

EDVALDO GERALDO JUNIOR

EMISSÕES DE UM MOTOR GERADOR ABASTECIDO COM
BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL DE SALMÃO

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
AGOSTO – 2025

EDVALDO GERALDO JUNIOR

**EMISSIONES DE UM MOTOR GERADOR ABASTECIDO COM
BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL DE SALMÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Baricatti.

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
AGOSTO – 2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Geraldo Junior, Edvaldo

Emissões de um motor gerador abastecido com biodiesel de óleo residual de salmão / Edvaldo Geraldo Junior; orientador Reinaldo Aparecido Bariccatti. -- Cascavel, 2025.
76 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2025.

1. Biocombustíveis. 2. Sustentabilidade. 3. Resíduos pesqueiros. 4. Emissões gasosas. I. Bariccatti, Reinaldo Aparecido, orient. II. Título.

EDVALDO GERALDO JUNIOR

Emissões de um motor gerador abastecido com biodiesel de óleo residual de salmão

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



Orientador - Reinaldo Aparecido Baricatti

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



Maritane Prior

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



Jair Antonio Cruz Siqueira

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



Paulo Tadeu Figueira

Centro Universitário de Cascavel (UNIVEL)



Christian Valcir Kniphoff de Oliveira
Centro Universitário de Cascavel (UNIVEL)

Cascavel, 28 de agosto de 2025

A minha esposa Laura, minha filha Maria Fernanda.
Aos meus pais Dora e Edvaldo.
A toda comunidade científica que contribuiu com este trabalho.
A todos aqueles com quem compartilho a vida.

A Felicidade só é real quando compartilhada.
Alexander Supertramp

AGRADECIMENTOS

Minha eterna gratidão a Deus, pela dádiva inestimável da vida, por todas as bênçãos derramadas e por todas as conquistas alcançadas até hoje. Sei que ele sempre esteve e estará ao nosso lado, guiando, protegendo e abençoando imensamente a mim e a minha família.

Ao estimado Prof. Dr. Reinaldo Bariccatti, minha profunda e sincera gratidão. Sua valorosa orientação, permeada por uma vasta sabedoria, não apenas iluminou meu caminho neste trabalho, mas também me inspirou profundamente. Sua notável disponibilidade e atenção dedicada foram absolutamente fundamentais, especialmente ao me acolher e acreditar em meu potencial, mesmo ciente de minha inexperiência inicial nesta área. Sou imensamente grato por todo o apoio constante e a compreensão demonstrada em cada desafio, revelando o ser humano excepcional que o senhor é. Muito, obrigado!

Um agradecimento especial aos professores da Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, pelos valiosos ensinamentos e demais contribuições essenciais para minha formação. Aos meus colegas do programa, em especial ao Benhurt, por toda ajuda e troca de experiências que enriqueceram esta jornada. À Coordenação do Programa, em especial à Vanderléia, por sua inestimável atenção e paciência.

À minha amada esposa Laura Trevisan e à minha querida filha Maria Fernanda. Vocês são a minha maior inspiração e o porto seguro da minha vida. Agradeço imensamente pelo companheirismo inabalável, pelo amor incondicional e pela compreensão que me impulsionaram a cada dia. Vocês são a razão de todo o meu esforço.

Aos meus amados pais, Edvaldo e Dora, e meu irmão Cassio, por todo o amor, apoio e dedicação incondicionais que me trouxeram até aqui.

Estendo meu profundo agradecimento ao Centro Universitário Univel, a todos os professores e à direção da instituição por fornecerem todo o apoio e motivação indispensáveis durante esta pesquisa, em especial ao professor Dr. Paulo Figueira, por sua amizade e incentivo.

A todos os meus amigos, especialmente aos meus irmãos de jornada Eduardo Casagrande, Sérgio Eleutério Junior e Thiago Dala Valle. Obrigado por estarem sempre presentes.

Por fim, e de coração, um agradecimento a todas as pessoas que, de alguma forma, fizeram parte da minha vida e contribuíram com esta caminhada de 42 meses de pós-graduação. Gostaria de poder abraçar a cada um. Por não ser possível, recebam o meu mais sincero e retumbante Muito obrigado!

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEN	Balanço Energético Nacional
BHT	Butil-hidroxitolueno
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
DTG	Termogravimetria Derivada
EGR	Recirculação dos Gases de Escape
EPA	Ácido Eicosapentaenoico
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
HC	Hidrocarbonetos
IEA	International Energy Agency
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Material Particulado
OPEC	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PCS	Poder Calorífico Superior
PDSC	Calorimetria Exploratória Diferencial de Pressão
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PROCONVE P8	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores P8
RPM	Rotações por Minuto
SCR	Redução Catalítica Seletiva
S10	Tipo de óleo diesel com teor máximo de enxofre de 10 mg/kg
TGA	Termogravimetria
Unioeste	Universidade Estadual do Oeste do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

BP0	100% óleo diesel comum S10
BP14	14% biodiesel de óleo de salmão e 86% diesel puro
BP30	30% biodiesel de óleo de salmão e 70% diesel puro
BP100	100% biodiesel de óleo de salmão
C	Constante de calibração do viscosímetro ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
C=O	Carbonila
CH_3OH	Metanol
cm^{-1}	Centímetro recíproco (unidade de número de onda)
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius (unidade de temperatura)
FE	Fluxo de energia ($\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}$)
$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Gramas por centímetro cúbico (unidade de densidade)
$\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$	Gramas por hora (unidade de consumo de combustível)
HC	Hidrocarbonetos
$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	Quilogramas por hora (unidade de consumo mássico)
$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Megajoules por quilograma (unidade de poder calorífico superior)
$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Milímetros quadrados por segundo (unidade de viscosidade cinemática)
<i>mamostra</i>	Massa da amostra (g)
N_2	Nitrogênio
N.m	Newton-metro (unidade de torque)
NaOH	Hidróxido de Sódio
NO	Óxido nítrico
NO_2	Dióxido de nitrogênio
NO_x	Óxidos de nitrogênio
O_2	Oxigênio
$p < 0,05$	Nível de significância estatística
PCS	Poder calorífico superior

ppm	Partes por milhão
R^2	Coeficiente de determinação
s	Segundos (unidade de tempo)
t	Tempo de escoamento do combustível (s)
V _{picnômetro}	Volume do picnômetro (cm ³ ou mL)
v	Viscosidade cinemática
p _{amostra}	Massa específica da amostra (g.cm ⁻³)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reação de Transesterificação catalisada por hidróxido de sódio.	22
Figura 2. Evolução da adição de biodiesel ao diesel mineral no Brasil ao longo do tempo.	23
Figura 3 . Frasco do óleo de salmão utilizado na pesquisa.....	28
Figura 4. Microprocessor Shaker Bath utilizado para agitação e aquecimento em uma das fases de síntese do biodiesel.	29
Figura 5. Bomba calorimétrica utilizada.	32
Figura 6. Imagem ilustrativa da bancada experimental.	34
Figura 7. Motor Buffalo BFD 5 HP.....	34
Figura 8. Especificações técnicas motor Buffalo, Modelo BFD 5 HP.	35
Figura 9. Balança digital com layout de indicador de pesagem.....	35
Figura 10. Célula de carga Alfa, modelo SV.....	36
Figura 11. Analisador de gases da combustão Infracal ELD utilizado no experimento.	37
Figura 12. Sonda de amostragem dos gases de exaustão.	38
Figura 13. Consumo de combustível em função do torque para diferentes proporções de biodiesel de salmão (BP0, BP14, BP30 e BP100).	46
Figura 14. Curva de TGA/DTG do óleo de salmão.....	48
Figura 15. Curva de TGA/DTG do biodiesel obtido a partir do óleo de salmão.....	49
Figura 16. Espectros de FTIR do óleo de salmão e do biodiesel.	50
Figura 17. Superfície de resposta com a média das emissões de CO (ppm) em função do torque (N.m) e do tipo de combustível.....	53
Figura 18. Gráfico de superfície da média das emissões de CO ₂ (%) em função do torque (N.m) e do tipo de combustível (BP0, BP14, BP30 e BP100).	55
Figura 19. Emissões médias de NO _x (ppm) em função do torque (N.m) e do tipo de combustível.	58
Figura 20. Gráfico de superfície com a média das emissões de HC (ppm) em função do torque e do tipo de combustível.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos combustíveis avaliados no experimento.	30
Tabela 2. Média seguido pelo desvio padrão da densidade dos combustíveis testados.....	41
Tabela 3 Média seguido pelo desvio padrão da viscosidade dos combustíveis testados.....	43
Tabela 4. Média seguido pelo desvio padrão do poder calorífico dos combustíveis testados.....	44

GERALDO JUNIOR, Edvaldo. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, agosto de 2025. **Emissões de um motor gerador abastecido com biodiesel de óleo residual de salmão**. Orientador: Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti.

RESUMO

A Lei n. 11.097/2005 foi um marco no Brasil, estabelecendo a adição de biodiesel ao diesel, com projeção de 15% até 2026. A utilização do óleo residual de salmão como fonte para biodiesel destaca-se como uma alternativa promissora, aproveitando resíduos agroindustriais e contribuindo com a busca de fontes de energia renovável, alinhando-se com as metas estabelecidas pela legislação brasileira. Este estudo teve como objetivo principal avaliar as emissões de um motor gerador de 5 HP usando diesel S10 e diferentes blendas de biodiesel de salmão. A metodologia envolveu a produção de biodiesel via transesterificação metílica com óleo de salmão, metanol e hidróxido de sódio. Foram preparadas blendas de combustível: BP0 (100% diesel S10), BP14 (14% biodiesel), BP30 (30% biodiesel) e BP100 (100% biodiesel). As análises físico-químicas incluíram densidade, viscosidade cinemática e poder calorífico superior. Testes em bancada didática avaliaram o consumo de combustível e as emissões de gases (CO, CO₂, NOx, HC) em diferentes torques. Os resultados mostraram que o BP100 teve maior densidade (0,882 g/cm³) e viscosidade (3,01 mm²/s) que o BP0 (0,832 g/cm³ e 1,96 mm²/s), enquanto seu poder calorífico foi menor (39,23 MJ/kg contra 45,03 MJ/kg do BP0). Em relação às emissões, em torques baixos, o BP0 apresentou menor CO, mas em torques mais elevados as misturas com biodiesel demonstraram menor emissão. CO₂ aumentou com o torque para todos os combustíveis, sendo ligeiramente superior nas misturas com biodiesel em torques elevados. As emissões de NOx cresceram com o torque, mas o BP100 registrou as menores emissões. Hidrocarbonetos (HC) foram maiores com biodiesel em torques baixos. O estudo demonstrou que o biodiesel de óleo residual de salmão é uma alternativa energética, com destaque para a blenda BP30.

PALAVRAS-CHAVE: Biocombustível; Resíduos piscícolas; Sustentabilidade.

GERALDO JUNIOR, Edvaldo. State University of Western Paraná, august, 2025.
Emissions from an engine generator fueled with biodiesel from salmon waste oil. Advisor. Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti.

ABSTRACT

Law nº. 11,097/2005 was a milestone in Brazil, establishing the addition of biodiesel to diesel, with a projection of 15% by 2026. The use of salmon waste oil as a source for biodiesel stands out as a promising alternative, taking advantage of agro-industrial waste and contributing to the search for renewable energy sources, in line with the goals established by Brazilian legislation. The main objective of this study was to evaluate the emissions of a 5 HP generator engine using S10 diesel and different blends of salmon biodiesel. The methodology involved the production of biodiesel via methyl transesterification with salmon oil, methanol, and sodium hydroxide. The following fuel blends were prepared: BP0 (100% S10 diesel), BP14 (14% biodiesel), BP30 (30% biodiesel), and BP100 (100% biodiesel). Physical-chemical analyses included density, kinematic viscosity, and higher heating value. Bench tests evaluated fuel consumption and gas emissions (CO, CO₂, NO_x, HC) at different torques. The results showed that BP100 had higher density (0.882 g/cm³) and viscosity (3.01 mm²/s) than BP0 (0.832 g/cm³ and 1.96 mm²/s), while its calorific value was lower (39.23 MJ/kg versus 45.03 MJ/kg for BP0). Regarding emissions, at low torques, BP0 presented lower CO, but at higher torques, the biodiesel blends demonstrated lower emissions. CO₂ increased with torque for all fuels, being slightly higher in biodiesel blends at high torques. No_x emissions increased with torque, but BP100 recorded the lowest emissions. Hydrocarbons (HC) were higher with biodiesel at low torques. The study demonstrated that biodiesel from salmon waste oil is an energy alternative, with emphasis on the BP30 blend.

KEYWORDS: Biofuel; Fish farming waste; Sustainability.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo Geral	18
1.2. Objetivos Específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Energia	19
2.2. Biodiesel.....	20
2.3. Óleo de peixe	24
2.4. Emissões gasosas	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1. LOCAL DO EXPERIMENTO	27
3.2. MATERIAIS	27
3.2.1. Óleo Diesel Mineral Tipo A (S10).....	27
3.2.2. Óleo de Peixe.....	27
3.3. Produção do Biodiesel.....	28
3.4. Blendas de Combustíveis.....	29
3.5. Descrição geral dos ensaios	30
3.5.1. Caracterização Físico-Química dos Combustíveis.....	30
3.6. Ensaio experimental do motor e análise de desempenho e emissões	33
Consumo de combustível no motor.....	35
Cálculo do Fluxo de Energia	36
Análise de Emissões Gasosas	37
Procedimento operacional dos testes no motor	38
3.7. Análise estatística	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1. Análise físico-química dos combustíveis.....	41
Densidade	41
Viscosidade cinemática ($\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$)	42
Poder calorífico Superior (MJ.kg^{-1}).....	44
Consumo horário de combustível (g.h^{-1})	45
Análises termogravimétricas (TGA) e (DTG).....	47
Análise por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	50

4.2. Emissões gasosas	51
Emissões de monóxido de carbono (ppm)	51
Emissões de dióxido de carbono (%)	54
Emissões de óxidos de nitrogênio (ppm)	56
Emissões de hidrocarbonetos (ppm)	59
5. CONCLUSÕES	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO

A energia é um elemento essencial para a humanidade, sustentando processos fundamentais para a manutenção da vida na sociedade contemporânea, especialmente no que diz respeito à eficiência energética e ao desenvolvimento econômico (IEA, 2024).

Globalmente, a matriz energética mais utilizada evidencia as fontes de origem fósseis, sendo caracterizadas como recursos finitos, a exemplo do carvão, do gás natural e do petróleo (Raza et al., 2025). O uso deste tipo de recurso não renovável garantiu a evolução da humanidade ao longo da história, mas também causou consequências que ameaçam nosso planeta na atualidade (Hosseini, 2022).

A busca por fontes sustentáveis de energia tornou-se uma prioridade mundial em razão de questões ambientais, econômicas e sociais, impulsionando pesquisas para substituir gradualmente os combustíveis fósseis. Nesse contexto, a transição para um futuro mais limpo tem fomentado o desenvolvimento de alternativas sustentáveis, como a transformação da biomassa em biocombustíveis, que se destacam pela abundância, neutralidade de carbono e acessibilidade econômica (Oliveira et al., 2018).

O incentivo ao uso de biocombustíveis, amplamente adotado em políticas públicas visando à promoção da sustentabilidade e à mitigação dos impactos ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis, reflete um compromisso internacional com a preservação ambiental e o desenvolvimento socioeconômico sustentável (Lasemi et al., 2022).

Biodiesel é um termo utilizado para definir combustíveis derivados de fontes renováveis, podendo ser produzido principalmente por meio da reação química de transesterificação, utilizando como matéria-prima óleos vegetais, gorduras animais e resíduos agroindustriais, apresentando vantagens ambientais como baixa toxicidade, biodegradabilidade e redução significativa das emissões de gases de efeito estufa (Asfraw; Gari; Jayakumar; 2025).

A Lei n. 11.097/2005 representou um marco significativo para a matriz energética brasileira, ao estabelecer a obrigatoriedade da adição de biodiesel ao diesel comercializado no país (Brasil, 2005). Essa legislação incorporou o

biodiesel à matriz energética nacional e estabeleceu diretrizes para o aumento gradual na mistura do biodiesel ao diesel, sendo projetado a proporção obrigatória de 15% até o ano de 2026 (Brasil, 2020).

Nos últimos anos, os óleos vegetais vêm se apresentando como a principal fonte de matéria-prima para a produção de biodiesel (Gongora et al., 2022). Entretanto, fatores como a competição por áreas para produção de alimentos, custos de cultivo e impactos ambientais associados as culturas têm impulsionado pesquisas em fontes alternativas mais sustentáveis (Silva et al., 2023).

Estudos revelam que o aproveitamento de resíduos provenientes da indústria pesqueira podem representar uma alternativa viável e ambientalmente sustentável para a produção de biodiesel (Karkal; Kudre, 2020). Nesse contexto, o óleo residual de salmão tem se destacado como uma matéria-prima promissora para a produção de biodiesel devido à sua alta concentração de ácidos graxos saturados e insaturados, o que o torna ideal para a transesterificação. Como subproduto da indústria pesqueira, especialmente na produção de filés e outros produtos de salmão, esse óleo é frequentemente descartado, representando uma oportunidade para reduzir resíduos e, ao mesmo tempo, gerar uma fonte de energia renovável (Chiou et al., 2008; Tayib et al., 2024).

