD50BIO50, sendo de 21,6%. No entanto, a amostra que se destacou foi a OD50BIO50AL100, tendo o valor de 26,6%, sendo superior a todas as outras amostras.

4.3 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL

Com o auxílio do software Catman®, da placa de aquisição de dados da HBM e da célula de carga de 2 kg, foi possível encontrar o combustível consumido em cada ensaio, apresentados na Figura 26. Esses valores estão expressos sobre o consumo específico, na unidade g/kWh.

Figura 26 – Consumo específico de combustível



Fonte: o Autor (2023).

De acordo com os valores demonstrados acima, observa-se que o consumo específico da amostra OD100 ficou em 412,6 g/kWh, enquanto que da amostra BIO100 ficou em 560,2 g/kWh. Isso se deve pelo fato já comentado anteriormente que, devido ao menor poder calorífico do biodiesel, será necessário maior consumo de combustível para manter o motor em funcionamento de acordo com a carga e rotação definidas.

Dentre as amostras de biodiesel com aditivo de óxido de alumínio, a BIO100AL50 indicou o resultado mais satisfatório, com 484 g/kWh. As misturas BIO100AL100 e BIO100AL150 apresentaram valores maiores, sendo 493,6 e 512,5 g/kWh, respectivamente. As três amostras indicaram que houve redução no consumo de combustível, em comparação a BIO100, com a adição de nanopartículas de alumina no biodiesel.

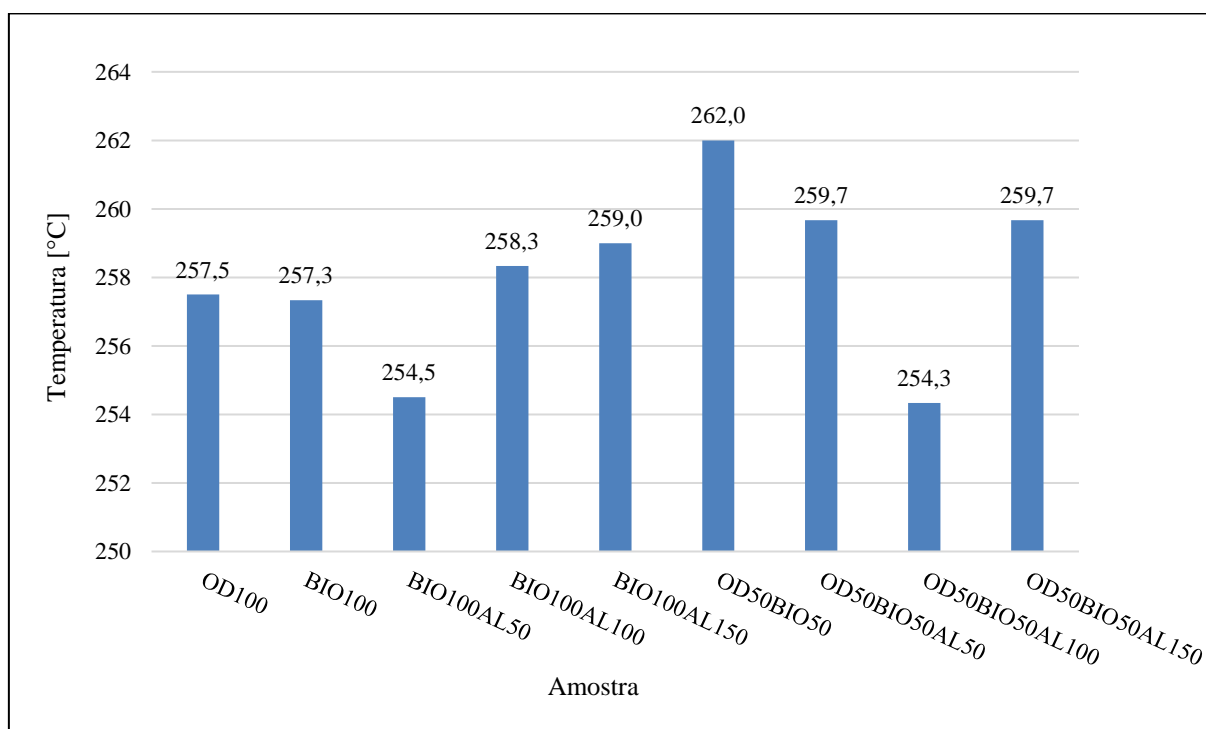
As misturas contendo óleo diesel, biodiesel e alumina, apresentaram os menores consumos se comparadas tanto a BIO100 quanto a OD50BIO50. Essas amostras ficaram com valores próximos ao consumo de OD100 e até menor quando se tratando da amostra OD50BIO50AL100, a qual se mostrou como a melhor alternativa, tendo o valor mais favorável de consumo.

Pode-se evidenciar também a relação inversa existente entre o consumo específico e a eficiência dos combustíveis, pois quanto maior foi o consumo, implicou em uma menor eficiência. Característica essa que, pode ser notada com a maior eficiência dentre as amostras, 26,6% da OD50BIO50AL100, cuja foi a que apresentou o menor valor de consumo dentre as outras, ou seja, 329 g/kWh.

4.4 TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO

Com o auxílio do termopar, foi possível detectar a temperatura dos gases imediatamente na saída do motor. A Figura 27 exhibe a temperatura de exaustão dos gases para os combustíveis analisadas.

Figura 27 – Temperatura dos gases de exaustão



Fonte: o Autor (2023).

Observa-se que houve bastante oscilação nas temperaturas medidas, tendo as amostras OD100 e BIO100 valores bem próximos. A temperatura dos gases de escape do combustível BIO100AL50 (254,5 °C) ficou em torno de 3 °C abaixo das temperaturas do OD100 e do BIO100, enquanto as amostras BIO100AL100 e BIO100AL150 apresentaram valores superiores, 258,3 e 259 °C respectivamente.