Pesquisas realizadas demonstram que o biodiesel derivado do óleo de peixe apresenta propriedades físico-químicas compatíveis com os padrões internacionais para combustíveis renováveis, destacando sua abundante disponibilidade, elevado potencial energético e minimizando os impactos ambientais associados ao processo produtivo (Martins et al., 2015). Apesar dos avanços no desenvolvimento e na utilização de biocombustíveis, seu impacto no desempenho dos motores e nas emissões de poluentes ainda necessita de investigações mais detalhadas (Lisboa et al., 2024).

Com base nessa crescente busca por alternativas energéticas sustentáveis, o estudo desenvolvido propôs investigar as emissões de um motor gerador abastecido com diferentes blends de biodiesel de óleo residual de salmão. A hipótese nula (H_0) deste trabalho sugere que não existe diferença significativa nas emissões de CO, CO₂, NO_x e HC entre o óleo diesel S10 e as

diferentes blendas de biodiesel de óleo de salmão (BP14, BP30 e BP100), independentemente do torque aplicado no motor. Já a hipótese alternativa (H_1) afirma que existe uma diferença significativa nas emissões de CO, CO₂, NOx e HC entre o óleo diesel S10 e as diferentes blendas de biodiesel, variando conforme o torque aplicado no motor gerador.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar a potência e as emissões de um conjunto motor gerador de 5 HP operando com diesel puro S10 e diferentes blendas de biodiesel de salmão.

1.2. Objetivos Específicos

- Investigar o poder calorífico, a densidade e a viscosidade do biodiesel de salmão;
- Mensurar o consumo dos diferentes combustíveis testados;
- Analisar as emissões de CO, CO₂, HC e NOx do motor abastecido com misturas de biodiesel e diesel nas proporções de 14% e 30%, além do uso de biodiesel puro e diesel S10 puro;
- Comparar o desempenho e os índices de emissão entre os três tipos de biodiesel e o diesel S10 puro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia

A energia é um dos conceitos essenciais que moldam e mantêm o funcionamento do universo. Está presente em todas as interações e processos naturais, sendo uma das principais leis do universo, visto que ela não pode ser criada nem destruída, mas apenas transformada (Zou et al., 2022).

Desde os primórdios da humanidade até a complexidade da vida contemporânea, a energia sempre esteve presente no desenvolvimento humano, moldando principalmente o cenário ambiental, econômico e social (Xu; Zhao, 2023).

Em geral, a energia pode ser classificada de duas formas: renovável e não renovável. O crescimento da demanda global por energia é crescente, pressionando a exploração e o uso intensivo das tradicionais fontes de energia, a exemplo do petróleo, gás natural e carvão. O uso dessas fontes energéticas garante o funcionamento, principalmente da matriz industrial e logística, promovendo o crescimento econômico e a contínua qualidade de vida em todo planeta (Wang; Azam, 2024).

O petróleo configura como o recurso energético de maior relevância no contexto das fontes não renováveis, em virtude de sua elevada densidade energética e de sua ampla aplicabilidade em diversos setores produtivos. Além de sustentar a mobilidade urbana e o transporte de cargas, ele é indispensável à indústria petroquímica, responsável pela fabricação de insumos essenciais à sociedade contemporânea. Entretanto, ao mesmo tempo em que promove a expansão econômica e tecnológica, sua cadeia de exploração, refino e consumo intensifica pressões ambientais e sociais, exigindo uma reflexão sobre modelos de desenvolvimento e alternativas sustentáveis a curto e médio prazo (Bathrinath et al., 2021).

Entre os diversos combustíveis derivados do petróleo, o diesel é o principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono (CO_2), que contribui diretamente com o aquecimento global (Yang, 2025). As emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP) estão diretamente relacionadas ao aumento de problemas de

saúde pública, especialmente doenças respiratórias que impactam negativamente a qualidade de vida de milhões de pessoas (Jiang et al., 2025).

O uso contínuo dessas fontes de matéria-prima apresenta inúmeros desafios, entre elas podemos destacar as mudanças climáticas (Zhang, 2024). Ademais, a dependência do petróleo vem causando instabilidade e conflitos geopolíticos em várias regiões do mundo com diversos interesses estratégicos (Mignon; Saadaoui, 2024).

Pesquisas por fontes de energia mais sustentáveis se intensificaram nos últimos anos, uma vez que a transição energética é um caminho sem volta. Essa mudança é necessária para substituir as fontes finitas de energia e, assim, favorecer um futuro mais sustentável. A diversidade energética promove a economia circular aproveitando diversos resíduos da agroindústria (Del Duca et al., 2024; Zhu et al., 2025).

2.2. Biodiesel

As crescentes preocupações com as mudanças climáticas, aliadas à busca por combustíveis alternativos ao petróleo, têm impulsionado a pesquisa por alternativas energéticas mais limpas e sustentáveis. Uma dessas alternativas é o uso total ou parcial de combustíveis de origem renovável, reduzindo ou compensando as emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, os biocombustíveis surgem como uma solução promissora, pois podem ser obtidos a partir de recursos vegetais e animais e têm o potencial de substituir total ou parcialmente os combustíveis fósseis tradicionais (Mansoori et al., 2021).

Dentre os biocombustíveis atualmente existentes, o biodiesel se destaca pela sua viabilidade técnica, potenciais usos e vantagens ambientais. É obtido por meio da reação química de transesterificação de fontes lipídicas, como óleos vegetais, gorduras animais e resíduos agroindustriais (Geraldo Junior et al., 2025). Pode ser utilizado puro ou em misturas com outros biodieseis e diesel puro em motores a diesel convencionais, sem necessidade de modificações no motor (Pydimalla et al., 2023). Outrossim, o biodiesel

apresenta baixa toxicidade, é biodegradável e contribui com a compensação das emissões dos gases que provocam efeito estufa (ANP, 2014).

O grupo dos biocombustíveis derivados do biodiesel não se restringe a uma única rota de obtenção, tendo passado por diferentes transformações ao longo do tempo. Sua evolução tecnológica possibilita classificá-lo em três grandes categorias, de acordo com a natureza das matérias-primas empregadas no processo de produção, sejam elas de origem vegetal, animal ou residual. A primeira parte usou óleos comestíveis de plantas, como soja, milho e cana-de-açúcar. Mesmo com o seu uso em grande escala, essa primeira parte de biodiesel tem sido criticada pelo fato de competir com a produção de alimento e pelo uso intensivo das terras agrícolas. Em resposta a essas limitações, o biodiesel de segunda geração foi desenvolvido com base em matérias-primas não alimentares, como resíduos agrícolas e lignocelulósicos, para promover a sustentabilidade. O biodiesel de terceira geração, mais recente, destaca-se pelo uso de matérias-primas alternativas, como gorduras animais, resíduos de pesca e microalgas, e por sua ênfase na recuperação de resíduos e no fortalecimento da economia circular (Andreo-Martínez et al., 2022; Singh et al., 2024).

As fontes lipídicas mais utilizadas na produção de biodiesel incluem óleos vegetais, como óleo de soja, óleo de algodão, óleo de palma e óleo de cártamo (Oliveira et al., 2018; Gongora et al., 2022). As principais fontes de gordura animal incluem sebo, banha e óleo de peixe (Andreo-Martínez et al., 2022). Essas fontes são amplamente utilizadas devido à sua compatibilidade com o diesel fóssil devido às suas propriedades físico-químicas (por exemplo, viscosidade, ponto de fulgor e índice de cetano), podendo, portanto, ser utilizadas diretamente ou em misturas em motores de ignição por compressão sem grandes modificações tecnológicas (Yahya; Aghel, 2021).

O processo de síntese de biodiesel baseia-se principalmente na transesterificação, na qual triglicerídeos reagem com álcoois na presença de um catalisador para produzir ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos e glicerol como subproduto (Yusuf et al., 2024). Outras vias podem ser utilizadas, como a esterificação (recomendada para matérias-primas com alto teor de ácidos graxos livres) e o craqueamento térmico (também conhecido como

pirólise), que envolve a decomposição térmica de compostos orgânicos em condições anaeróbicas (Encinar et al., 2021; Faisal et al., 2023).

A Figura 1 mostra uma reação de transesterificação catalisada por hidróxido de sódio.

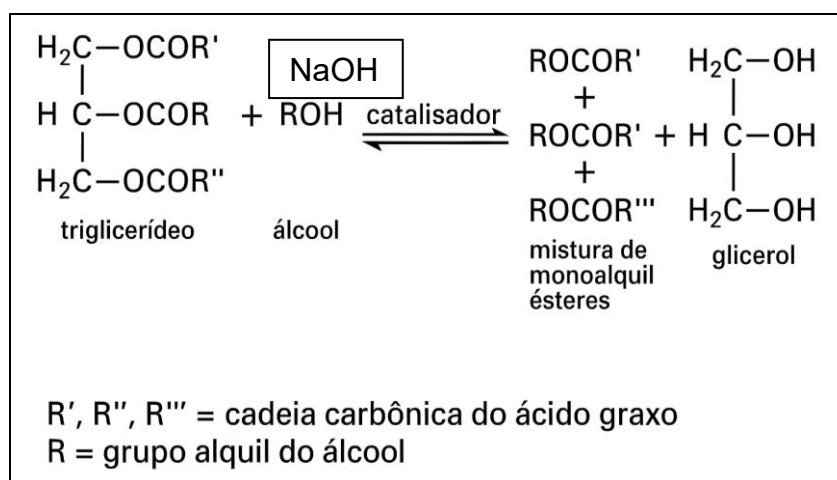


Figura 1. Reação de Transesterificação catalisada por hidróxido de sódio.

Fonte: Adaptado de Racaczski et al., 2006.

A produção de biodiesel a partir de resíduos oferece uma série de vantagens combinadas. Além de mitigar o impacto ambiental do descarte inadequado de óleo e gordura, essa prática reduz a dependência de combustíveis fósseis, fortalece as cadeias produtivas regionais e promove os princípios da economia circular. A valorização de subprodutos como o glicerol também é de grande importância e pode ser utilizada nas indústrias farmacêutica, cosmética e química (Malik et al., 2024).

O desempenho do biodiesel como combustível está diretamente relacionado às propriedades físico-químicas do óleo utilizado como matéria-prima. Parâmetros como viscosidade, índice de cetano, ponto de fulgor, teor de ácidos graxos livres e estabilidade à oxidação são cruciais para a eficiência da reação de produção e a qualidade do combustível final (Umeh; Okonkwo, 2025).

Estudos demonstraram que misturas contendo 30% de biodiesel, como as produzidas a partir do óleo de semente de cânhamo, podem reduzir significativamente as emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e

material particulado, com desempenho semelhante ao do diesel convencional (Stanescu; Soica; Leahu, 2025). No entanto, o aumento das emissões de NO_x é comum e requer estratégias de controle adequadas. Aditivos como nanopartículas de hidroxitolueno butilado demonstraram efeito positivo na redução das emissões de NO_x. A mistura com biodiesel derivado de resíduos agroindustriais reduz as emissões e melhora as propriedades de ignição (Jayabal; Rajkumar, 2025).

A regulamentação do uso do biodiesel no Brasil teve início com a Lei 11.097, de 13 de janeiro de 2005, que estabeleceu a adição gradual obrigatória de biodiesel ao diesel fóssil (Brasil, 2005). Desde então, a parcela obrigatória de biodiesel vem aumentando ano a ano por meio de resoluções e decretos do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e do Ministério de Minas e Energia (MME), conforme apresentado na Figura 2.

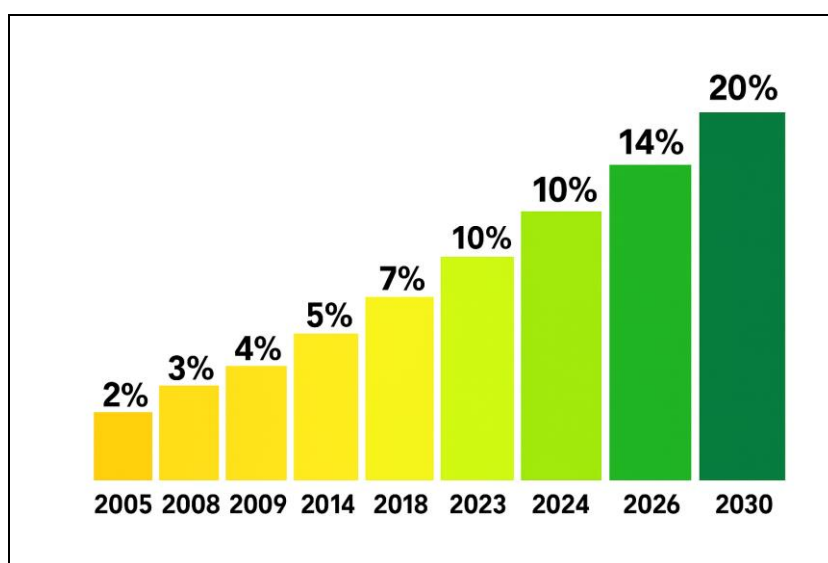


Figura 2. Evolução da adição de biodiesel ao diesel mineral no Brasil ao longo do tempo.

Fonte: Programa Nacional de Produção e uso de Biodiesel (2025).

Dessa forma, o biodiesel torna-se não apenas uma alternativa energética renovável, mas também um facilitador do desenvolvimento sustentável, conciliando aspectos ambientais, sociais e econômicos por meio da valorização de resíduos e da diversificação da matriz energética (Suhara et al., 2024).

2.3. Óleo de peixe

A produção global de pescados, em 2022, atingiu 223,2 milhões de toneladas, dos quais 130,9 milhões de toneladas vieram de cultivos em cativeiro, respondendo cerca de 59% deste total. A piscicultura é hoje a atividade de produção animal com maior taxa de crescimento global, sendo responsável por grande parte do fornecimento mundial de proteína animal (FAO, 2024). Estima-se que o consumo mundial *per capita* de peixe supere os 20 kg/habitante/ano tornando esta a proteína animal mais consumida no mundo (Cai; Leung, 2022).

Durante o beneficiamento industrial, sobretudo na filetagem, estima-se que 30 a 70% da biomassa total do peixe torne-se resíduo sólido, incluindo vísceras, cabeças, peles e espinhas, todos ricos em lipídios e proteínas (Saravanan et al., 2023; Zhang; Akyol; Meers, 2023). De acordo com o estudo de Liu, Ramakrishnan, Dave (2020), esses subprodutos contêm quantidades significativas de lipídios, que podem ser extraídos por métodos como prensagem ou extração com solventes.

Nos últimos anos, óleo residual de peixe vem sendo valorizado como uma alternativa viável à produção de biodiesel, sobretudo por sua abundância, custo reduzido e composição rica em ácidos graxos insaturados (Karkal; Kudre, 2020). A conversão por transesterificação tem se mostrado eficiente, produzindo ésteres metílicos ou etílicos com propriedades físico-químicas compatíveis com os padrões internacionais de combustíveis renováveis (Jaiswal et al., 2024; Tayib et al., 2024).

Pesquisas nacionais, como a de Martins et al. (2015), evidenciam que o biodiesel derivado de óleo de peixe apresenta propriedades dentro das especificações normativas, com potencial técnico-energético expressivo no contexto brasileiro. Em um estudo recente, Bousbaa e colaboradores (2024) demonstraram que o óleo obtido a partir dos resíduos de atum foi convertido em biodiesel com rendimento de 26,56%, demonstrando boa viscosidade, número de cetano adequado e desempenho satisfatório em motores diesel.

Dentro desse cenário, o óleo de salmão é uma fração específica do óleo de peixe disponível, sendo obtida a partir dos resíduos gerados durante o

processamento industrial do *Salmo salar*, uma das espécies mais cultivadas mundialmente. Noruega e Chile são responsáveis por mais de 75% da produção global da espécie (Anglade; Krogli; Reitan, 2024). O aumento da demanda por salmão, devido ao seu valor nutricional e alta concentração de ácidos graxos ômega-3, também ampliou o volume de subprodutos gerados (Haq et al., 2025).

Rico em EPA e DHA, o óleo de salmão é particularmente atrativo para a produção de biodiesel devido à sua elevada insaturação, que favorece a combustão limpa e propriedades lubrificantes superiores. El-Mashad e demais (2008) chegaram à conclusão de que o biodiesel de óleo de salmão apresenta propriedades similares ao diesel fóssil, com menor emissão de poluentes e alta biodegradabilidade. Contudo, sua estabilidade oxidativa requer atenção, sendo comum a adição de antioxidantes para prolongar sua vida útil.

A indústria de processamento de pescado gera grandes volumes de resíduos orgânicos, resultantes principalmente de cabeças, vísceras, peles e espinhas, que representam mais da metade da biomassa capturada. Esses subprodutos têm elevado teor de lipídios, configurando-se como uma importante matéria-prima para a obtenção de óleos residuais de pescado, cuja aplicação se estende desde a produção de insumos para rações e fertilizantes até o desenvolvimento de biocombustíveis. No entanto, estudos realizados no Brasil evidenciam que, embora apenas cerca de 44% do pescado processado seja destinado ao consumo humano, aproximadamente 59,2% dos resíduos ainda têm como principal destino o descarte em aterros sanitários, o que revela um aproveitamento incipiente desse recurso e expõe desafios ambientais, tecnológicos e de gestão da cadeia produtiva (Martins et al., 2017).

2.4. Emissões gasosas

Os motores a diesel desempenham papel essencial na humanidade, atuando no transporte de cargas e passageiros, na agricultura e na geração de energia, sendo reconhecidos por sua eficiência térmica e robustez mecânica. Em contrapartida, sua operação está intimamente associada à emissão de poluentes atmosféricos que impactam negativamente tanto o meio ambiente

quanto a saúde pública. Esses poluentes são resultantes da combustão incompleta e das altas pressões e temperaturas típicas dos motores diesel (Ansari; Memon; Selim, 2024).

As emissões de motores a diesel são compostas, principalmente, por material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e dióxido de carbono (CO₂). O aumento da concentração desses gases na atmosfera, devido ao uso do diesel na diversas atividades humanas, intensifica o efeito estufa e contribui com o aquecimento global e as mudanças climáticas (Fayyazbakhsh et al., 2022; Xu et al., 2023).

Para mitigar esses impactos, agências reguladoras têm estabelecido limites cada vez mais rigorosos. A norma Euro 6 da União Europeia, por exemplo, define os máximos para emissões veiculares com o intuito de reduzir o impacto ambiental da indústria automobilística. No Brasil, o PROCONVE P8 desempenha um papel similar na redução da poluição atmosférica causada por veículos. Em vigor desde 2014 na Europa e implementada no Brasil a partir de 2023, a Euro 6 trouxe mudanças significativas para motores, especialmente os a diesel, focando na diminuição de óxidos de nitrogênio (NOx), material particulado (MP) e outros poluentes.

Na busca por alternativas sustentáveis, o uso de biocombustíveis, como o biodiesel derivado de óleos vegetais ou gorduras animais, tem se mostrado promissor. Misturas como B10 e B20 reduzem substancialmente MP, hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO), embora possam elevar ligeiramente o NOx devido ao teor de oxigênio no combustível. Estudos indicam que estratégias avançadas de temporização de injeção e pós-tratamento permitem compensar esse aumento, mantendo a eficiência energética adequada.

A redução das emissões gasosas provenientes de motores a diesel requer uma abordagem multidisciplinar, combinando políticas públicas, inovação tecnológica e uma transição gradual para fontes energéticas mais limpas. O uso de filtros catalisadores e, principalmente, a adição parcial ou total de biodiesel, fomenta um caminho viável para mitigar os impactos ambientais e de saúde pública associados ao uso do diesel.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCAL DO EXPERIMENTO

Este estudo foi realizado em dois laboratórios vinculados a Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste):

- Laboratório Multiusuário de Microscopia e de Técnicas Espectroscópicas e Eletroquímicas, *Campus Toledo*;
- Laboratório de Gaseificação de Biomassa e Microgeração de Eletricidade, *Campus Cascavel*.

3.2. MATERIAL

3.2.1. Óleo Diesel Mineral Tipo A (S10)

O óleo diesel mineral tipo A (S10) utilizado durante os experimentos foi fornecido por uma empresa comercial localizada no município de Cascavel-PR, devidamente registrada junto a Agência Nacional do Petróleo. O combustível A-S10 segue a norma da Agência Nacional do Petróleo – ANP, conforme a Resolução ANP n° 50 de 2013 que, em seu Art. 3°, estabelece o teor máximo de enxofre de 10 mg/kg para essa nomenclatura.

3.2.2. Óleo de Peixe

O óleo residual de salmão utilizado durante os experimentos foi adquirido de uma empresa comercial localizada no município de São Paulo-SP. Tal como disponível no site da empresa, o óleo é obtido a partir dos resíduos orgânicos gerados após o processamento industrial do salmão.

3.3. Produção do Biodiesel

Para a síntese de biodiesel, empregou-se a transesterificação via metílica, utilizando metanol (CH_3OH) como reagente e hidróxido de sódio (NaOH) como catalisador alcalino.

Para a produção de biodiesel, utilizou-se 650 mL de óleo de salmão como matéria-prima (Figura 3), 350 mL de metanol (CH_3OH) como agente alquilante e três gramas de hidróxido de sódio (NaOH) como catalisador alcalino. Inicialmente, o NaOH foi dissolvido completamente no metanol sob agitação magnética, formando a solução catalítica.



Figura 3. Frasco do óleo de salmão utilizado na pesquisa.
Fonte: O autor.

Em seguida, essa solução foi adicionada ao óleo de salmão em um frasco reagente de vidro, sendo a mistura submetida à agitação constante e aquecimento controlado até atingir a temperatura de 65 °C (Figura 4). A reação de transesterificação foi conduzida sob essas condições durante 24 horas.

Após a conclusão da reação, a mistura reacional foi transferida para um funil de separação, permanecendo em repouso por 12 horas para permitir a separação gravimétrica das fases. A fase inferior, mais densa, correspondia à glicerina, enquanto a fase superior correspondia ao biodiesel bruto. O biodiesel

foi, então, submetido a um processo de purificação por meio de lavagens sucessivas com água destilada, na proporção volumétrica de 1:1 (biodiesel:água). Cada lavagem envolveu agitação mecânica por 10 minutos e posterior repouso de 1 hora para separação das fases, sendo esse procedimento repetido três vezes.

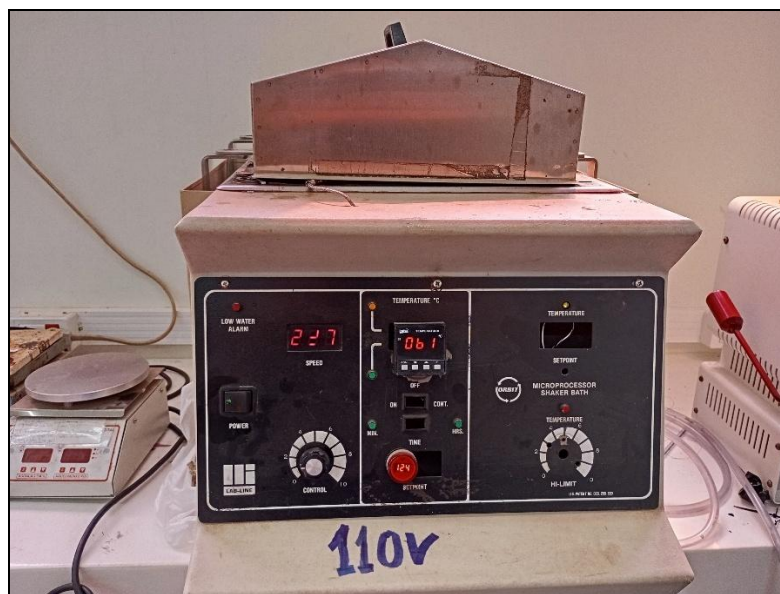


Figura 4. Microprocessor Shaker Bath utilizado para agitação e aquecimento em uma das fases de síntese do biodiesel.
Fonte: O autor.

Por fim, o biodiesel purificado foi submetido à secagem em estufa a 105 °C por um período de 24 horas, a fim de eliminar completamente os resíduos de água e metanol. O biodiesel obtido foi acondicionado em frasco reagente de vidro e armazenado sob refrigeração, à temperatura média de 4 °C, buscando preservar suas características físico-químicas até a realização das análises laboratoriais subsequentes.

3.4. Blendas de Combustíveis

Após a síntese do biodiesel de óleo de salmão, foram preparadas as seguintes blendas de combustível líquido, utilizando óleo diesel mineral tipo A (S10) como diluente: BP14 (14% biodiesel de salmão), BP30 (30% biodiesel de

salmão) e BP100 (100% biodiesel de salmão) e BP0 (100% óleo diesel comum puro) como controle, tal como descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos combustíveis avaliados no experimento.

Nomenclatura	Composição
B0	100% óleo diesel comum S10
BP14	14% biodiesel de óleo de salmão e 86% diesel puro
BP30	30% biodiesel de óleo de salmão e 70% diesel puro
BP100	100% biodiesel de óleo de salmão

3.5. Descrição geral dos ensaios

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram levantados dados experimentais das propriedades físico-químicas, do consumo horário dos combustíveis, do fluxo de energia e das medições dos gases de exaustão.

3.5.1. Caracterização Físico-Química dos Combustíveis

Massa específica a 20 °C (g.cm⁻³)

A massa específica das amostras de biocombustíveis foi determinada a 20 °C pelo método do picnômetro manual, segundo a norma ASTM D1217 (ASTM D1217, 2020). Este medidor volumétrico, ideal para a determinação da densidade de substâncias líquidas, possui capacidade nominal de 10,0 ml e tolerância de $\pm 0,02$ ml a 20 °C.

O procedimento iniciou com a pesagem do picnômetro vazio e limpo. Para todas as medições de massa, utilizou-se uma balança de precisão da marca Sartorius, modelo BP221, com resolução de 0,0001 g. Em seguida, o picnômetro foi preenchido com as amostras dos combustíveis e pesado novamente para obter a massa da amostra. Este ensaio foi realizado em triplicata para cada amostra.

A massa específica (ρ) das amostras a 20 °C foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$\rho_{\text{amostra}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{V_{\text{picnômetro}}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

- ρ_{amostra} = massa específica da amostra (g.cm^{-3}).
- m_{amostra} = massa da amostra (g), obtida pela diferença entre a massa do picnômetro cheio com a amostra e a massa do picnômetro vazio.
- $V_{\text{picnômetro}}$ = volume do picnômetro (cm^3 ou mL), determinado previamente com água pura a 20 °C.

O volume do picnômetro ($V_{\text{picnômetro}}$) foi estabelecido pela massa de água pura que o picnômetro contém a 20 °C e a densidade conhecida da água a essa temperatura ($0,99823 \text{ g.cm}^{-3}$ a 20 °C).

Viscosidade cinemática a 40 °C ($\text{mm}^2 \text{ s}^{-1}$)

A viscosidade cinemática das amostras de combustíveis foi determinada a 40 °C, seguindo a norma ASTM D445 (ASTM D445, 2021). Para a realização do ensaio, utilizou-se um viscosímetro capilar Cannon-Fenske n° 150. O viscosímetro foi mantido imerso em um banho termostático de acrílico preenchido com água, garantindo temperatura controlada e constante de 40 °C durante toda a medição. O procedimento consistiu em cronometrar o tempo de escoamento do combustível do menisco superior ao menisco inferior dentro do capilar do viscosímetro. Para assegurar a precisão e a confiabilidade dos resultados, cada amostra de biocombustível teve seu ensaio realizado em triplicata.

A viscosidade cinemática (ν) de cada amostra foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$\nu = C.t \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

- ν = viscosidade cinemática em $\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$ ou cSt.
- C = Constante de calibração do viscosímetro ($\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$).
- t = Tempo de escoamento do combustível (s).

Poder calorífico dos combustíveis (MJ kg^{-1})

O poder calorífico superior (PCS) das amostras de combustíveis foi determinado em um calorímetro isotérmico, modelo e2k, de acordo com a norma ASTM D240 (ASTM D240, 2021). Para cada ensaio, uma massa de amostra entre 0,300 g e 0,500 g foi pesada e inserida no interior do vaso com oxigênio a alta pressão e levadas para a bomba calorimétrica. A combustão das amostras foi iniciada eletricamente e o calor liberado foi quantificado pelo calorímetro, registrando a elevação de temperatura do sistema. O PCS de cada amostra foi calculado automaticamente pelo software do equipamento e expresso em MJ.kg^{-1} . Este ensaio foi realizado em triplicata para cada amostra.



Figura 5. Bomba calorimétrica utilizada.
Fonte: O autor.

Análises termogravimétricas (TGA)

As análises de Termogravimetria (TGA) foram conduzidas em Analisador Térmico Simultâneo - STA 6000, PerkinElmer, para o óleo de salmão e para o

biodiesel de óleo de salmão. A amostra (aproximadamente 8 mg) foi acondicionada em um cadinho de platina aquecida até 600 °C com uma taxa de aquecimento de 20 °C min⁻¹ e um fluxo de Nitrogênio (N₂) de 20 mL min⁻¹, sendo a temperatura inicial da análise de 50 °C.

Espectroscopia de Infravermelho

Os espectros de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foram adquiridos para identificar as vibrações moleculares e os principais grupos funcionais presentes nas amostras de óleo de salmão e para o biodiesel de óleo de salmão. Os espectros foram obtidos utilizando um espectrômetro FTIR PerkinElmer, modelo Frontier, com resolução de 2 cm⁻¹ e 20 varreduras sucessivas, cobrindo a faixa espectral de 4000 a 500 cm⁻¹.

3.6. Ensaios experimentais do motor e análise de desempenho e emissões

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Biomassa e Microgeração da Unioeste, *Campus* Cascavel-PR. As avaliações ocorreram no período matutino, sob condições climáticas de chuva, com temperatura média de 18 °C e umidade relativa do ar em torno de 90%.

Para a compreensão geral da montagem experimental, a Figura 6 apresenta o esquema da bancada de testes utilizada.

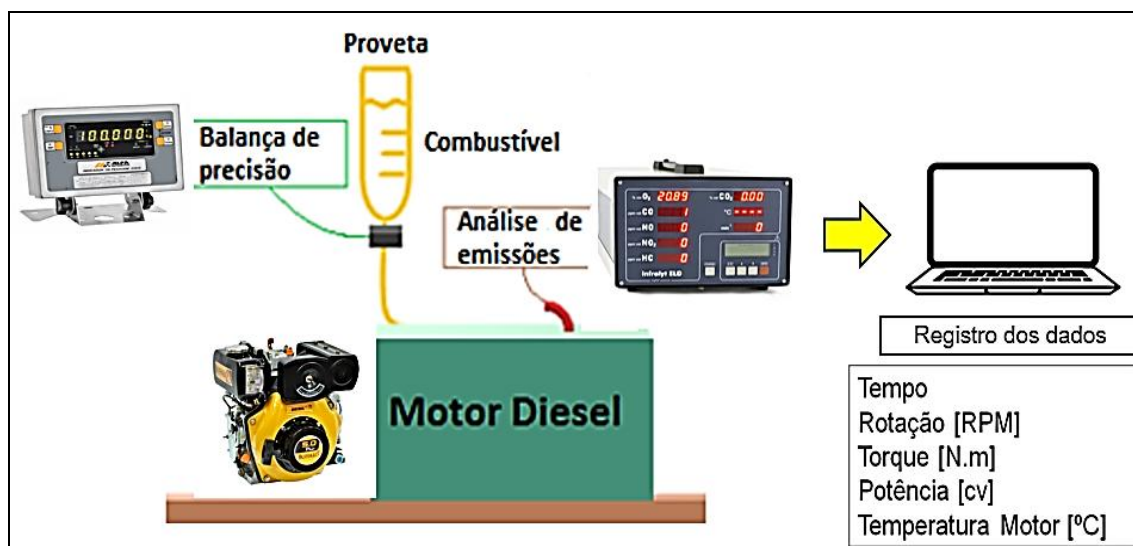


Figura 6. Imagem ilustrativa da bancada experimental utilizada no experimento.
Fonte: O autor.

A bancada didática, modelo Dino–MD–02 (Intechno), foi composta por dinamômetro, motor diesel, sistema de medição de combustível, sonda de amostragem de gases e software de aquisição de dados, responsável pelo registro e monitoramento dos parâmetros operacionais.

O motor utilizado como unidade motriz foi da marca Buffalo, Modelo BFD 5 HP (Figura 7).



Figura 7. Motor Buffalo BFD 5 HP.
Fonte: O autor.

As especificações técnicas do motor utilizado estão representadas na figura abaixo (Figura 8):

Tipo	Monocilíndrico, refrigerado a ar, diesel
Potência máxima	5 Hp, 3600 rpm
Combustível	Diesel
Capacidade do tanque	2,5 litros
Potência Contínua (Cv) (kW/Rpm)	3,8 (2,8/3600)
Potência Máxima (CV)(KW/Rpm)	5,0 (3,7/3600)

Figura 8. Especificações técnicas motor Buffalo, Modelo BFD 5 HP.

Fonte: Manual do produto Buffalo Motores & Acoplados.

Consumo de combustível no motor

Para registrar a massa de combustível consumida durante os testes, utilizou-se um sistema de medição gravimétrica composto por um indicador de pesagem digital (balança) da marca alfa, modelo 3101C (Figura 9) e uma célula de carga da marca Alfa, modelo SV (Figura 10). Este sistema possui capacidade nominal para 50 kg e resolução de 1 g, operando sob forças de tração.



Figura 9. Balança digital com layout de indicador de pesagem.

Fonte: Alfa Instrumentos (2020).



Figura 10. Célula de carga Alfa, modelo SV.
Fonte: Alfa Instrumentos (2020).

O tempo de realização para cada combustível testado foi cronometrado por 120 segundos para cada torque aplicado, sempre de forma crescente. A massa de combustível consumida foi registrada a partir da diferença entre as massas inicial e final, medida pela balança digital.