A mistura OD50BIO50 obteve a maior temperatura medida, sendo de 262 °C, tendo as amostras OD50BIO50AL50, OD50BIO50AL100 e OD50BIO50AL150 valores inferiores. Os gases da mistura OD50BIO50AL100 mostraram-se cerca de 8 °C menor.

4.5 ANÁLISE DE EMISSÕES

No decorrer deste tópico, notar-se-á que nas figuras estão sendo utilizadas as nomenclaturas BIO100ALX e OD50BIO50ALX, adotando-se a letra “X” para representar as diferentes concentrações de alumina na mistura, ou seja, essa letra poderá assumir os valores de 50, 100 ou 150 ppm.

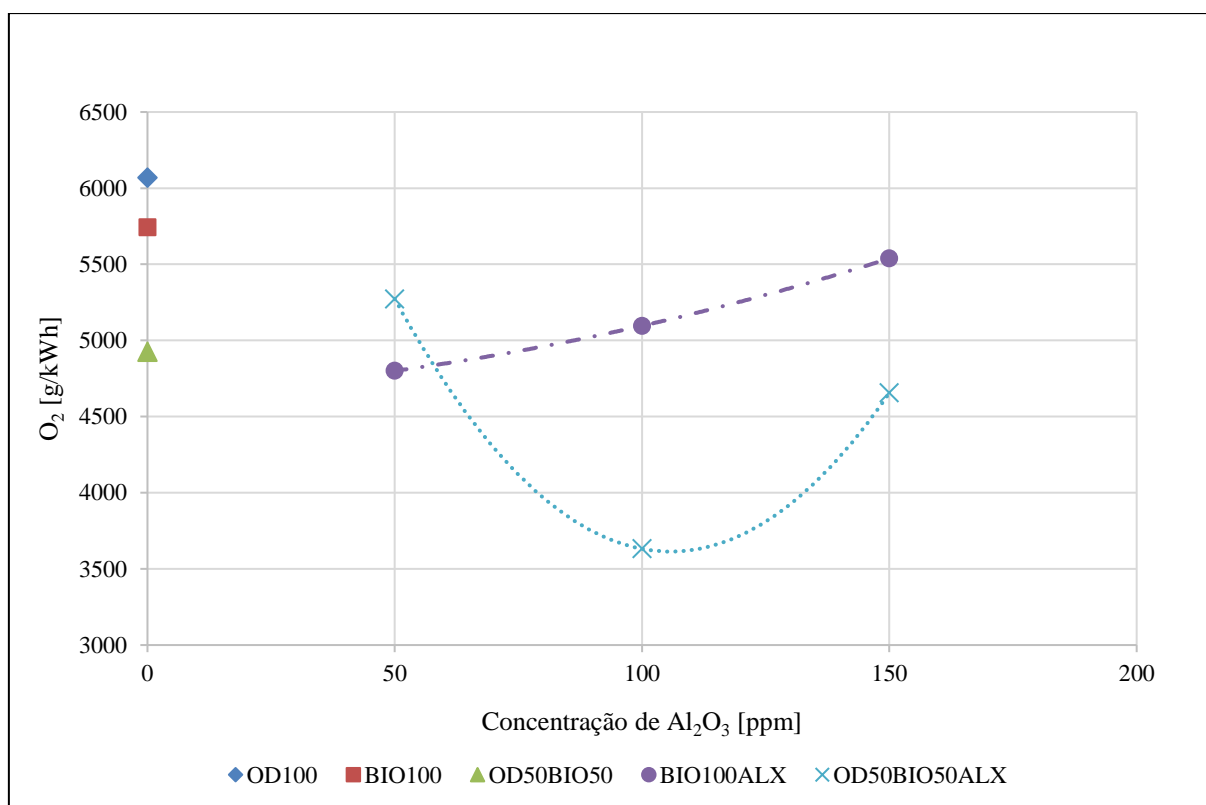
4.5.1 Emissões de O₂

Pela Figura 28, nota-se que dentre as misturas de biodiesel e alumina, a amostra com menor concentração (BIO100AL50) obteve o resultado mais baixo referente aos índices de oxigênio, em torno de 4800 g/kWh. Em contrapartida, com a maior concentração (BIO100AL150), foi obtido um valor 15,4% superior em relação a mistura com 50 ppm, chegando a um valor próximo do biodiesel puro (3,6% inferior), na faixa dos 5600 g/kWh. Ainda, a concentração de oxigênio da amostra BIO100AL150 ficou 8,7% inferior a OD100. Percebe-se o incremento dos índices de oxigênio na exaustão com o aumento da concentração de nanopartículas, devido ao óxido de alumínio possuir oxigênio em sua composição.

Relativo as misturas de biodiesel, óleo diesel e alumina, constatou-se que com a concentração de 50 ppm de alumina, alcançou-se torno de 5300 g/kWh de emissões de oxigênio. Esse valor representa 13,1% e 8,2% menor que o índice do OD100 e BIO100, respectivamente, e 7% superior ao OD50BIO50. Avaliando a amostra OD50BIO50AL100, o valor medido foi muito abaixo em comparação às de OD100, BIO100 e OD50BIO50, 40,1%, 36,7% e 26,3%, respectivamente. Isso pode ser benéfico em termos de qualidade da combustão, pelo fato de a

menor presença de O_2 nos gases de exaustão estar atrelada a uma relação ar-combustível mais apropriada. Dessa forma, salienta-se que quanto mais oxigênio estiver presente nos gases de escape, de forma mais pobre estará operando o motor, apontando falta de combustível e excesso de ar na combustão.