O consumo de combustível, expresso como fluxo de massa (g.h^{-1}), foi determinado pela relação entre a massa de combustível consumida e o tempo de teste, tal como descrito por Pulkrabek (2004).

$$\text{Consumo}(\text{g/h}) = \frac{\text{Massa consumida (g)}}{\text{tempo (h)}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

- Massa consumida (g): corresponde à quantidade de combustível utilizada durante o experimento, medida com balança de precisão.
- Tempo de operação (h): corresponde ao intervalo total de funcionamento do motor em que houve consumo de combustível.

Cálculo do Fluxo de Energia

O fluxo de energia (FE) das amostras de biocombustíveis foi calculado a partir do poder calorífico superior (PCS) determinado (MJ.kg^{-1}) e do consumo mássico de combustível (g.h^{-1}) observado nas condições do ensaio (Cengel;

Boles, 2019). Este cálculo permite avaliar a taxa de energia fornecida pelo combustível ao sistema por unidade de tempo, sendo expresso em MJ.h⁻¹.

$$FE = PCS \times \text{Consumo mássico} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

- FE = fluxo de energia (MJ.h⁻¹).
- PCS = poder calorífico superior (MJ.kg⁻¹).
- Consumo mássico = consumo mássico de combustível (kg.h⁻¹).

Para fins de cálculo do fluxo de energia, o consumo mássico, inicialmente registrado em gramas por hora (g.h⁻¹), foi convertido para quilogramas por hora (kg.h⁻¹), dividindo-se o valor por 1000.

Análise de Emissões Gasosas

Para o estudo das emissões de gases de exaustão, foi utilizado o analisador de gases da combustão da marca Infracal ELD (Figura 11).



Figura 11. Analisador de gases da combustão Infracal ELD utilizado no experimento.

Fonte: Manual Técnico Infracal ELD.

A sonda de amostragem dos gases de exaustão (Figura 12) foi inserida diretamente na ponteira do escape do motor.



Figura 12. Sonda de amostragem dos gases de exaustão.
Fonte: Benhurt Gongora.

O analisador portátil é equipado com sensores eletroquímicos capazes de medir as concentrações de oxigênio (O_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO_2), e hidrocarbonetos (HC). O aparelho possui um limite tolerante de erro de aproximadamente 5% para a leitura das emissões gasosas e de $\pm 0,5\%$ para a medição de temperatura.

Procedimento operacional dos testes no motor

A mensuração dos gases emitidos foi realizada no Laboratório de Biomassa e Microgeração da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), *Campus* Cascavel-PR. Os ensaios com as amostras e a coleta das emissões gasosas foram conduzidos no período matutino, sob condições climáticas de chuva, com temperatura média de $18^\circ C$ e umidade relativa do ar em torno dos 90%.

O motor utilizado foi um modelo Buffalo BFD 5 HP, movido a diesel, empregado como unidade motriz para os testes.

As avaliações experimentais foram realizadas em bancada didática Dino–MD–02 (Intechno), composta por dinamômetro, motor diesel, balança digital, sonda de amostragem de gases e software de aquisição de dados, responsável pelo registro e monitoramento dos parâmetros operacionais.

Os combustíveis testados incluíram duas blends de biodiesel de óleo de salmão (BP14 e BP30), o biodiesel puro (BP100) e o diesel puro (BP0). As emissões avaliadas foram: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos não queimados (HC). A

coleta dos gases foi realizada por meio de uma sonda inserida diretamente na ponteira do escapamento do motor, acoplada a um analisador portátil de gases de combustão, modelo Infralyt ELD.

Antes de iniciar os testes com cada combustível, o motor foi mantido em funcionamento por dez minutos para garantir a estabilização térmica e operacional. Para a coleta de dados, considerou-se uma unidade experimental composta pelo motor operando em regime constante de 1800 rpm, abastecido por meio de cada um dos quatro tipos de combustíveis.

A variável torque foi aplicada de forma crescente (1, 2, 3, 4 e 5 N.m) para cada tipo de combustível (BP0, BP14, BP30 e BP100). As emissões foram gravadas continuamente por 120 segundos para cada combinação entre tipo de combustível, torque e gás emitido. Os dados registrados pelo analisador foram posteriormente organizados em planilhas do programa Microsoft Excel para análise. Com o objetivo de padronizar e otimizar o processamento dos dados, foram levados em conta os valores registrados a cada 30 segundos, totalizando quatro medições por condição experimental. Dessa forma, cada combinação de combustível, torque e variável de emissão (CO, CO₂, NO_x e HC) foi avaliada em quadruplicata.

Durante esse período, a massa de combustível consumido foi registrada a partir da diferença entre as massas inicial e final, medida por uma balança digital (Alfa – 3101C) e uma célula de carga (Alfa – SV).

3.7. Análise estatística

A análise estatística foi realizada de maneira individual para cada uma das variáveis observadas no estudo proposto.

Para as variáveis de densidade, viscosidade e poder calorífico, os dados foram coletados em triplicata para cada amostra de combustível (B0, BP14, BP30 e BP100), em um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Para realização dos testes estatísticos, primeiro foi utilizada a Anova, com o objetivo de verificar a existência de diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tipos de combustível em relação a cada uma dessas variáveis. Quando detectada a diferença significativa pela Anova, o teste de Tukey, a 5% de significância, foi

utilizado a fim de realizar comparações múltiplas entre os combustíveis, identificando quais tipos apresentaram diferenças estatísticas em seus valores de densidade, viscosidade e poder calorífico.

Em relação às análises estatísticas do fluxo de energia, consumo horário e das emissões gasosas, foram levadas em conta as influências dos fatores, tipo de combustível e torque. A análise estatística foi realizada utilizando Anova ($p < 0,05$), com objetivo de avaliar os efeitos de cada fator quanto o de suas respectivas interações. Quando observada a diferença pela Anova, utilizou-se o teste de Tukey, a 5% de significância, para identificar as condições experimentais que causaram as maiores diferenças entre os combustíveis e os níveis de torque aplicado.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa Sisvar (Ferreira, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise físico-química dos combustíveis

Densidade

Na Tabela 2, são salientados os dados de densidade dos combustíveis testados, os quais revelaram variação significativa. O teste de Tukey evidenciou distinções estatísticas entre todos os grupos avaliados ($p < 0,05$). Esses resultados demonstram que densidade aumentou progressivamente do BP0 para o BP100, sugerindo que a densidade final dos combustíveis é diretamente influenciada pela proporção de biodiesel adicionado. Mesmo que o óleo de salmão seja reconhecido pelo seu perfil rico em ácidos graxos poli-insaturados (EPA e DHA), o biodiesel puro (BP100), derivado deste óleo, apresentou uma densidade superior ao do diesel convencional.

Tabela 2. Valores médios e desvio padrão da densidade dos combustíveis com diferentes concentrações de biodiesel.

Amostra	Densidade (g.cm^{-3})
BP0	$0,832 \pm 0,001^a$
BP14	$0,837 \pm 0,001^b$
BP30	$0,846 \pm 0,001^c$
BP100	$0,882 \pm 0,001^d$

*Valores seguidos de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A densidade do biodiesel é uma propriedade fundamental, pois afeta diretamente o tempo de injeção e a qualidade da pulverização do combustível na câmara de combustão. Combustíveis com alta densidade, como o BP100, podem aumentar a quantidade de combustível que entra na câmara de combustão, desequilibrando a relação oxigênio-combustível, o que pode levar a uma combustão incompleta e subsequente aumento na emissão de hidrocarbonetos não queimados (Tarangan et al., 2023).

A densidade da amostra BP100 obtida neste estudo ($0,882 \text{ g/cm}^3$) encontra-se em conformidade com os limites estabelecidos pela resolução ANP nº 45/2014, que especifica um intervalo de $0,850$ a $0,900 \text{ g/cm}^3$ para o biodiesel B100 a 20°C . Este valor é próximo ao reportado por El-Mashad et al. (2008), quando citaram que densidade do biodiesel de salmão encontrada foi de $0,880 \text{ g/cm}^3$.

Martins et al. (2015) produziram biodiesel a partir do óleo de tilápia e revelou que a densidade encontrada foi de $0,877 \text{ g/cm}^3$ a 20°C . Mesmo apresentando valores distintos, o biodiesel de tilápia e o biodiesel de salmão estão em conformidade com as normativas da ANP, reforçando a possibilidade em usar óleos provenientes do processamento de pescados como matéria-prima para produção de biodiesel.

Para Knothe e Steidley (2005), a densidade dos ésteres de ácidos graxos, principais componentes do biodiesel, é influenciada diretamente pela estrutura da cadeia carbônica presente no óleo utilizado como matéria-prima, visto que o comprimento da cadeia carbônica e o maior grau de insaturação tendem a aumentar a densidade do biodiesel. Assim, a menor densidade do biodiesel de tilápia sugere que o óleo de tilápia pode possuir um perfil de ácidos graxos com um grau de insaturação menor ou cadeias carbônicas ligeiramente menores, em comparação com o óleo de salmão. Essa proximidade de valores entre os biodieseis de salmão e tilápia, apesar das pequenas variações, reforça a influência da composição lipídica do óleo de origem sobre a densidade do biodiesel.

Viscosidade cinemática ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

A análise da viscosidade cinemática dos combustíveis usados neste estudo revelou um aumento progressivo e estatisticamente significativo ($p < 0,05$). Como mostrado na Tabela 3, o biodiesel (BP100) revelou o maior valor de viscosidade ($3,01 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$), enquanto o diesel puro (BP0) salientou o menor valor ($1,96 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$). Esta elevação é coerente com a natureza do biodiesel, cuja densidade é tipicamente superior à do diesel de petróleo. Isto ocorre porque as moléculas de ácidos graxos do biodiesel são maiores e possuem

interações intermoleculares mais fortes em comparação com os hidrocarbonetos do diesel de petróleo, o que resulta em uma maior resistência ao escoamento e, conseqüentemente, maior viscosidade (Atabani et al., 2012).

Tabela 3. Valores médios e desvio padrão da viscosidade dos combustíveis com diferentes concentrações de biodiesel.

Amostra	Viscosidade ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$) a 40 °C
BP0	$1,96 \pm 0,01^a$
BP14	$2,04 \pm 0,01^b$
BP30	$2,17 \pm 0,01^c$
BP100	$3,01 \pm 0,01^d$

*Valores seguidos de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

No estudo publicado por Phankosol et al. (2015), os pesquisadores revelaram que a viscosidade cinemática aumenta com o número de átomos de carbono e o grau de saturação dessas cadeias, sendo que maiores pesos moleculares e menores níveis de insaturação resultam em combustíveis mais viscosos. Esse comportamento também foi descrito por Chavarria-Hernandez e Pacheco-Catalán (2014), mostrando que biodieseis produzidos por compostos insaturados têm viscosidades mais baixas em comparação com ácidos graxos saturados. Khethiwe et al. (2020) observaram que a predominância de ácidos graxos insaturados, derivados de ácidos graxos como oleico e linoleico, favorece as características desejáveis de escoamento em baixas temperaturas, embora possa comprometer a estabilidade oxidativa. Isso é compatível com os dados experimentais das formulações BP0 e BP14, que tiveram viscosidades menores, indicando um comportamento de escoamento favorável, especialmente quando comparado ao BP100.

Em estudos já realizados com biodiesel de óleo de salmão, Chiou et al. (2008) relataram que a viscosidade obtida foi de $4,52 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, valor diferente do observado nesse estudo ($3,01 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$). O valor obtido no estudo proposto sugere um perfil com menor teor de ésteres saturados ou maior eficiência na remoção de subprodutos, o que favorece menor resistência ao escoamento.

Importante ressaltar que, apesar da diferença em relação à literatura citada, o valor de viscosidade observado na amostra BP100 encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela Resolução ANP nº 45/2014 (2,5 a 6,0 mm²/s) atendendo, assim, aos critérios de qualidade exigidos para o uso do biodiesel como combustível.

Poder calorífico Superior (MJ.kg⁻¹)

A análise dos valores de poder calorífico (Tabela 4) revelou diferenças significativas entre as formulações ($p < 0,05$), exibindo impacto da composição na energia liberada durante a combustão. O diesel puro (BP0) apresentou o maior valor (45,03 MJ.kg⁻¹) e, de maneira inversa, o BP100 (100% biodiesel) registrou o menor valor (39,23 MJ.kg⁻¹). Esse comportamento está relacionado à maior concentração de hidrocarbonetos no diesel puro, que são compostos apenas por carbono e hidrogênio, sendo totalmente oxidados durante a combustão, resultando em maior densidade energética em comparação aos ésteres metílicos presentes no biodiesel (Pranta; Cho 2025).

Tabela 4. Valores médios e desvio padrão do poder calorífico dos combustíveis com diferentes concentrações de biodiesel.

Amostra	Poder Calorífico (MJ.kg ⁻¹)
BP0	45,03 ± 0,12 ^a
BP14	43,10 ± 0,15 ^b
BP30	42,09 ± 0,35 ^c
BP100	39,23 ± 0,12 ^d

*Valores seguidos de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O poder calorífico relatado no estudo proposto encontra-se próximo aos reportados por Chiou et al. (2008) e El-Mashad et al. (2008). Em ambos os estudos, o poder calorífico variou entre 39,2 MJ.kg⁻¹ e 38,8 MJ.kg⁻¹, respectivamente, confirmando que, apesar de ser energeticamente inferior ao diesel fóssil, o biodiesel de óleo de salmão apresenta desempenho energético

compatível e viabilidade técnica para uso em motores, especialmente quando utilizado em misturas.

Pawar et al. (2023) ressaltam que a presença em torno de 12% de oxigênio nos ésteres de ácidos graxos reduz significativamente a energia liberada na combustão, quando comparada ao diesel fóssil. Além disso, a composição química dos ácidos graxos influencia diretamente esse parâmetro energético, com ésteres de cadeia mais longa e maior saturação geralmente promovendo maior poder calorífico.

Pinzi et al. (2011) descrevem que cadeias contendo maior número de carbonos e menor grau de insaturação resultam em maior densidade energética e sua análise estatística confirmou a influência significativa desses fatores na previsão de propriedades físico-químicas do biodiesel, incluindo o poder calorífico.

Zhang et al. (2018) proferem que os ésteres metílicos saturados têm maior entalpia de formação e maior calor de combustão quando comparados aos insaturados. Isso ajuda a explicar por que o BP0, uma amostra potencialmente com maior teor de saturação e menor quantidade de oxigênio incorporado, apresentou o maior valor calorífico entre os grupos testados.

Consumo horário de combustível (g.h^{-1})

A Figura 13 exibe o gráfico do consumo horário (g.h^{-1}) em função do torque para os quatro tipos de combustíveis testados. É possível observar comportamento linear crescente em todos os casos, com altos coeficientes de determinação ($R^2 > 0,96$), apontado uma correlação entre o torque aplicado e o consumo do motor.

A equação de regressão ($y = 126x + 330$) para o diesel puro (BP0) indicou um consumo inicial de 420 g.h^{-1} e um acréscimo linear de 126 g.h^{-1} para cada unidade crescente de torque. Esse comportamento, caracterizado pela menor inclinação entre os combustíveis testados, foi adotado como referência comparativa para a análise das demais misturas contendo biodiesel.

Para o BP14, a equação da regressão ($y = 141x + 261$) revelou consumo inicial de 390 g.h^{-1} . Entretanto, a partir do torque 3, observou-se uma

inclinação mais acentuada da curva, revelando um aumento no consumo específico em comparação ao diesel puro.

A mistura BP30 seguiu a tendência de aumento no consumo conforme o torque ($y = 159x + 237$), alcançando consumo de 1020 g.h^{-1} quando aplicado o torque 5.

Por fim, o BP100 ($y = 168x + 330$) foi o combustível com maior consumo específico entre os testados. Apesar de mostrar o mesmo consumo inicial do diesel puro, sua taxa de crescimento foi a maior de todas (168 g.h^{-1} por torque) resultando em um consumo final de 1110 g.h^{-1} quando aplicado torque 5.