Figura 28 – Emissões de O_2



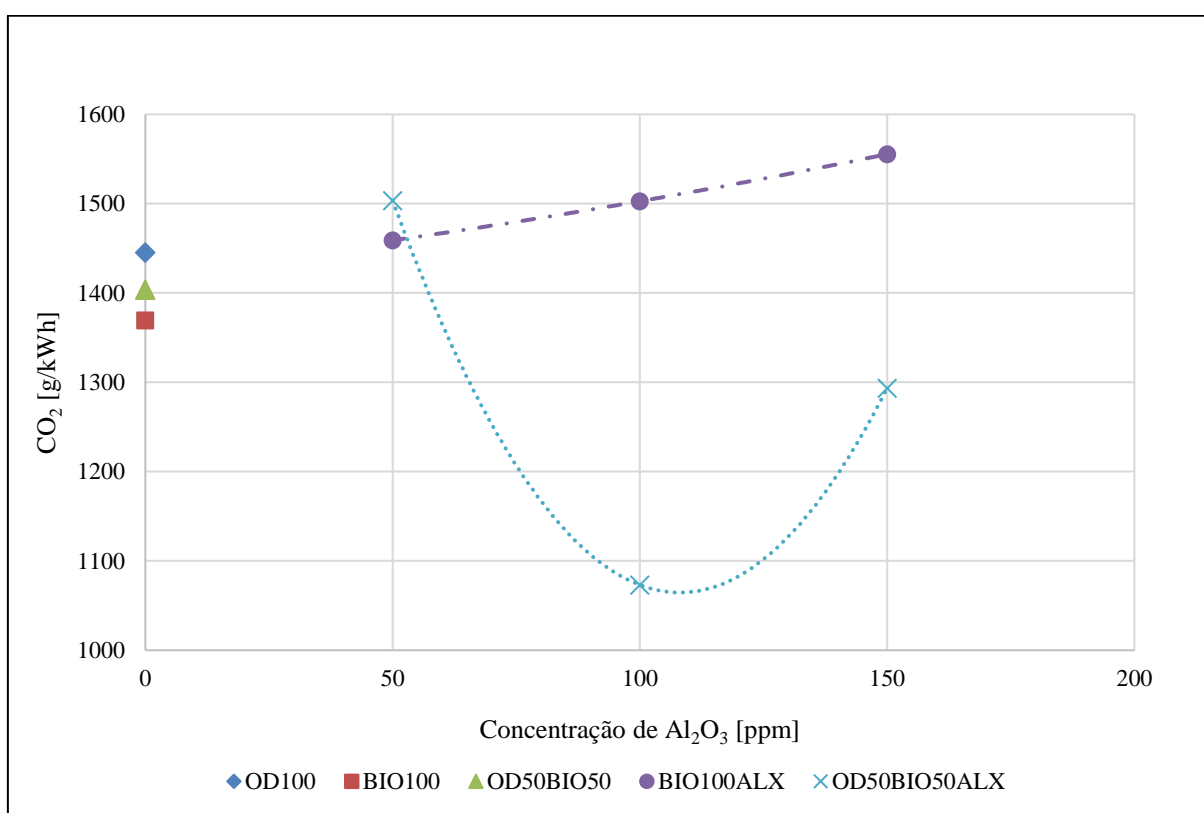
Fonte: o Autor (2023).

4.5.2 Emissões de CO_2

Em relação as emissões de CO_2 , a Figura 29 mostra que a adição de óxido de alumínio ao biodiesel puro, os índices aumentaram gradualmente conforme o incremento de alumina. Quando comparadas com as emissões de dióxido de carbono do BIO100, as amostras de BIO100AL50, BIO100AL100 e BIO100AL150 foram superiores em 6,5%, 9,7% e 13,6%, respectivamente. Se comparadas ao OD100, os valores dessas mesmas amostras ficaram superiores em 1%, 4% e 7,6%. Esses resultados não eram esperados, já que se almejava a redução da emissão de CO_2 com a adição de Al_2O_3 ao biodiesel.

Por outro lado, analisando os dados coletados para as misturas de óleo diesel, biodiesel e alumina, os valores foram mais satisfatórios. Com exceção dos índices de CO₂ para a amostra OD50BIO50AL50, que ainda mostrou um valor elevado (em torno de 7,1% superior, equiparado a mistura OD50BIO50), as amostras OD50BIO50AL100 e OD50BIO50AL150 foram reduzidos. Com a amostra de OD50BIO50AL100, encontrou-se a maior redução na emissão de CO₂, por volta de 23,6%, e para a amostra OD50BIO50AL150, redução de 7,9%, em comparação a mistura OD50BIO50.

Figura 29 – Emissões de CO₂



Fonte: o Autor (2023).