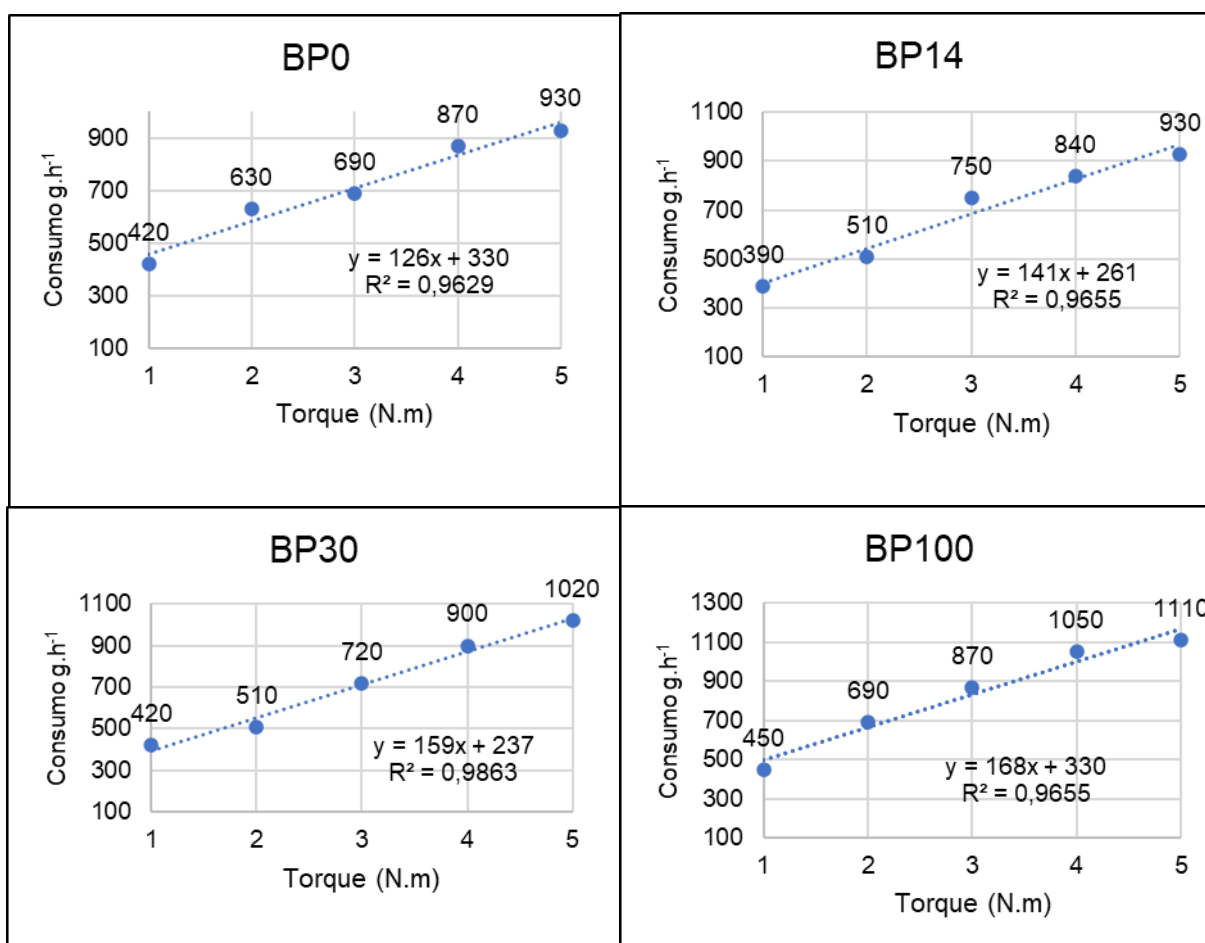


Figura 13. Consumo de combustível em função do torque dos combustíveis com diferentes concentrações de biodiesel.

O aumento no consumo específico, que ocorre quando cresce a proporção de biodiesel de salmão nas misturas, pode ser explicado devido à alta viscosidade do biodiesel puro ($3,01 \text{ mm}^2/\text{s}$), comprometendo a atomização

durante a injeção, formando gotas maiores que dificultam a evaporação e a combustão completa. A presença de ácidos graxos de cadeia longa, característicos do óleo de salmão, combinada ao menor poder calorífico do biodiesel, exige a injeção de uma maior massa de combustível para entregar o mesmo torque justificando, assim, o aumento do consumo horário observado.

Tais especificações corroboram com o estudo de Chiou e colaboradores (2008), quando relatam que o biodiesel de salmão tem maior viscosidade devido à presença de ácidos graxos de cadeia longa. Verma et al. (2021) reforçam que propriedades como viscosidade, número de cetano e densidade influenciam diretamente o padrão de combustão e, conseqüentemente, o consumo total.

Resultados semelhantes foram encontrados em estudos com biodiesel de *Crambe abyssinica* (Uyaroğlu et al., 2022) e biodiesel de soja (Imwinkelried et al., 2025). Nestes estudos, os autores observaram que o biodiesel puro teve aumento no consumo específico, particularmente em rotações mais elevadas e redução do rendimento térmico em comparação ao diesel convencional. Tal comportamento está relacionado com a menor densidade energética do biodiesel, que exige maior volume de injeção para manter a potência do motor.

Análises termogravimétricas (TGA) e (DTG)

A análise termogravimétrica (TGA), acompanhada de sua derivada (DTG), foi aplicada para avaliar a estabilidade térmica e o comportamento de decomposição do óleo de salmão e do biodiesel obtido.

Tal como ilustrado na Figura 14, o óleo de salmão teve elevada estabilidade térmica até cerca de 350 °C, com a principal perda de massa ocorrendo entre 370 °C e 450 °C, totalizando aproximadamente 80% da massa inicial. Esse comportamento é típico da degradação de triglicerídeos e de compostos de alto peso molecular presentes em óleos brutos (Meher; Vidya; Naik, 2006). A curva DTG ressalta um pico único e acentuado próximo a 410 °C, indicando decomposição predominante de lipídios intactos.

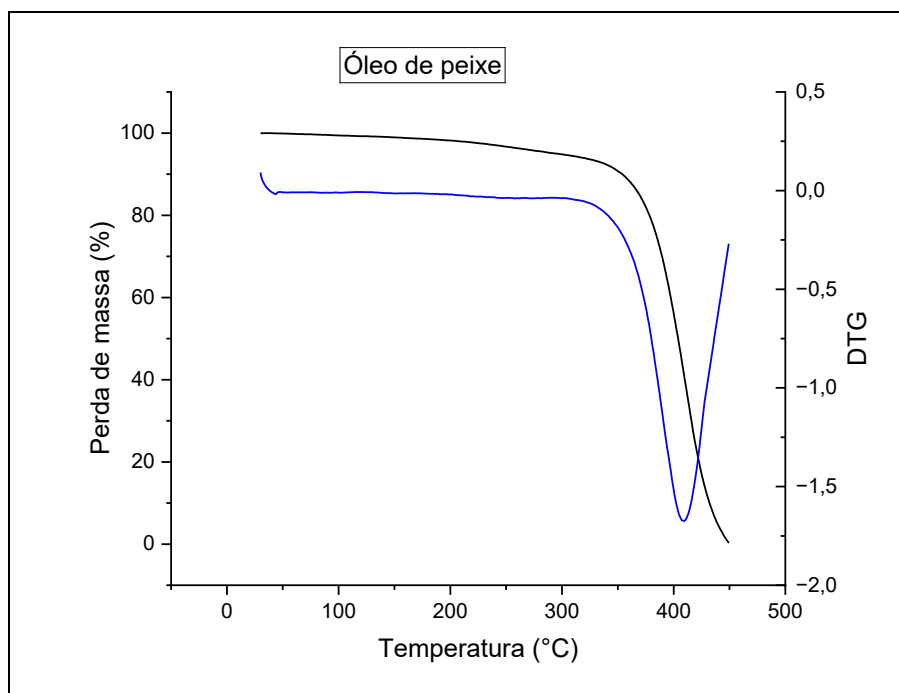


Figura 14. Curva de TGA/DTG do óleo de salmão.

De acordo com a análise termogravimétrica realizada por Gonçalves et al. (2022), as curvas de TGA com picos únicos indicam a predominância de compostos termicamente estáveis, como os triglicerídeos, e uma baixa presença de componentes voláteis, refletindo a estabilidade térmica do biodiesel produzido e com baixa presença de componentes voláteis.

Por outro lado, a Figura 15 mostra que o biodiesel mostrou comportamento térmico distinto, iniciando sua decomposição por volta dos 170 °C e perda de massa mais acentuada entre 200 °C e 310 °C, resultando em aproximadamente 75% de perda de massa total. A curva DTG apresenta um pico único de máxima taxa de degradação próximo de 250 °C, valor típico dos ésteres metílicos de ácidos graxos valor característico da decomposição de ésteres metílicos de ácidos graxos presentes em biodieseis derivados de fontes animais e vegetais (Albuquerque et al., 2010; Ali et al., 2023)

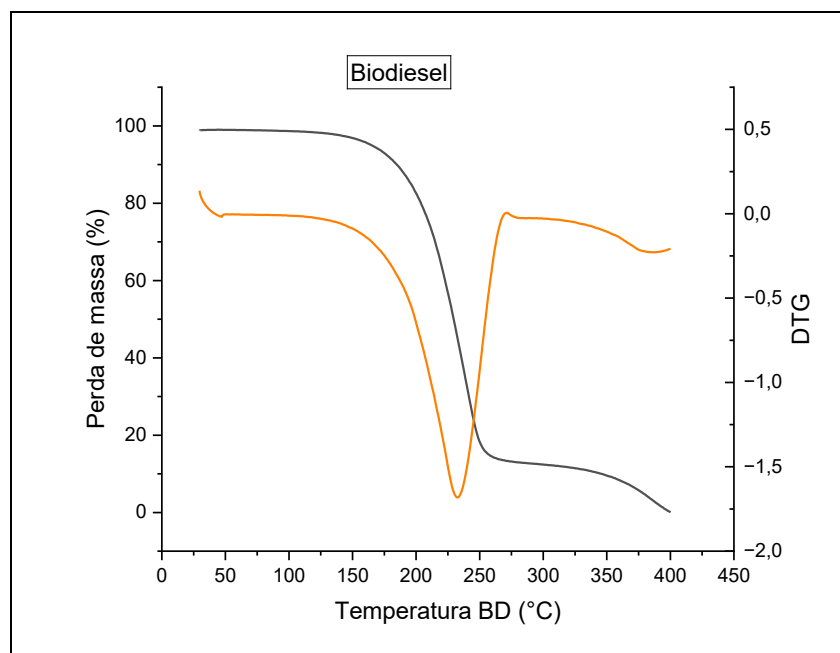


Figura 15. Curva de TGA/DTG do biodiesel obtido a partir do óleo de salmão.

Os resultados exibidos estão de acordo com os reportados por Kumar et al. (2024), cuja análise termogravimétrica revelou que o biodiesel obtido de óleo residual de peixe apresenta elevada estabilidade térmica, confirmando seu potencial como biocombustível.

Gerpen (2005) menciona que biodieseis com maior pureza apresentam picos únicos de degradação térmica entre 200 °C e 350 °C, o que está de acordo com os dados aqui mostrados. A análise térmica revelou um único pico de degradação e ausência de resíduos após 400 °C, indicando que as etapas de lavagem e secagem foram eficazes, contribuindo com a estabilidade térmica do biodiesel obtido. Em um estudo publicado por Meher, Vidya e Naik (2006), os autores apontam que a remoção adequada de subprodutos da transesterificação é essencial para garantir não apenas a estabilidade térmica, mas também o desempenho do combustível em aplicações práticas.

Sharma e Singh (2008) ressaltam que a estabilidade térmica é um indicador crítico da qualidade do biodiesel, sendo diretamente afetada por resíduos de reagentes ou subprodutos. A faixa estreita de decomposição observada, associada à curva DTG bem definida, reforça a homogeneidade estrutural e qualidade do produto obtido.

Análise por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia FTIR foi utilizada para identificar qualitativamente os grupos funcionais presentes no biodiesel obtido a partir do óleo de salmão e confirmar a ocorrência da reação de transesterificação. Na comparação entre os espectros do óleo de salmão e do biodiesel (Figura 16), observa-se uma diferença nas bandas de absorção, refletindo alterações estruturais esperadas com a conversão dos triglicerídeos em ésteres metílicos.

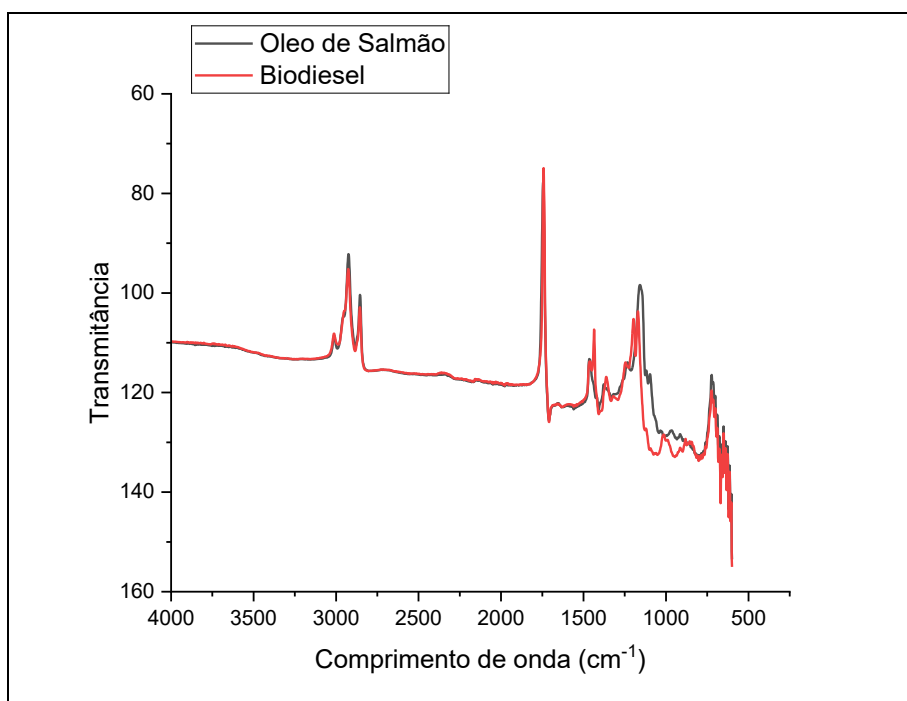


Figura 16. Espectros de FTIR do óleo de salmão e do biodiesel.

A presença de uma banda intensa em torno de 1740 e 1750 cm^{-1} , atribuída à vibração de estiramento do grupo carbonila ($\text{C}=\text{O}$), é indicativa da formação de ésteres metílicos, principal produto da transesterificação. Este pico é menos pronunciado no espectro do óleo de salmão, mas evidente no espectro do biodiesel, o que reforça a conversão química da matéria-prima. Para Li et al. (2020), a banda na região de 1740 cm^{-1} é um marcador confiável da presença de ésteres e, portanto, da eficiência da reação.

Foram observadas bandas entre 1190 e 1160 cm^{-1} , atribuídas ao estiramento das ligações C–O dos grupos ésteres. Essa região, também chamada de “impressão digital” dos ésteres metílicos, é característica de biodieseis bem purificados, como descrito por Tariq et al. (2011). A presença dessas bandas, aliadas à diminuição ou ausência de bandas associadas à glicerina ou ácidos graxos livres, indica um bom rendimento e uma conversão quase total dos triglicerídeos originais.

Importante destacar a ausência de absorções intensas na faixa de 3200–3600 cm^{-1} , especialmente próximo a 3400 cm^{-1} , sugerindo que não há presença de grupos hidroxila (–OH), o que indica que traços de água e metanol foram removidos durante as etapas de purificação. De acordo com Knothe (2001) e Demirbas (2009), a presença de bandas nessa região pode comprometer a estabilidade do biodiesel e indica contaminação por álcoois ou umidade.

As diferenças observadas entre os espectros do óleo de salmão e do biodiesel confirmam a efetividade do processo de transesterificação, bem como a obtenção de um produto final com perfil espectral compatível com os padrões de biodieseis de qualidade, como também relatado em estudos de biodiesel produzido a partir de óleos não convencionais (Yusuff et al., 2024).

4.2. Emissões gasosas

Emissões de monóxido de carbono (ppm)

A análise de variância (Anova) indicou diferenças significativas ($p < 0,05$) nas emissões de monóxido de carbono (CO) em função do torque e do tipo de combustível, confirmando que a composição da mistura influencia diretamente esse parâmetro de emissão.

Na Tabela 5, são exibidos os valores médios e desvios-padrão das emissões de CO para os combustíveis testados. Observa-se que, em torque mínimo (1 N.m), o BP0 apresentou a menor emissão ($588 \pm 2,8$ ppm), enquanto o BP100 atingiu $955 \pm 4,9$ ppm, mostrando maior formação de CO possivelmente relacionada à combustão incompleta em baixas temperaturas e

à menor volatilidade do biodiesel. Já em torque máximo (5 N·m), o BP0 teve o maior valor médio ($2207 \pm 1,8$ ppm), superando todos os demais combustíveis. Nesse mesmo regime, o BP30 destacou-se com o melhor desempenho ambiental entre os biocombustíveis, exibindo emissão de $1616 \pm 4,1$ ppm.

Tabela 5. Valores médios e desvio padrão do poder calorífico dos combustíveis com diferentes concentrações de biodiesel.

	Torque 1 N.m	Torque 2 N.m	Torque 3 N.m	Torque 4 N.m	Torque 5 N.m
BP0	$588,25 \pm 2,75^a$	$609,00 \pm 3,46^b$	$636,00 \pm 0,82^c$	$1245,25 \pm 1,71^d$	$2207,00 \pm 1,83^e$
BP14	$862,50 \pm 1,29^f$	$935,25 \pm 1,71^g$	$1335,75 \pm 0,96^h$	$1573,50 \pm 1,29^i$	$1838,25 \pm 2,63^j$
BP30	$878,00 \pm 1,83^k$	$902,25 \pm 3,20^l$	$1191,25 \pm 1,89^m$	$1449,75 \pm 3,30^n$	$1616,75 \pm 4,03^o$
BP100	$955,00 \pm 4,97^p$	$982,50 \pm 4,43^k$	$1207,25 \pm 5,44^r$	$1720,50 \pm 3,87^s$	$1763,50 \pm 3,11^t$

*Valores seguidos de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

No regime de torque máximo (T5), o BP0 alcançou a maior emissão de CO ($2207,00 \pm 1,83$ ppm), superando os biocombustíveis. Nesse mesmo ponto, o BP30 salientou o melhor desempenho ambiental, com emissão de $1616,75 \pm 4,03$ ppm, mostrando que a adição de 30% de biodiesel de óleo de salmão favorece maior eficiência oxidativa em altas cargas.