4.5.3 Emissões de CO

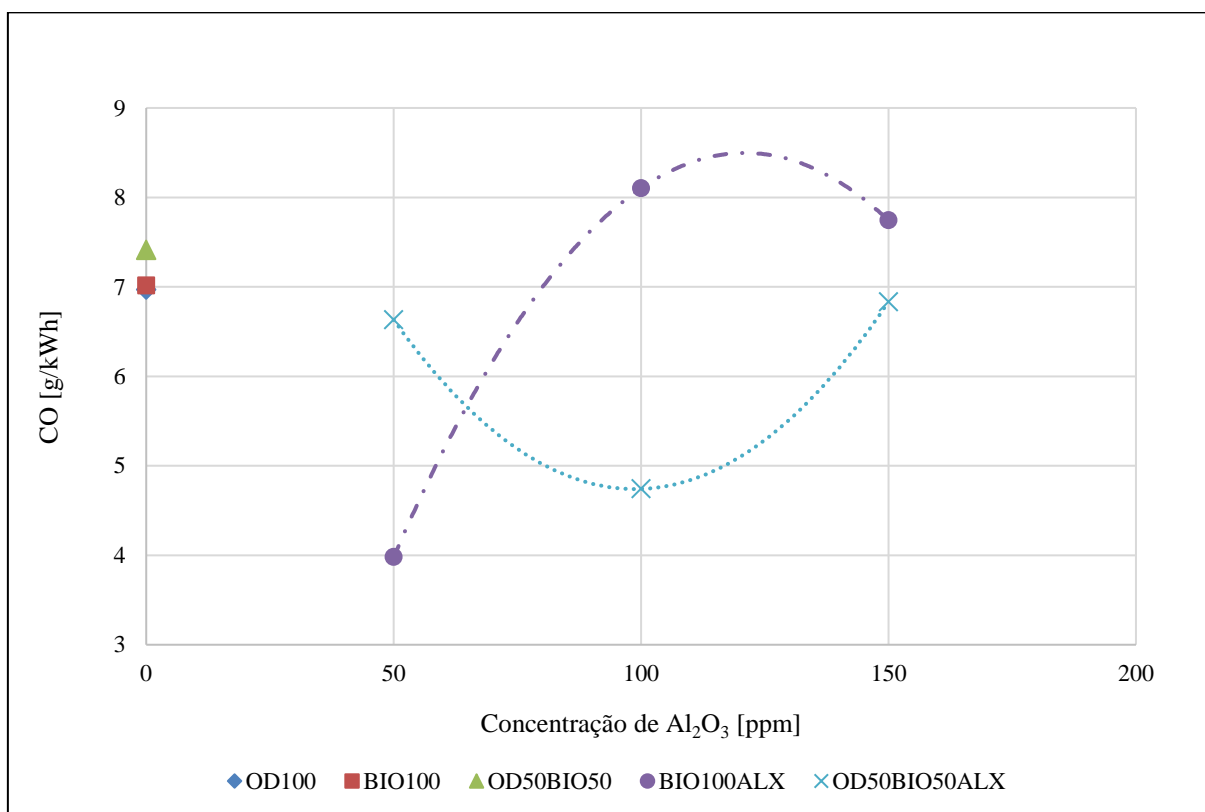
A Figura 30 apresenta as emissões de monóxido de carbono, as quais sofreram uma redução significativa para a mistura BIO100AL50, representando 43,3%, em comparação ao BIO100. Já, na mesma comparação, as amostras BIO100AL100 e BIO100AL150, apresentaram aumento nas emissões de CO, sendo, respectivamente, 15,5% e 13,4% maiores.

Esses valores são muito próximos se tratando do óleo diesel, já que a medição dos níveis de CO para o OD100 e BIO100 foram praticamente iguais, na faixa de 7 g/kWh.

Todos dados coletados para as misturas com óleo diesel, biodiesel e alumina, acusaram redução nos índices de monóxido de carbono. Confrontando os valores com a mistura OD50BIO50, a amostra com redução mais expressiva foi a OD50BIO50AL100, com 36%. Essa diferença foi menos significativa para as amostras com as outras concentrações, sendo 10,5% menor com OD50BIO50AL50 e 7,8% menor com OD50BIO50AL150.

Os dados podem ser observados na Figura 30, onde os valores foram bastante satisfatórios, pensando que a pretensão do teste foi reduzir as emissões de CO nos gases de exaustão, significando menor geração de gases nocivos ao meio ambiente.

Figura 30 – Emissões de CO



Fonte: o Autor (2023).

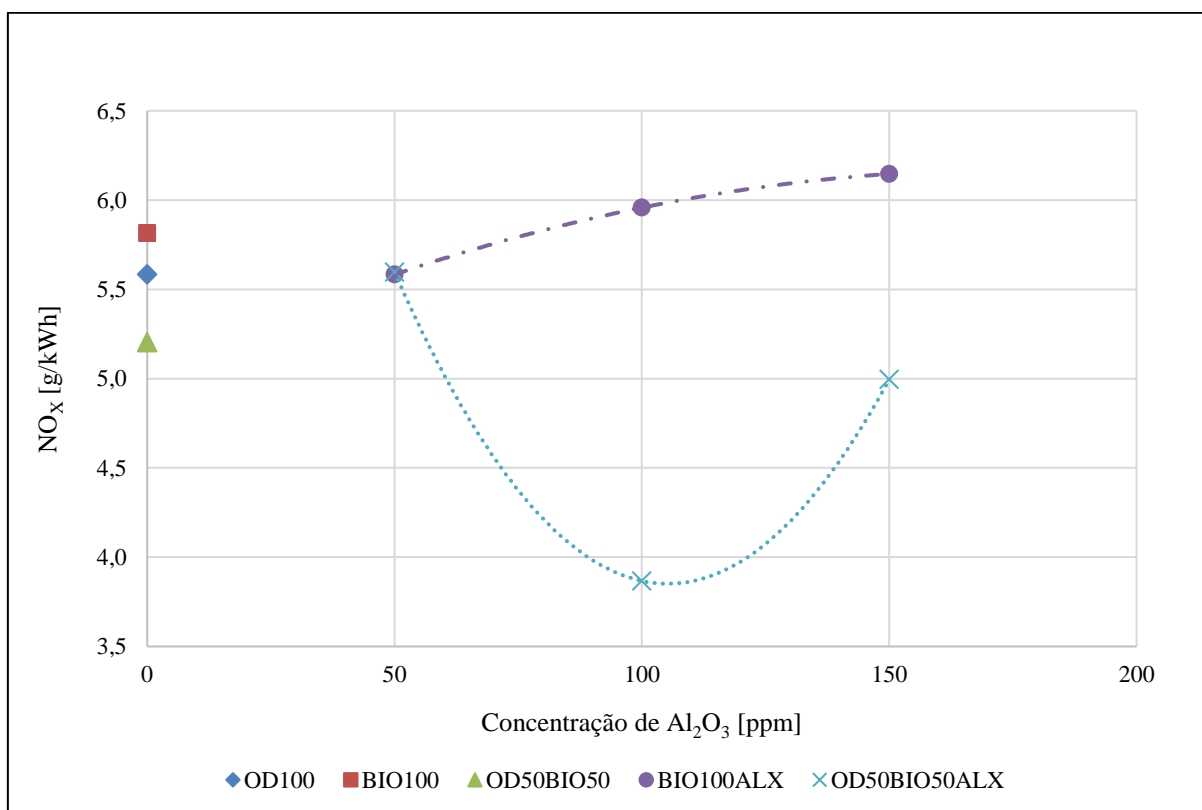
4.5.4 Emissões de NO_x

No que tange as emissões de NO_x, cujo representa a soma das emissões de NO e NO₂, a Figura 31 apresenta os índices coletados. Percebe-se que com a adição de alumina ao biodiesel

puro, houve uma pequena redução nas emissões com o combustível BIO100AL50, em torno de 4%, comparando-o com o valor do BIO100. Essa mesma amostra atingiu igual patamar de geração de NO_x que o óleo diesel puro. No entanto, as amostras BIO100AL100 e BIO100AL150, produziram maiores taxas de NO_x equiparadas ao biodiesel puro, sendo 2,5% e 5,7%, respectivamente.

Com as misturas OD50BIO50AL100 e OD50BIO50AL150, reduções nas emissões de NO_x foram constatadas. Comparando a amostra OD50BIO50AL100 com a OD50BIO50, houve a redução mais significativa, sendo de 25,7%. Se confrontada aos valores do OD100 e BIO100, esse percentual é ainda maior, sendo de 30,7% e 33,5% respectivamente. A amostra OD50BIO50AL150, formou em torno de 4% menos NO_x do que a OD50BIO50. Já a amostra OD50BIO50AL50, apresentou aumento de 7,6% em comparação ao OD50BIO50 e um valor bastante próximo ao OD100.

Figura 31 – Emissões de NO_x

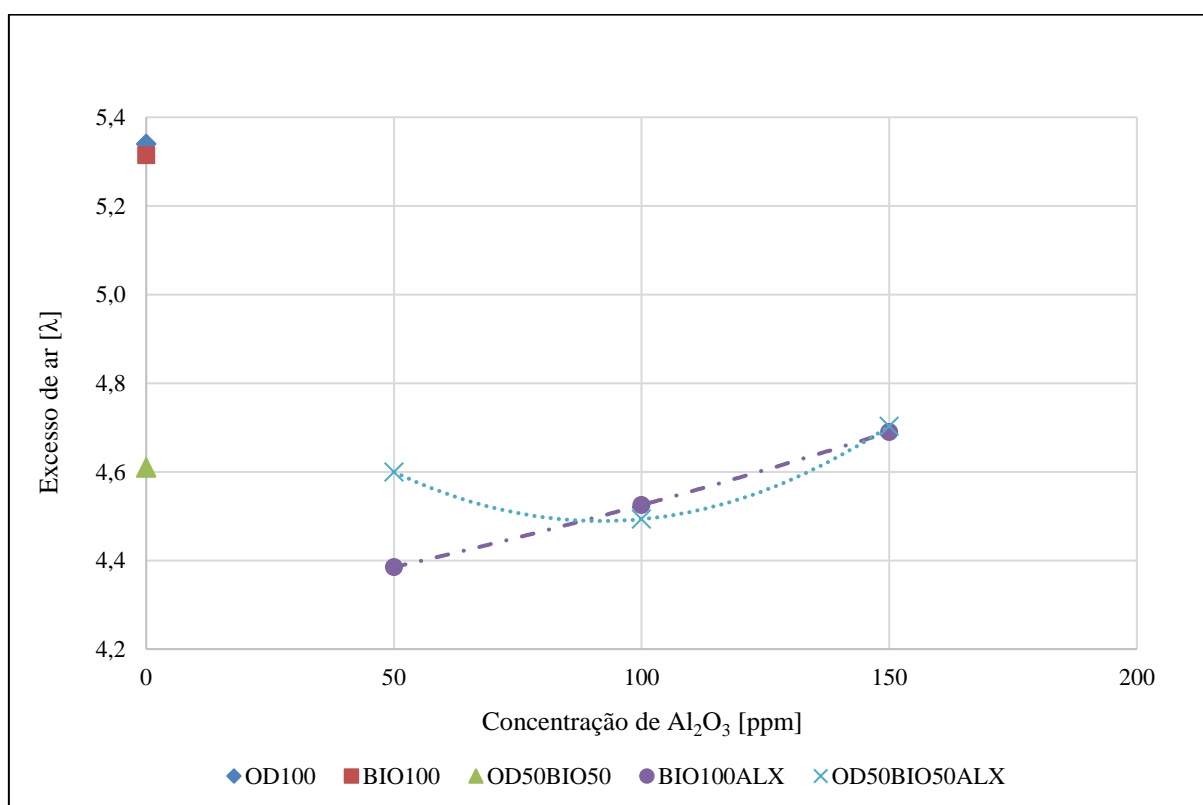


Fonte: o Autor (2023).

4.6 EXCESSO DE AR

De acordo com a Figura 32, o excesso de ar detectado pelo analisador de gases, apresentou significativa redução em relação às misturas que continham óxido de alumínio, se comparadas às amostras OD100 e BIO100. As amostras OD100 e BIO100, obtiveram valores de lambda (λ) bastante próximos, sendo 5,34 e 5,32 respectivamente. Comparando-se a amostra BIO100 com as misturas de biodiesel aditivado com alumina, a BIO100AL50 obteve valor de lambda 17,5% menor (4,39), a BIO100AL100 14,9% menor (4,53) e a BIO100AL150 11,8% menor (4,69). Já as misturas de óleo diesel, biodiesel e alumina, se comparadas a amostra OD50BIO50, a OD50BIO50AL50 apresentou valor praticamente igual (em torno de 4,61). A amostra OD50BIO50AL100 ficou 2,5% abaixo (4,49) e a OD50BIO50AL150, 2% acima (4,70).

Figura 32 – Excesso de ar



Fonte: o Autor (2023).