A Figura 17 ilustra a tendência geral, mostrando que as concentrações de CO aumentam proporcionalmente com a elevação do torque, comportamento esperado em função da maior demanda energética e da elevação na taxa de injeção de combustível. Nota-se ainda que, embora maiores proporções de biodiesel elevem as emissões em baixos torques, esse padrão se inverte em regimes de carga elevada, sugerindo melhor eficiência de combustão em condições de maior temperatura da câmara.

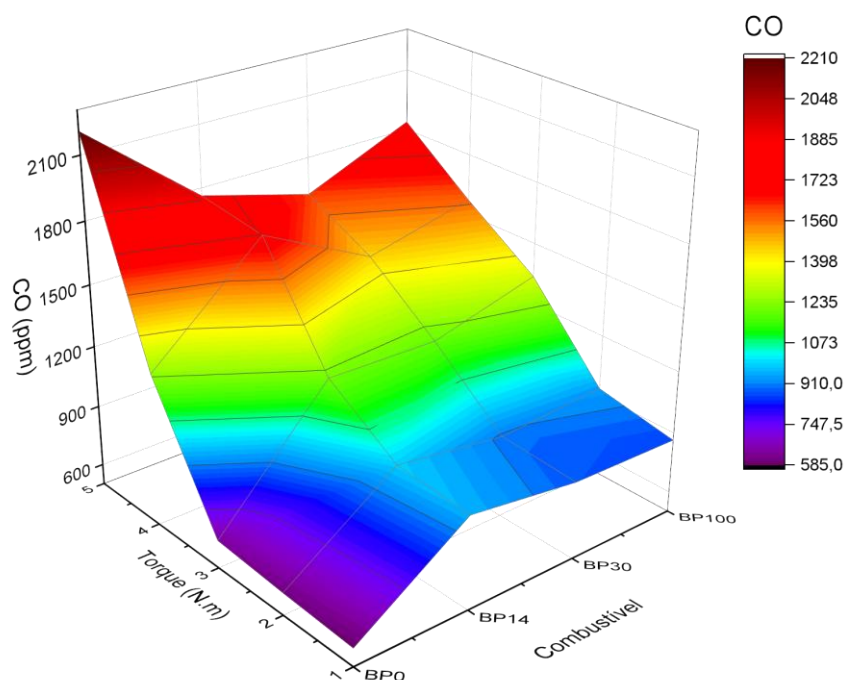


Figura 17. Superfície de resposta com a média das emissões de CO (ppm) em função do torque (N.m) e do tipo de combustível.

A análise estatística confirmou essas observações. A Anova indicou diferenças significativas ($p < 0,05$) para os fatores tipo de combustível, torque e sua interação. Além dos efeitos isolados, o comportamento das emissões de CO também depende da combinação entre torque aplicado e composição do combustível. O teste de Tukey ($p < 0,05$) revelou que a maioria das combinações Combustível $\times$ Torque apresentaram diferenças estatisticamente.

Comparações como BPO_T5 *versus* BP14_T1 ressaltam contrastes expressivos, reforçando o impacto da carga operacional sobre a geração de CO. Ademais, diferenças estatísticas foram verificadas entre torques distintos dentro de um mesmo combustível, como no caso de BP14_T3 e BP14_T1, destacando o papel isolado do torque sobre a formação desse poluente.

Esses resultados corroboram a literatura, que relaciona o aumento de CO em baixas cargas à maior viscosidade e menor volatilidade do biodiesel, dificultando a atomização do jato de combustível e a formação homogênea da mistura ar-combustível (Palani et al., 2022; Zandie et al., 2022). Em contraponto, em regimes de alta carga, a elevação da temperatura de combustão favorece a oxidação do biodiesel, reduzindo a produção de CO. No

entanto, mesmo nesses regimes, o diesel puro mostrou piores resultados, possivelmente devido à sua menor disponibilidade de oxigênio molecular, o que pode limitar a eficiência da combustão completa (Rakopoulos et al., 2014). Os resultados reforçam a relevância de adequações nos sistemas de injeção e do uso de tecnologias de pós-tratamento, como catalisadores de oxidação, especialmente quando se utiliza diesel ou altas cargas operacionais (Knothe; Razon, 2017).

Emissões de dióxido de carbono (%)

A análise de variância (Anova) revelou diferenças significativas ($p < 0,05$) para as emissões de dióxido de carbono (CO_2), considerando os fatores torque, tipo de combustível e a interação entre eles. O teste de Tukey ($p < 0,05$) demonstrou que diversas combinações de Combustível $\times$ Torque apresentaram diferenças estatísticas, especialmente em condições de torque extremo e em combustíveis com maior proporção de biodiesel.

Na Tabela 6, encontram-se os valores médios e desvios-padrão das emissões de CO_2 para os combustíveis testados. Em torque mínimo (1 N.m), o BP0 ressaltou a menor emissão ($5,01 \pm 0,02\%$), ao passo que o BP100 exibiu o maior valor ($5,27 \pm 0,06\%$). No torque de 2 N.m, a mistura BP30 destacou-se com a maior emissão ($6,65 \pm 0,01\%$), superando BP14 ($6,56 \pm 0,01\%$) e BP100 ($5,76 \pm 0,03\%$), este último apresentando comportamento atípico. Em torque intermediário (3 N.m), as emissões tornaram-se mais próximas entre os combustíveis: BP0 ($6,56 \pm 0,01\%$), BP14 ($6,85 \pm 0,01\%$), BP30 ($6,81 \pm 0,02\%$) e BP100 ($6,78 \pm 0,03\%$), indicando desempenho de combustão semelhante. Em torque de 4 N.m, o BP100 voltou a se destacar com maior emissão ($7,76 \pm 0,04\%$), seguido por BP30 ($7,75 \pm 0,09\%$) e BP0 ($7,61 \pm 0,01\%$). No torque máximo (5 N.m), o BP100 mostrou o maior valor ($8,94 \pm 0,04\%$), enquanto o menor valor entre os biocombustíveis foi observado no BP30 ($8,63 \pm 0,07\%$).

Tabela 6. Valores médios e desvio padrão das emissões de dióxido de carbono (%) dos combustíveis com diferentes concentrações de biodiesel.

	Torque 1 N.m	Torque 2 N.m	Torque 3 N.m	Torque 4 N.m	Torque 5 N.m
BP0	5,01 ± 0,02 ^a	5,62 ± 0,03 ^b	6,56 ± 0,01 ^c	7,61 ± 0,08 ^d	8,72 ± 0,02 ^e
BP14	5,03 ± 0,01 ^f	5,72 ± 0,01 ^g	6,65 ± 0,01 ^h	7,55 ± 0,03 ⁱ	8,69 ± 0,02 ^j
BP30	5,06 ± 0,02 ^k	5,57 ± 0,04 ^l	6,69 ± 0,01 ^m	7,75 ± 0,01 ⁿ	8,63 ± 0,06 ^o
BP100	5,28 ± 0,06 ^p	5,76 ± 0,02 ^q	6,78 ± 0,03 ^r	7,77 ± 0,04 ^s	8,94 ± 0,03 ^t

*Valores seguidos de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A Figura 18 exibe as médias das emissões de dióxido de carbono (CO_2) em função do torque e da proporção de biodiesel na mistura. Os resultados confirmam a tendência de aumento das emissões com a elevação do torque, independentemente do tipo de combustível. Essa tendência é coerente com o aumento da demanda energética do motor, o que resulta em maior consumo de combustível e, conseqüentemente, em maiores emissões de CO_2 .

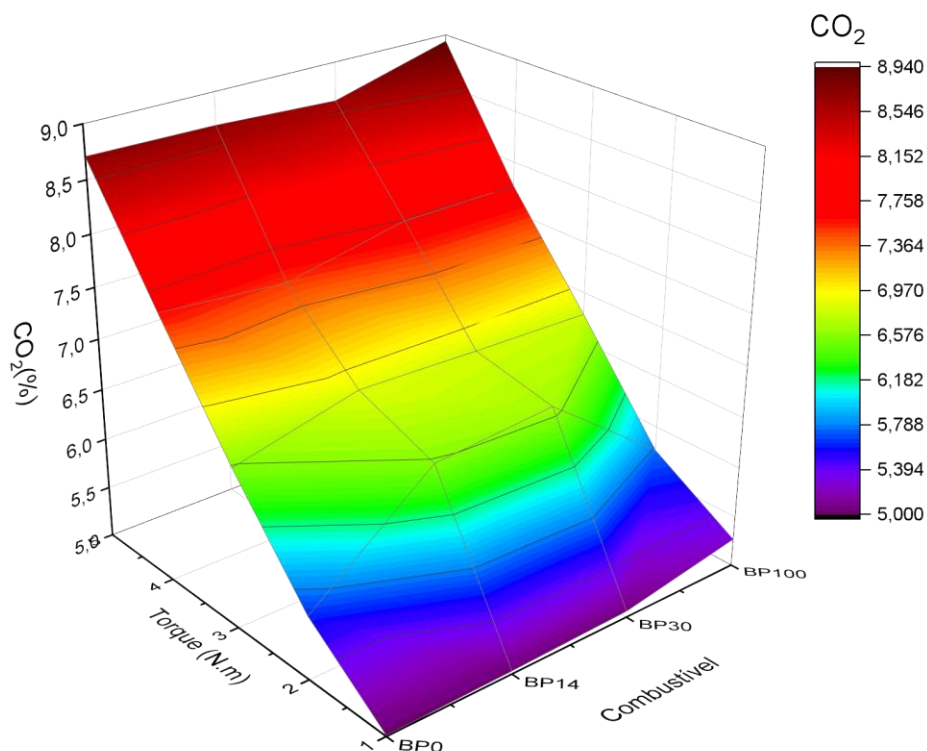


Figura 18. Superfície de resposta da média das emissões de CO_2 (%) em função do torque (N.m) e do tipo de combustível.

Os dados demonstram que as misturas contendo biodiesel (BP14, BP30 e BP100) exibem valores de emissão de CO₂ ligeiramente superiores aos observados com o diesel puro (BP0) em níveis de torque mais elevados. Tal comportamento está de acordo com a literatura, a qual sugere que o biodiesel, por conter átomos de oxigênio em sua estrutura química, favorece uma combustão mais completa, promovendo maior conversão do carbono presente no combustível em CO₂ (Lapuerta et al., 2008). Esse fenômeno também foi observado por Dhairiyasamy e Gabriel (2025), ao analisarem as emissões de biodiesel de óleo de Mahua, concluindo que a melhoria na queima pode elevar o CO₂, embora reduza outros poluentes.

A elevação mais acentuada das emissões de CO₂ observada com o uso de BP100 pode ser atribuída à sua maior disponibilidade de oxigênio molecular, aliada à necessidade de maior injeção de combustível em condições de torque elevado. Tal conclusão também é sustentada por Altun e Lapuerta (2014), que destacam a correlação entre propriedades físico-químicas do biodiesel e sua influência sobre o perfil de emissões em motores do ciclo diesel.

Emissões de óxidos de nitrogênio (ppm)

A análise de variância (Anova) indicou efeitos significativos ($p < 0,05$) nas emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), tendo em vista os fatores torque, tipo de combustível e a interação entre ambos. O teste de Tukey ($p < 0,05$) enfatizou diferenças estatísticas entre diversas combinações Combustível × Torque, especialmente em torques elevados, reforçando que o impacto do combustível sobre as emissões de NO_x depende diretamente da condição operacional do motor.

Na Tabela 7, estão ressaltados os valores médios e desvios-padrão das emissões de NO_x para os quatro combustíveis testados em diferentes condições de torque. Em torque mínimo (1 N.m), o BP100 mostrou a menor emissão ($88 \pm 1,7$ ppm), enquanto o BP0 registrou o maior valor ($145 \pm 2,8$ ppm). Esse padrão se repetiu em 2 N.m, com o BP100 emitindo $100 \pm 0,9$ ppm e o BP0 mantendo média elevada ($146 \pm 2,2$ ppm), sugerindo que o biodiesel

puro tende a reduzir a formação de NO_x em baixas cargas. Em torque intermediário (3 N.m), BP14 ($142 \pm 0,6$ ppm) e BP30 ($144 \pm 4,1$ ppm) se destacaram com valores mais altos, ao passo que o BP100 manteve desempenho inferior ($125 \pm 7,2$ ppm). Nos torques elevados (4 e 5 N.m), o BP30 apresentou as maiores emissões ($208 \pm 2,5$ e $211 \pm 2,3$ ppm, respectivamente), enquanto o BP100 manteve os menores níveis, com $153 \pm 3,9$ ppm e $158 \pm 2,5$ ppm, respectivamente.

Tabela 7. Valores médios e desvio padrão das emissões de óxidos de nitrogênio (ppm) dos combustíveis com diferentes concentrações de biodiesel

	Torque 1 N.m	Torque 2 N.m	Torque 3 N.m	Torque 4 N.m	Torque 5 N.m
BP0	$146 \pm 2,1^a$	$157 \pm 1,2^b$	$181 \pm 1,4^c$	$183 \pm 2,1^d$	$145 \pm 2,7^e$
BP14	$124 \pm 0,5^f$	$132 \pm 1,7^g$	$141 \pm 0,5^h$	$143 \pm 2,5^i$	$172 \pm 2,7^j$
BP30	$113 \pm 0,5^k$	$126 \pm 1,5^l$	$144 \pm 4,1^m$	$208 \pm 2,4^n$	$211 \pm 2,9^o$
BP100	$88 \pm 1,7^p$	$100 \pm 0,9^q$	$125 \pm 2,1^r$	$153 \pm 3,8^s$	$158 \pm 2,4^t$

*Valores seguidos de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A Figura 19 mostra a média das emissões de NO_x em função do torque e da proporção de biodiesel na mistura. Nota-se que o BP30 apresentou os maiores valores de emissão em torques elevados (4 e 5 N.m), enquanto o BP100 manteve os menores níveis ao longo de todas as faixas de torque, resultado que pode estar relacionado à sua capacidade de promover uma combustão mais fria, mesmo possuindo alto teor de oxigênio.

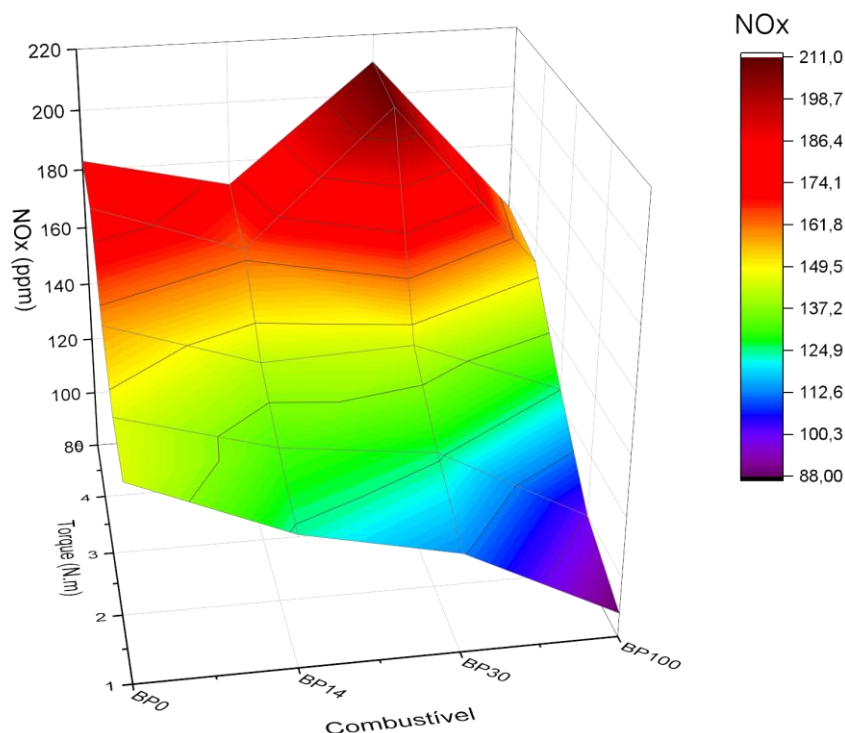


Figura 19. Superfície de resposta das emissões médias de óxidos de nitrogênio (ppm) em função do torque (N.m) e do tipo de combustível.

É possível observar que o BP100 salientou as menores emissões de NOx em todas as faixas de torque, inclusive sob cargas elevadas (4 e 5 N.m), comportamento que contradiz parcialmente os achados predominantes na literatura. Estudos publicados por Lapuerta et al. (2008) e Palash et al. (2013) reportam que o aumento no teor de oxigênio presente no biodiesel tende a elevar as emissões de NOx, especialmente em torques elevados. Contudo, os dados obtidos neste trabalho indicam que o biodiesel puro de salmão (BP100) promoveu uma combustão com menor formação térmica de NOx, possivelmente em função das propriedades físico-químicas específicas do óleo de salmão, como maior viscosidade, que retardam a ignição e limitam o pico térmico da chama. Estas observações também foram descritas por Sahoo Das (2009), quando observaram menor emissão de NOx com biodieseis de origem animal, sugerindo que a composição do biodiesel, aliada ao regime de operação do motor, pode desempenhar papel fundamental na formação de óxidos de nitrogênio.