Como o excesso de ar representa a quantidade de oxigênio além da necessária para que a reação química completa da combustão aconteça, esse fator pode ter algumas implicações. Uma delas é a eficiência da combustão, na qual o excesso de ar pode resultar em uma combustão

menos eficiente, sendo que o calor gerado é usado para aquecer o ar em excesso, não contribuindo na geração de energia pela queima do combustível. Ainda assim, o consumo de combustível pode aumentar, já que parte da energia disponível no combustível é usada para aquecer o ar excedente. Além disso, as emissões de poluentes também podem aumentar, já que a combustão incompleta pode formar produtos indesejados que são eliminados na exaustão.

5 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados neste trabalho mostraram que há vantagens na utilização de óxido de alumínio como aditivo do biodiesel, porém, em certas condições, não se faz tão proficiente. No entanto, as análises dos gases de exaustão comprovaram que os índices de O_2 emitidos pelos combustíveis aditivados foram menores que os índices medidos para o óleo diesel e biodiesel puros, recebendo destaque a amostra que continha biodiesel com 50 ppm de alumina e a mistura de óleo diesel, biodiesel e 100 ppm de alumina. Isso representa benefícios principalmente para a qualidade da combustão desses combustíveis, já que menos oxigênio na exaustão expressa uma relação ar-combustível mais equilibrada. Isso é corroborado também pelos dados de excesso de ar coletados na saída do motor. Perante isso, pode-se considerar essas concentrações de alumina como boa alternativa para melhorar as propriedades do biodiesel e considerar a substituição dos combustíveis fósseis.

As emissões de dióxido de carbono aumentaram com a utilização das nanopartículas como aditivo ao biodiesel, tendo índices superiores até mesmo ao óleo diesel puro. Em contrapartida, com a mistura de óleo diesel, biodiesel e alumina, valores mais satisfatórios foram encontrados. As misturas de óleo diesel com biodiesel e as concentrações de 100 e 150 ppm de Al_2O_3 obtiveram maior relevância, com taxas menores expelidas pelo escapamento. Com isso, essas duas concentrações de alumina misturadas a 50% de óleo diesel e 50% de biodiesel, mostraram-se uma proporção adequada para melhorar as emissões oriundas da queima desse combustível e ser uma opção para substituir o uso de combustíveis inteiramente de origem não renovável.

Levando-se em consideração os valores encontrados das emissões de monóxido de carbono, a amostra de biodiesel aditivado com 50 ppm de alumina apresentou o melhor resultado entre todos. Ainda assim, as misturas de óleo diesel, biodiesel e alumina também tiveram resultados adequados, ou seja, abaixo dos índices de emissão de CO do óleo diesel e do biodiesel puros, havendo maior significância na amostra com 100 ppm. A menor presença desse gás nos resíduos da combustão em motores, significa maior qualidade do ar atmosférico disponível para respiração. Além disso, essas duas amostras de maior destaque podem ser uma estratégia para minimizar a influência desse gás no aquecimento global e favorecer a vida dos demais organismos.

Quanto aos resultados de NO_x , este estudo demonstrou que a concentração de 50 ppm de alumina acrescentada, tanto ao biodiesel puro quanto na sua mistura de óleo diesel e biodiesel, pode reduzir as emissões para valores equivalentes aos do óleo diesel puro. No

entanto, foram as concentrações de 100 e 150 ppm que surtiram maior efeito. Essas concentrações permitiram reduções bastante significativas dos índices de NO_x , quando misturadas em soluções de 50% óleo diesel e 50% biodiesel. Dessa forma, evidencia-se a efetividade das nanopartículas de alumina nessas concentrações para reduzir os impactos ambientais causados pelo NO_x .

Em termos de eficiência dos combustíveis, a mistura com óleo diesel, biodiesel e 100 ppm de alumina também obteve maior notoriedade. Em síntese, sua elevada eficiência, atrelada ao seu baixo consumo específico e seus melhores índices de emissões de gases, revelaram ser esta amostra a mais favorável para aplicação nos motores de combustão interna, levando-se em consideração os objetivos deste trabalho.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se que os testes no motor sejam realizados o mais rápido possível após o processo de homogeneização das misturas (através do misturador ultrassônico), a fim de se evitar o máximo possível a desestabilização das amostras e, dessa forma, reduzir variações muito discrepantes nos resultados. Pensando nisso, a questão da desestabilização seria um dos grandes problemas na hipótese de se produzir as misturas para aplicação em larga escala. Ainda, sugere-se pesquisas para utilização de outros materiais como aditivos ao biodiesel. Entre eles, as nanopartículas de nióbio e de óxido de grafeno, pois cogitou-se o emprego neste trabalho e estudos recentes vêm abrangendo estes materiais, atingindo resultados bastante expressivos no que diz respeito ao desempenho dos combustíveis e às emissões de gases nocivos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKKOLI, K. M. *et al.* Influence of injection pressure and aluminium oxide nano particle-added fish oil methyl ester on the performance and emission of compression ignition engine. *Energies*, v. 15, n. 24, p. 9491, 14 dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15249491>. Acesso em: 05 jun. 2023.

ALQUATI, Gabriel Ulysses Andrade. **Análise de sensibilidade de velocidade de chama para misturas contendo dimetil éter e metano em ar nos limites de inflamabilidade**. 2020. 23 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Acesso em: 24 abr. 2023.

ANCHUPOGU, Praveen; RAO, Lakshmi Narayana; BANAVATHU, Balakrishna. Effect of alumina nano additives into biodiesel-diesel blends on the combustion performance and emission characteristics of a diesel engine with exhaust gas recirculation. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, n. 23, p. 23294-23306, 4 jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2366-7>. Acesso em: 08 jun. 2023.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2021b. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2021/anuario-2021.pdf>. Acesso em: 07 maio 2023.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biodiesel**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel#:~:text=O%20biodiesel%20%C3%A9%20um%20combust%C3%ADvel,o%20%C3%A9ster%20e%20a%20glicerina>. Acesso em: 01 maio 2023.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim Trimestral de Preços e Volumes de Combustíveis nº 9**. 2021c. 1º Trimestre/2021 - Superintendência de Defesa da Concorrência. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/btpvc-1/2021/boletim-trimestral-sdc-9-1t21-novo.pdf>. Acesso em: 10 maio 2023.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Brasil avança no setor de biocombustíveis**. 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/07/brasil-avanca-no-setor-de-biocombustiveis#:~:text=Os%20biocombust%C3%ADveis%20s%C3%A3o%20derivados%20de,%C3%ADndice%20de%20emiss%C3%A3o%20de%20poluentes..> Acesso em: 18 mar. 2023.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores. 2022a. Valores médios para o ano de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2022/outras-pecas-documentais/fatores-conversao-2022.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2023.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RESOLUÇÃO ANP Nº 50, DE 23.12.2013, DOU 24 DE DEZEMBRO DE 2013**. 2022b. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-50-2013?origin=instituicao&q=50/2013>. Acesso em: 30 abr. 2023.

ARAÚJO, R. S. de.; SOUSA, F. L. N. de .; VANDERLEY, P. S. .; BENTES, S. O. da S.; GOMES, L. M. .; FERREIRA, F. C. L. . **Fontes de energia renováveis: pesquisa, tendências e perspectivas sobre práticas sustentáveis**. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento, [S. l.], v. 11, n. 11, p. e468111133893, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.33893. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/33893>. Acesso em: 01 abr. 2023.

BARBOSA, Marianna Melo. **Produção, caracterização e análise da exergia do biodiesel de soja em escala de laboratório**. 2018. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Acesso em: 07 maio 2023.

BERTUOL, Vinícius. **Análise da combustão de um motor a diesel operando nos modos mono e bi-combustível**. 2014. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014. Acesso em: 14 mar. 2023.

BONDARIK, Roberto; PILATTI, Luiz Alberto; HORST, Diogo José. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no brasil. **Interciencia**, Venezuela, v. 43, n. 10, p. 680-688, out. 2018. Acesso em: 22 mar. 2023.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2018. 548 p. Acesso em: 08 abr. 2023.

CARVALHO, Márcio Augusto Sampaio de. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011. Acesso em: 22 abr. 2023.

CHACKO, Nivin; JEYASEELAN, Thangaraja. Comparative evaluation of graphene oxide and graphene nanoplatelets as fuel additives on the combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel blend. **Fuel Processing Technology**. Vellore, p. 1-17. jul. 2020. Acesso em: 25 mar. 2023.

CLAVON, Alexander Peralvo; QUILUMBANGO, Tamia; BENAVIDES, Ignacio. Biodiesel aditivado con nanopartículas metálicas para mejorar las prestaciones de un motor térmico. **INNOVATION & DEVELOPMENT IN ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES**, v. 4, n. 1, p. 13, 26 jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.53358/ideas.v4i1.701>. Acesso em: 10 jun. 2023.

CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. . **Os impactos da má qualidade do óleo diesel brasileiro**. 2012. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/161>. Acesso em: 18 mar. 2023.

COSTA, Yoge Jeronimo Ramos da. **Análises energética e exergética de um motor de combustão interna operando com mistura de diesel e gás natural**. 2007. 185 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007. Acesso em: 16 abr. 2023.

DOU. DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. . **DESPACHO DO PRESIDENTE DA REPÚBLICA**. 2023. Altera a Resolução CNPE nº 16, de 29 de outubro de 2018, que dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional, e dá outras providências.. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-473383252>. Acesso em: 31 mar. 2023.

DOVICH FILHO, Fernando Bruno. **Determinação dos potenciais técnico e econômico da geração de eletricidade a partir da biomassa: estudo de caso do estado de minas gerais**. 2022. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2022. Acesso em: 22 mar. 2023.

DUARTE, Victória Huch; VALENTINI, Marlon Heitor Kunst; SANTOS, Gabriel Borges dos; NADALETTI, Willian Cezar; VIEIRA, Bruno. **Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel**. Meio Ambiente (Brasil). Pelotas, p. 50-68. jul. 2022. Acesso em: 24 mar. 2023.

ECO-SONICS. **Como o ultrassom é utilizado na produção de biodiesel**. Disponível em: <https://www.ecosonics.com.br/ultrassom-utilizado-na-producao-de-biodiesel/>. Acesso em: 05 out. 2023.

EL-SEESY, Ahmed I.; HASSAN, Hamdy; OOKAWARA, S.. Performance, combustion, and emission characteristics of a diesel engine fueled with Jatropa methyl ester and graphene oxide additives. **Energy Conversion And Management**. Alexandria, p. 674-686. 15 jun. 2018. Acesso em: 25 mar. 2023.

FORMULATION. **Turbiscan Lab**. Disponível em: <https://formulation.com/product/turbiscan-lab/>. Acesso em: 10 out. 2023.

GALVÃO, Luzia Patrícia Fernandes de Carvalho. Avaliação termoanalítica da eficiência de antioxidantes na estabilidade oxidativa do biodiesel de mamona. 2007. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007. Acesso em: 15 maio 2023.

GANESAN, V.. IC Engines. 4. ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2012. 730 p. Acesso em: 07 abr. 2023.

GARCIA, Roberto. Combustíveis e Combustão Industrial. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência Ltda., 2013. 340 p. Acesso em: 16 abr. 2023.

GIACOSA, Dante. Motores Endotermicos. 3. ed. Espanha: Dossat S.A., 1970. 748 p. Acesso em: 14 abr. 2023.

GUIDUCCI, Rosana do Carmo Nascimento; LAVIOLA, Bruno Galveas. **Cenários de ampliação da demanda de biodiesel e processamento de soja no Brasil**. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DE BODIESEL FLORIANÓPOLIS, SANTA, 7., 2019, Florianópolis. 7º Congresso da Rede Brasileira de

Tecnologia e Inovação de Biodiesel Florianópolis, Santa. Florianópolis: Embrapa, 2019. p. 871-872. Acesso em: 28 mar. 2023.