Vale ressaltar que o BP 30 foi a mistura que mais emitiu NO_x, sugerindo um comportamento atípico. A presença deste pico pode ser atribuída a ocorrência de um equilíbrio ideal entre biodiesel e diesel, favorecendo as características do teor de oxigênio, densidade e viscosidade, gerando uma combustão mais completa, resultando em condições favoráveis para formação de NO_x (Ghazali et al., 2015).

O controle das emissões de NO_x permanece um dos principais desafios técnicos para a adoção de combustíveis alternativos. Estratégias como o uso de tecnologias de pós-tratamento, incluindo Redução Catalítica Seletiva (SCR) e Recirculação dos Gases de Escape (EGR), bem como ajustes no tempo de injeção e na pressão de pulverização, têm sido amplamente propostas para mitigar a formação de NO_x sem comprometer a eficiência do motor (Appavu et al., 2019). O aumento observado nas emissões, especialmente com BP30, pode ser explicado pelo mecanismo térmico de Zeldovich, que descreve a formação de NO_x como altamente dependente da temperatura de combustão, sendo potencializado em cenários de alta carga e disponibilidade de oxigênio (Sun; Caton; Jacobs, 2010).

Emissões de hidrocarbonetos (ppm)

A análise de variância (Anova) confirmou diferenças significativas ($p < 0,05$) para as emissões de hidrocarbonetos (HC), tendo em vista os fatores torque, tipo de combustível e a interação entre ambos. O teste de Tukey ($p < 0,05$) demonstrou que diversas combinações de Combustível $\times$ Torque tiveram diferenças estatísticas, especialmente em condições de alta carga, ressaltando que a formação de HC é influenciada tanto pela formulação do combustível quanto pelo regime operacional do motor.

Na Tabela 8, são exibidos os valores médios e desvios padrão das emissões de HC em função do torque e do tipo de combustível. Em torque mínimo (1 N.m), o BP0 enfatizou a menor emissão ($35 \pm 0,5$ ppm), enquanto o BP100 registrou o maior valor ($60 \pm 0,9$ ppm), sugerindo menor eficiência de queima do biodiesel em cargas leves. As misturas BP14 ($58 \pm 0,5$ ppm) e BP30 ($51 \pm 0,8$ ppm) tiveram valores intermediários. Com o aumento do torque,

observou-se crescimento progressivo nas emissões, com destaque para BP14 ($89 \pm 0,5$ ppm) e BP100 ($85 \pm 2,5$ ppm) em 3 N.m. O BP30 manteve desempenho mais estável, registrando os menores níveis entre os biocombustíveis ($66 \pm 0,9$ ppm). Em torques mais elevados, esse padrão se intensificou: em 5 N.m, o BP100 atingiu o pico de emissão ($132 \pm 1,6$ ppm), seguido de perto pelo BP0 ($128 \pm 0,9$ ppm), enquanto o BP30 manteve o melhor desempenho ($90 \pm 1,5$ ppm).

Tabela 8. Valores médios e desvio padrão das emissões de hidrocarbonetos (ppm) dos combustíveis com diferentes concentrações de biodiesel.

	Torque 1 N.m	Torque 2 N.m	Torque 3 N.m	Torque 4 N.m	Torque 5 N.m
BP0	$35 \pm 0,5^a$	$38 \pm 0,5^b$	$45 \pm 0,8^c$	$70 \pm 0,8^d$	$129 \pm 0,9^e$
BP14	$58 \pm 0,5^f$	$62 \pm 0,5^g$	$89 \pm 0,5^h$	$109 \pm 1,2^i$	$111 \pm 2,7^j$
BP30	$51 \pm 0,8^k$	$56 \pm 1,5^l$	$66 \pm 1,4^m$	$83 \pm 4,5^n$	$88 \pm 3,1^o$
BP100	$60 \pm 0,9^p$	$64 \pm 0,5^q$	$85 \pm 1,3^r$	$106 \pm 3,3^s$	$128 \pm 2,8^t$

*Valores seguidos de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A Figura 20 tem a concentração média de hidrocarbonetos (HC) em função do torque e do tipo de combustível. Observa-se que o aumento do torque está consistentemente associado a um crescimento das emissões para todos os combustíveis, o que é esperado, visto que torques elevados aumentam a injeção de combustível e, potencialmente, reduzem a eficiência da combustão (Altarazi et al., 2022). O BP30 mostrou desempenho mais estável, com valores inferiores aos do BP14 e BP100, sugerindo que há uma proporção de biodiesel na mistura capaz de equilibrar a eficiência da queima com as propriedades físico-químicas do combustível.

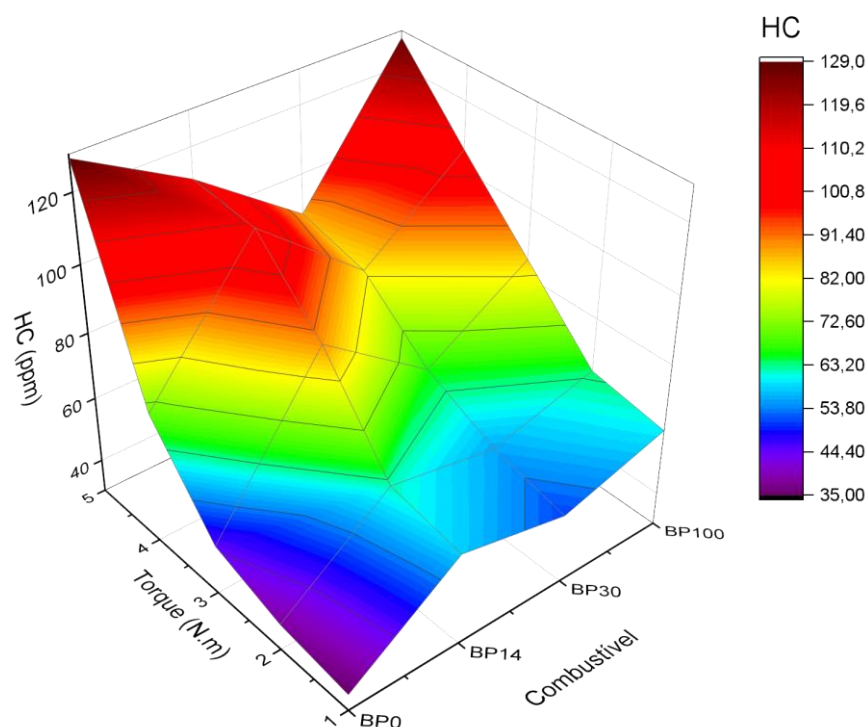


Figura 20. Superfície de resposta das emissões médias de hidrocarbonetos (ppm) em função do torque e do tipo de combustível.

O BP0, por sua vez, teve menores níveis de HC em todos os níveis de torque até 4 N.m. Em 5 N.m, a emissão do diesel se igualou a do BP100 (~129 ppm), resultado que pode ser atribuído à saturação da eficiência de queima em regime de alta carga. Essa característica está diretamente ligada a melhor volatilidade e menor viscosidade do diesel fóssil, que favorecem a homogeneização da mistura ar-combustível e promovem uma combustão mais completa (Kumar et al., 2025).

Esses achados estão em conformidade com a literatura, quando se constata que o biodiesel, apesar de reduzir as emissões de monóxido de carbono e material particulado, pode elevar os níveis de HC, especialmente se for utilizado em sua forma pura ou em altas proporções na mistura (Demirbas, 2009; Datta; Mandal, 2016; Sudalaiyandi et al., 2021).

5 CONCLUSÕES

No estudo desenvolvido, os resultados demonstram que o biodiesel de salmão, especialmente em sua forma pura (BP100), exibiu maior densidade ($0,882 \text{ g/cm}^3$) e viscosidade ($3,01 \text{ mm}^2/\text{s}$) em comparação ao diesel puro (BP0), que registrou $0,832 \text{ g/cm}^3$ e $1,96 \text{ mm}^2/\text{s}$, respectivamente.

Em relação ao poder calorífico, o biodiesel de salmão ($39,23 \text{ MJ/kg}$) apresentou ser menor quando comparado ao do diesel puro ($45,03 \text{ MJ/kg}$).

A produção do biodiesel via transesterificação demonstrou ser eficaz, resultando em um produto com boa estabilidade térmica e pureza, como mostrado pelas análises termogravimétricas e espectroscópicas no infravermelho.

No tocante ao consumo de combustível, foi observada uma tendência de aumento proporcional sobre a elevação da concentração de biodiesel de salmão na mistura quanto ao torque aplicado de forma crescente no motor, mostrando que ambos os fatores influenciam diretamente o desempenho do motor em termos de consumo energético.

Quanto às emissões gasosas, os resultados revelaram comportamentos distintos. As emissões de monóxido de carbono (CO) apresentaram variações: em torques baixos, o diesel puro (BP0) exibiu menor emissão, enquanto em torques mais elevados, as misturas com biodiesel de salmão (BP14, BP30, BP100) demonstraram menor emissão de CO em comparação ao diesel puro. As emissões de dióxido de carbono (CO_2) aumentaram com o torque para todos os combustíveis testados, ao passo que as misturas contendo biodiesel apresentaram valores ligeiramente superiores aos do diesel puro em níveis de torque mais elevados.

Por sua vez, as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) tiveram um aumento progressivo com o incremento do torque para todos os combustíveis, embora o biodiesel puro de salmão (BP100) tenha consistentemente registrado as menores emissões de NO_x em todas as faixas de torque. As emissões de hidrocarbonetos (HC) foram maiores com o uso de biodiesel de salmão em torques baixos.

Os resultados obtidos fornecem informações sobre as propriedades físico-químicas e o perfil de emissões de gases, que podem ser empregados a fim de otimizar as formulações de biodiesel e no desenvolvimento de políticas públicas que fomentem o uso de fontes energéticas alternativas e mais sustentáveis no Brasil.

Para estudos futuros, sugere-se pesquisar blendas com porcentagens de biodiesel de salmão inferiores aos realizados no trabalho proposto e a inclusão de outras fontes de biodiesel na mistura. O uso combinado de aditivos pode ser explorado como forma de melhorar os parâmetros físico-químicos do biodiesel e diminuir as emissões de CO e HC, bem como para otimizar ainda mais a redução de NOx.

A pesquisa viabilizada demonstrou que o biodiesel produzido a partir de óleo residual de salmão se apresenta como uma alternativa rumo a um futuro energético mais limpo e sustentável. No âmbito acadêmico e profissional, esses achados constituem uma base para o desenvolvimento de novos biocombustíveis.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITBELALE, R.; ABALA, I.; M'HAMDI ALAOUI, F. E.; SAHIBED-DINE, A.; MUÑOZ RUJAS, N.; AGUILAR, F. Characterization and determination of thermodynamic properties of waste cooking oil biodiesel: experimental, correlation and modeling density over a wide temperature range up to 393.15 and pressure up to 140 MPa. **Fluid Phase Equilibria**, v. 497, p. 87–96, 2019.

ALBUQUERQUE, M. H. de O.; GONDIM, A. D.; MARTINS, A. de F.; BRASIL, R. C. de O. D.; ARAÚJO, A. S. de; FERNANDES JÚNIOR, V. J. Avaliação da estabilidade oxidativa de biodiesel metílico de girassol com adição diferentes concentrações de BHT pelo método Rancimat e PDSC. In: **Congresso Brasileiro de Mamona, 4.; simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas**, João Pessoa. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010. p. 18–23.

ALI, A.; MAHMOOD, H.; AMEER, A.; SAJID, M.; ULLAH, S. Biodiesel production from palm olein using a sulfonated carbon-based catalyst derived from palm kernel shell. **Renewable Energy**, v. 223, p. 860–871, 2023.

ALTARAZI, Y. S. M.; TALIB, A. R. A.; YUSAF, T.; YU, J.; GIRES, E.; GHAFIR, M. F. A.; LUCAS, J. A review of engine performance and emissions using single and dual biodiesel fuels: Research paths, challenges, motivations and recommendations. **Fuel**, v. 326, p. 125072, 2022.

ALTUN, Ş.; LAPUERTA, M. Properties and emission indicators of biodiesel fuels obtained from waste oils from the Turkish industry. **Fuel**, v. 128, p. 288–295, 2014.

ANGLADE, I.; KROGLI, T. M.; REITAN, K. I. Sludge from sea-based Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) production: quantification, composition, and potential application in integrated multi-trophic aquaculture. **Aquaculture International**, v. 32, p. 6707–6726, 2024.

ANSARI, A. M.; MEMON, L. A.; SELIM, M. Y. E. Experimental study of particulate matter emission for a diesel engine fueled with nanoparticles and biofuel/diesel blends. **International Journal of Thermofluids**, [S.l.], v. 23, p. 100738, 2024.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 50, de 29 de agosto de 2013**. Estabelece as normas para a produção e comercialização de biodiesel. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 ago. 2013. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br>>. Acesso em: 07 mar. 2025.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 45, de 25 de agosto de 2014**. Especificações do biodiesel. Diário Oficial da União, 2014.

APPAVU, P.; RAMANAN, M. V.; JAYARAMAN, J.; VENU, H. NO_x emission reduction techniques in biodiesel-fuelled CI engine: a review. **Australian Journal of Mechanical Engineering**, v. 19, n. 2, p. 210–220, 2019.

ANDREO-MARTÍNEZ, P.; ORTIZ-MARTÍNEZ, V. M.; SALAR-GARCÍA, M. J.; VEIGA-DEL-BAÑO, J. M.; CHICA, A.; QUESADA-MEDINA, J. Waste animal fats as feedstock for biodiesel production using non-catalytic supercritical alcohol transesterification: A perspective by the PRISMA methodology. **Energy for Sustainable Development**, v. 69, p. 150–163, 2022.

ASFRAW, B. T.; GARI, M. T.; JAYAKUMAR, M. Transesterification of biodiesel from non-edible oils using heterogeneous base catalysts: A comprehensive review of potential renewable biomass feedstocks. **Chemical Engineering Journal**, v. 511, p. 144774, 2025.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D1217**. Standard test method for density and relative density (specific gravity) of liquids by Bingham pycnometer. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D240** – Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D445** – Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity). West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ATABANI, A. E.; SILITONGA, A. S.; BADRUDDIN, I. A.; MAHLIA, T. M. I.; MASJUKI, H. H.; MEKHILEF, S. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 2070-2093, 2012.

BATHRINATH, S.; ABUTHAKIR, N.; KOPPIAHRAJ, K.; SARAVANASANKAR, S.; RAJPRADEESH, T.; MANIKANDAN, R. An initiative towards sustainability in the petroleum industry: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 7798-7802, 2021.

BOUSBAA, H.; NAIMA, K.; MEDJAHED, L.; BENRAMDANE, M.; BALASUBRAMANIAN, D.; JOHNSON, A. J. T. Physicochemical characterization and potential applications of biodiesel produced from industrial fish waste. **SAE Technical Paper**, n. 2024-01-5106, 2024.

BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 jan. 2005. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11097.htm. Acesso em: 18 março 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional – **BEN 2020**. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 18 março 2025.

CAI, J.; LEUNG, P. Unlocking the potential of aquatic foods in global food security and nutrition: a missing piece under the lens of seafood liking index. **Global Food Security**, v. 33, 2022. Art. 100641.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: an engineering approach**. 9. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.

CHAVARRIA-HERNANDEZ, J. C.; PACHECO-CATALÁN, D. E. Predicting the kinematic viscosity of FAMES and biodiesel: Empirical models. **Fuel**, v. 124, p. 212-220, 2014.

CHEN, H.; HE, L.; JI, L.; WANG, J.; SUN, N.; ZHANG, R.; WEI, Y.; LI, T.; ZHONG, X.; LV, Z.; ZHU, R.; LI, G. The next challenge in emissions control for heavy-duty diesel vehicles: From NO_x to N₂O. **Environmental Pollution**, v. 363, pt. 2, p. 125269, 2024.

CHEN, Y.-J.; TAN, P.-Q.; LIU, Y.; WANG, K.; WANG, X.-J.; YANG, X.-M.; LOU, D.-M.; HU, Z.-Y.; YANG, W.-M. Interaction between NO_x reduction and soot oxidation for selective catalytic oxidation-selective catalytic reduction catalyst coated on diesel particulate filter: An experimental and numerical study. **Chemical Engineering Journal**, v. 506, p. 160055, 2025.

CHIOU, J.-S.; LIN, C.-Y.; LIN, C.-H. Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and their mixtures with diesel fuel. **Fuel**, v. 87, n. 1, p. 1-6, 2008.

CORRÊA, I. M.; MAZIERO, J. V. G.; ÚNGARO, M. R.; BERNARDI, J. A.; STORINO, M. Desempenho de motor diesel com misturas de biodiesel de óleo de girassol. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 3, p. 923–928, 2008.

DATTA, A.; MANDAL, B. K. A comprehensive review of biodiesel as an alternative fuel for compression ignition engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 799-821, 2016.

DEL DUCA, V.; PONSIGLIONE, C.; PRIMARIO, S.; STRAZZULLO, S. Towards economic, environmental, and societal sustainable world:

Reviewing the interplay of methodologies, variables, and impacts in energy transition models. **Journal of Cleaner Production**, v. 479, p. 144074, 2024.
DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 14–34, 2009.