HEYWOOD, John B.. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2. ed. United States: McGraw-Hill Education, 2018. Acesso em: 12 abr. 2023.

HOSEINI, S.s.; NAJAF, G.; GHOBADIAN, B.; EBADI, M.T.; MAMAT, R.; YUSAF, T.. Biodiesels from three feedstock: The effect of graphene oxide (GO) nanoparticles diesel engine parameters fuelled with biodiesel. **Renewable Energy**. Elsevier, p. 190-201. jun. 2019a. Acesso em: 22 maio 2023.

HOSEINI, S.s.; NAJAF, G.; GHOBADIAN, B.; EBADI, M.T.; MAMAT, R.; YUSAF, T.. Performance and emission characteristics of a CI engine using graphene oxide (GO) nanoparticles additives in biodiesel-diesel blends. **Renewable Energy**. Elsevier, p. 458-465. jun. 2019b. Acesso em: 22 maio 2023.

KAUSHIK, Yatendra et al. Effect of Al₂O₃ Nanoparticles on Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled with Diesel–Neem Biodiesel Blends. *Sustainability*, v. 14, n. 13, p. 7913, 29 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14137913>. Acesso em: 07 jun. 2023.

LEITE, Amanda Monteiro. **Materiais baseados em óxido de grafeno como catalisadores na reação de abertura de anel de epóxido de biodiesel**. 2017. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Tecnológica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Acesso em: 16 maio 2023.

LIMA, Daniel Rotolo Oliveira de. **Simulação numérica das propriedades físico-químicas e termodinâmicas de misturas diesel-biodiesel-isômeros do pentanol**. 2019. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

MARTINELLI JÚNIOR, Luiz Carlos. *Motores de Combustão Interna: conceitos básicos*. Panambi: Unijuí, 2001. Acesso em: 12 abr. 2023.

MARTINS, Jorge. *Motores de Combustão Interna*. 2. ed. Porto: Publindústria, 2006. 437 p. Acesso em: 18 abr. 2023.

MCTI, Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa. **Turbiscan Lab**. 2022. Disponível em: <https://pnipe.mctic.gov.br/equipment/2640>. Acesso em: 10 out. 2023.

OLIVEIRA, Thays Paes de. **Diagnóstico e análise de ondas de calor e de frio em minas gerais**. 2019. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Acesso em: 02 abr. 2023.

PEREIRA, Carlos Augusto Arentz. **A ascensão do combustível fóssil: aspectos tecnológicos, sociais, econômicos e ambientais da substituição da lenha pelo carvão mineral**. *Revista Internacional de Ciências*, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 127-132, 29 ago. 2019. Universidade de Estado do Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.12957/ric.2019.43402>. Acesso em: 20 mar. 2023.

PETROBRAS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ**. 2021a. Disponível em: <https://www.vibraenergia.com.br/>. Acesso em: 24 abr. 2023.

PETROBRAS. **Óleo Diesel**: informações técnicas. Informações Técnicas. 2021b. Disponível em:

https://petrobras.com.br/data/files/04/93/72/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual-de-Diesel_2021.pdf. Acesso em: 27 abr. 2023.

PIRES, Rafael Lôbo de Oliveira. **Potencial de remoção de gases de efeito estufa do sistema de integração pecuária-floresta em áreas de cerrado**. 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronegócio, Fundação Getulio Vargas, São Paulo, 2019. Acesso em: 03 abr. 2023.

RUOSO, Ana Cristina; CAETANO, Nattan Roberto. Análise dos limites de inflamabilidade e de segurança da utilização do etanol hidratado. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 22, n. 2, p. 106-112, 30 jul. 2018. Semestral. Acesso em: 23 abr. 2023.

SANTOS, Mauro Alves dos. **Inserção do biodiesel na matriz energética brasileira**: aspectos técnicos e ambientais relacionados ao seu uso em motores de combustão. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Acesso em: 02 abr. 2023.

SHARMA, Abhishek et al. Effect of α -aluminium oxide nano additives with Sal biodiesel blend as a potential alternative fuel for existing DI diesel engine. *Energy & Environment*, p. 0958305X2211332, 26 out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0958305x221133257>. Acesso em: 06 jun. 2023.

STONE, Richard. *Introduction to Internal Combustion Engines*. 4. ed. London: Palgrave Macmillan, 2012. 494 p. Acesso em: 07 abr. 2023.

STREY, Guilherme Augusto. **Análise de um motor diesel monocilíndrico operando por fumigação de etanol hidratado**. 2017. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017. Acesso em: 29 abr. 2023.

TURMINA, Rafael. **Análise experimental de um motor ciclo diesel operando em modo bi-combustível etanol – óleo de mamona**. 2018. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018. Acesso em: 15 abr. 2023.

TURNIS, Stephen R.. *Introdução à Combustão: conceitos e aplicações*. 3. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2013. 424 p. Tradução de: Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior. Acesso em: 16 abr. 2023.

UNFPA, Fundo de População das Nações Unidas. **À medida que a população mundial atinge 8 bilhões de pessoas, ONU pede solidariedade no avanço do desenvolvimento sustentável para todos**. 2022. Disponível em: <https://brazil.unfpa.org/pt-br/news/a-medida-que-populacao-mundial-atinge-8-bilhoes-de-pessoas-onu-pede-solidariedade-no-avan%C3%A7o-do#:~:text=NOVA%20YORK%2C%20Estados%20Unidos%20%E2%80%93%20De,aumentaram%20a%20expectativa%20de%20vida..> Acesso em: 02 abr. 2023.

VAILATTI, Marcel Alex. **Análise experimental de um motor de combustão interna monocilíndrico estacionário operando em modo bicombustível diesel-etanol**. 2016. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016. Acesso em: 12 jun. 2023.