DHAIRIYASAMY, R.; GABIRIEL, D. Performance and emission characteristics of Mahua oil biodiesel in low heat rejection diesel engines with retarded injection timing. **Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis**, v. 17, 100158, 2025.

DOPPALAPUDI, A. T.; AZAD, A. K.; KHAN, M. M. K. Advanced strategies to reduce harmful nitrogen-oxide emissions from biodiesel fueled engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 174, p. 113123, 2023.

EL-MASHAD, H. M.; ZHANG, R.; AVENA-BUSTILLOS, R. J. A two-step process for biodiesel production from salmon oil. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 2, p. 220-227, 2008.

ENCINAR, J. M.; NOGALES-DELGADO, S.; SÁNCHEZ, N. Pre-esterification of high acidity animal fats to produce biodiesel: A kinetic study. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 14, n. 4, 103048, 2021.

FAISAL, F.; RASUL, M. G.; JAHIRUL, M. I.; CHOWDHURY, A. A. Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics. **Science of The Total Environment**, v. 886, 163756, 2023.

FAYYAZBAKHSH, A.; BELL, M. L.; ZHU, X.; MEI, X.; KOUTNÝ, M.; HAJINAJAF, N.; ZHANG, Y. Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 376, 2022.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The state of world fisheries and aquaculture 2024**: in brief. Blue transformation in action. Rome: FAO, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cd0690en>. Acesso em: 06 jul. 2025.

GHAZALI, W. N. M. W.; MAMAT, R.; MASJUKI, H. H.; NAJAFI, G. Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 585-602, 2015.

GERALDO JUNIOR, E.; BARICCATTI, R. A.; GERALDO, L. T.; GONGORA, B.; SANTOS, C. DE A.; FIGUEIRA, P. T.; ALVES, N. DE B. E. Produção de biodiesel via rota metálica a partir da transesterificação do óleo de peixe.

Contribuciones a las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v. 18, n. 5, p. 01–14, 2025.

GERPEN, J. V. Biodiesel processing and production. **Fuel Processing Technology**, v. 86, n. 10, p. 1097–1107, 2005.

GONÇALVES, D.; BARBEIRO, L. B.; SOUZA, P. T. de; BATISTA, E. A. C.; MEIRELLES, A. J. de A. Thermal stability of glycerol containing compounds from the biodiesel production chain. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, p. 11857–11874, 2022.

GONGORA, B.; SOUZA, S. N. M. de; BASSEGIO, D.; SANTOS, R. F.; SIQUEIRA, J. A. C.; BARICCATTI, R. A.; GURGACZ, F.; SECCO, D.; TOKURA, L. K.; SEQUINEL, R. Comparison of emissions and engine performance of safflower and commercial biodiesels. **Industrial Crops and Products**, v. 179, 2022.

HAQ, M.; ALI, M. S.; PARK, J.-S.; KIM, J.-W.; ZHANG, W.; CHUN, B.-S. Atlantic salmon (*Salmo salar*) waste as a unique source of biofunctional protein hydrolysates: emerging productions, promising applications, and challenges mitigation. **Food Chemistry**, v. 462, 2025.

HOEKMAN, S. K.; BROCH, A.; ROBBINS, C.; CENICEROS, E.; NATARAJAN, M. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 143-169, 2012.

HOSSEINI, Seyed Ehsan. Chapter 1 - Fossil fuel crisis and global warming. In: HOSSEINI, Seyed Ehsan (Ed.). *Fundamentals of Low Emission Flameless Combustion and Its Applications*. **Academic Press**, 2022. p. 1-11.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 18 março 2025.

IMWINKELRIED, G.; SPINOSA, M.; NACUSE, J.; SANCHEZ, R.; FERRERO, G.; TERUEL, M.; BLANCO, M. B. Diesel engine performance and emissions analysis with four different combinations of diesel-soybean biodiesel blends. **Journal of Cleaner Production**, v. 492, p. 144806, 2025.

JAISWAL, K. K.; DUTTA, S.; BANERJEE, I.; JAISWAL, K. S.; RENUKA, N.; RATHA, S. K.; JAISWAL, A. K. Valorization of fish processing industry waste for biodiesel production: opportunities, challenges, and technological perspectives. **Renewable Energy**, v. 220, 119601, 2024.

JAYABAL, R.; RAJKUMAR, S. Environmental impact of waste peel biodiesel–butylated hydroxytoluene nanoparticle blends on diesel engine emissions. **Energy Science & Engineering**, 2025.

JIANG, M.; YAN, Y.; WANG, T.; WANG, B.; LI, Y.; TANG, J.; ZHENG, Y. Chronic exposure to diesel engine exhaust and alteration of the airway bacteriome. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 291, 117857, 2025.

KARKAL, S. S.; KUDRE, T. G. Valorization of fish discards for the sustainable production of renewable fuels. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, art. 122985, 2020.

KARPANAI SELVAN, B.; DAS, S.; CHANDRASEKAR, M.; GIRIJA, R.; JOHN VENNISON, S.; JAYA, N.; SARAVANAN, P.; RAJASIMMAN, M.; VASSEGHIAN, Y.; RAJAMOHAN, N. Utilization of biodiesel blended fuel in a diesel engine – Combustion engine performance and emission characteristics study. **Fuel**, v. 311, 2022, p. 122621.

KHETHIWE, E.; CLEVER, K.; JEREKIAS, G. Effects of Fatty Acids Composition on Fuel Properties of Jatropha Curcas Biodiesel. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 11, p. 165-180, 2020.

KNOTHE, G. Analytical methods used in the production and fuel quality assessment of biodiesel. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n. 2, p. 193–200, 2001.

KNOTHE, G.; RAZON, L. F. Biodiesel fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 58, p. 36-59, 2017.

KNOTHE, G.; STEIDLEY, K. R. Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds: influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components. **Fuel**, v. 84, n. 9, p. 1059–1065, 2005.

KUMAR, A. M.; NATHAN, K. S.; MANICKAM, S.; GUPTA, D.; VIKNESWARAN, M.; DHAMODARAN, G.; SEETHARAMAN, S.; THIAGARAJAN, S.; AL-ANSARI, Mysoon M. Effect of TiO₂ nanoparticles and hydrogen on the combustion, performance, and emissions of madhuca biodiesel in a diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2025.

KUMAR, S. S.; MAGESWARI, S. D. U.; SAKTHIVEL, T. G.; UMAESWARI, P. A review on biofuel production from fish waste oil. **Journal of Environmental Nanotechnology**, v. 13, n. 2, p. 294–297, 2024.

LAPUERTA, M; ARMAS, O; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, n. 2, p. 198-223, 2008.

LASEMI, M. A.; ARABKOOHSAR, A.; HAJIZADEH, A.; MOHAMMADI-IVATLOO, B. A comprehensive review on optimization challenges of smart

energy hubs under uncertainty factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 160, 112320, 2022.

LI, S.; KWOFIE, E. M.; NGADI, M. Comparative evaluation of thermogravimetric and refractive index techniques in determining biodiesel yield. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**, v. 10, p. 30–42, 2020.

LISBOA, F. C.; WOHLGEMUTH, J. C.; OLIVEIRA, N. L. **Estudo da variação das emissões atmosféricas oriundas da adição de biodiesel em misturas com diesel mineral S10: avaliação de motores de combustão interna em ciclo de condução**. Brasília: Universidade de Brasília. Confederação Nacional do Transporte, 2024.

LIU, Y.; RAMAKRISHNAN, V. V.; DAVE, D. Lipid class and fatty acid composition of oil extracted from Atlantic salmon by-products under different optimization parameters of enzymatic hydrolysis. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 30, 2020.

MALIK, M. A. I.; ZEESHAN, S.; KHUBAIB, M.; IKRAM, A.; HUSSAIN, F.; YASSIN, H.; QAZI, A. A review of major trends, opportunities, and technical challenges in biodiesel production from waste sources. **Energy Conversion and Management: X**, v. 23, 100675, 2024.

MANSOORI, G. A.; AGYARKO, L. B.; ESTEVEZ, L. A.; FALLAHI, B.; GLADYSHEV, G.; SANTOS, R. G. dos; NIAKI, S.; PERIŠIĆ, O.; SILLANPÄÄ, M.; TUMBA, K.; YEN, J. Fuels of the Future for Renewable Energy Sources (Ammonia, Biofuels, Hydrogen). **arXiv**, 2021. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2102.00439>>. Acesso em: 17 abr. 2025.

MARTINS, G. I.; SECCO, D.; ROSA, H. A.; BARICCATTI, R. A.; DOLCI, B. D.; DE SOUZA, S. N. M.; GURGACZ, F. Physical and chemical properties of fish oil biodiesel produced in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 154-157, 2015.

MARTINS, W. S.; SUCASAS, L. F. de A.; BORGHESI, R.; OETTERER, M. Production, storage, and destination of seafood industry waste in five states of Brazil. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, São Paulo, v. 54, n. 3, p. 238-246, 2017.

MEHER, L. C.; SAGAR, D. V.; NAIK, S. N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 3, p. 248-268, 2006.

MIGNON, V.; SAADAoui, J. How do political tensions and geopolitical risks impact oil prices?. **Energy Economics**, v. 129, p. 107219, 2024.

MISHRA, S.; BUKKARAPU, K. R.; KRISHNASAMY, A. A composition based approach to predict density, viscosity and surface tension of biodiesel fuels. **Fuel**, v. 285, 119056, 2021.

OLIVEIRA, C. V. K. de; SANTOS, R. F.; SIQUEIRA, J. A. C.; BARICCATTI, R. A.; LENZ, N. B. G.; CRUZ, G. S.; TOKURA, L. K.; KLAJN, F. F. Chemical characterization of oil and biodiesel from four safflower genotypes. **Industrial Crops and Products**, v. 123, p. 412-419, 2018.

PALANI, Y.; DEVARAJAN, C.; MANICKAM, D.; THANIKODI, S. Performance and emission characteristics of biodiesel-blend in diesel engine: a review. **Environmental Engineering Research**, v. 27, n. 1, 200338, 2022.

PALASH, S. M.; KALAM, M. A.; MASJUKI, H. H.; MASUM, B. M.; FATTAH, I. M. R.; MOFIJUR, M. Impacts of biodiesel combustion on NO_x emissions and their reduction approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 473-490, 2013.

PAWAR, S. K.; HOLE, J. A.; BANKAR, M. C.; KHAN, S. N.; WANKHADE, S. Use of fatty acid chemical composition for predicting higher calorific value of biodiesel. **Materials Today: Proceedings**, v. 84, p. 112–120, 2023.

PHANKOSOL, S.; SUDAPRASERT, K.; LILITCHAN, S.; ARYUSUK, K.; KRISNANGKURA, K. An empirical equation for estimation of kinematic viscosity of fatty acid methyl esters and biodiesel. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 92, n. 7, p. 1051–1061, 2015.

PINZI, S.; LEIVA, D.; ARZAMENDI, G.; GANDIA, L. M.; DORADO, M. P. Multiple response optimization of vegetable oils fatty acid composition to improve biodiesel physical properties. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 15, p. 7280–7288, 2011.

PRANTA, M. H.; CHO, H. M. A comprehensive review of the evolution of biodiesel production technologies. **Energy Conversion and Management**, v. 328, p. 119623, 2025.

PULKRABEK, W. W. **Engineering fundamentals of the internal combustion engine**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004.

PYDIMALLA, M.; HUSAINI, S.; KADIRE, A.; VERMA, R. K. Sustainable biodiesel: A comprehensive review on feedstock, production methods, applications, challenges and opportunities. **Materials Today: Proceedings**, [S.I.], v. 92, pt. 2, p. 458–464, 2023.

RAKOPOULOS, D. C.; RAKOPOULOS, C. D.; GIAKOUMIS, E. G.; PAPAGIANNAKIS, R. G.; KYRITSIS, D. C. Influence of properties of various common bio-fuels on the combustion and emission characteristics of high-speed DI (direct injection) diesel engine: Vegetable oil, bio-diesel, ethanol, n-butanol, diethyl ether. **Energy**, v. 73, p. 354-366, 2014.

RAZA, M. A.; KARIM, A.; AMAN, M. M.; AL-KHASAWNEH, M. A.; FAHEEM, M. Global progress towards the Coal: Tracking coal reserves, coal prices, electricity from coal, carbon emissions and coal phase-out. **Gondwana Research**, v. 139, p. 43-72, 2025.

SAHOO, P. K.; DAS, L. M. Combustion analysis of Jatropha, Karanja and Polanga based biodiesel as fuel in a diesel engine. **Fuel**, Oxford, v. 88, n. 6, p. 994–999, 2009.

SARAVANAN, A.; YUVARAJ, D.; KUMAR, P. S.; KARISHMA, S.; RANGASAMY, G. Fish processing discards: a plausible resource for valorization to renewable fuels production, optimization, byproducts and challenges. **Fuel, Oxford**, v. 335, 2023.

SHARMA, Y. C.; SINGH, B. Development of biodiesel from karanja, a tree found in rural India. **Fuel**, v. 87, n. 8–9, p. 1740-1742, 2008.

SILVA, F. R. da; SILVA, F. J. L. B. da; SANTOS, R. de S.; MENDES, M. de L.; GONGORA, B.; LISBOA, F. da Silva; SEQUINEL, R. O biodiesel no Brasil: uma análise da produção, consumo e perspectivas na transição energética. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 11, e43121143670, 2023.

SINGH, N.; SALUJA, R. K.; RAO, H. J.; KAUSHAL, R.; GAHLOT, N. K.; SUYAMBULINGAM, I.; SANJAY, M. R.; DIVAKARAN, D.; SIENGCHIN, S. Progress and facts on biodiesel generations, production methods, influencing factors, and reactors: A comprehensive review from 2000 to 2023. **Energy Conversion and Management**, v. 302, 2024.

STANESCU, R.-C.; SOICA, A.; LEAHU, C.-I. Influence of biodiesel from used cooking oil and sunflower oil on engine efficiency and emission profiles. **Energies**, v. 18, p. 583, 2025.

SUDALAIYANDI, K.; ALAGAR, K.; KUMAR, V. R.; PRAVEEN, M. V. J.; MADHU, P. Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with ternary blends of linseed and rubber seed oil biodiesel. **Fuel**, v. 285, 119255, 2021.

SUHARA, A.; KARYADI; HERAWAN, S. G.; TIRTA, A.; IDRIS, M.; ROSLAN, M. F.; PUTRA, N. R.; HANANTO, A. L.; VEZA, I. Biodiesel sustainability: Review of progress and challenges of biodiesel as a sustainable biofuel. **Clean Technology**, v. 6, p. 886–906, 2024.

SUN, J.; CATON, J. A.; JACOBS, T. J. Oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fuelled diesel engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 6, p. 677-695, 2010.

- SZYBIST, J. P.; SONG, J.; ALAM, M.; BOEHMAN, A. L. Biodiesel combustion, emissions and emission control. **Fuel Processing Technology**, v. 88, n. 7, p. 679-691, 2007.
- TARANGAN, D.; SOBATI, M. A.; SHAHNAZARI, S.; GHOBADIAN, B. Physical properties, engine performance, and exhaust emissions of waste fish oil biodiesel/bioethanol/diesel fuel blends. **Scientific Reports**, v. 13, p. 14024, 2023.
- TARIQ, M.; ALI, S.; AHMAD, F.; AHMAD, M.; ZAFAR, M.; KHALID, N.; KHAN, M. A. FT-IR analysis of fatty acid methyl esters derived from the seeds oil of *Coriandrum sativum*. **Asian Journal of Chemistry**, v. 23, n. 4, p. 1707–1710, 2011.
- TAYIB, Y. M.; AL–SHEIKH, F.; SHAKOR, Z. M.; ANDERSON, W. A. Biodiesel production from fish oil: a review. **Biofuels**, v. 15, n. 1, p. 115–128, 2024.
- UMEH, S. I.; OKONKWO, P. A. **The essential properties of oils for biodiesel production**. 2025.
- UYAROĞLU, A.; KOCAKULAK, T.; AYDOĞAN, B. Investigation of the effects of biodiesel produced from Crambe Abyssinica plant on combustion, engine performance and exhaust emissions. **arXiv**. 2022.
- VERMA, T. N.; SHRIVASTAVA, P.; RAJAK, U.; DWIVEDI, G.; JAIN, S.; ZARE, A.; SHUKLA, A. K.; VERMA, P. A comprehensive review of the influence of physicochemical properties of biodiesel on combustion characteristics, engine performance and emissions. **Journal of Traffic and Transportation Engineering** (English Edition), v. 8, n. 4, p. 510–533, 2021.
- WANG, J.; AZAM, W. Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. **Geoscience Frontiers**, v. 15, n. 2, p. 101757, 2024.
- XU, L.; LI, Y.; MA, W.; SUN, X.; FAN, R.; JIN, Y.; CHEN, N.; ZHU, X.; GUO, H.; ZHAO, K.; LUO, J.; LI, C.; ZHENG, Y.; YU, D. Diesel exhaust particles exposure induces liver dysfunction: Exploring predictive potential of human circulating microRNAs signature relevant to liver injury risk. **Journal of Hazardous Materials**, [S.I.], v. 458, p. 132060, 2023.
- XU, Y.; ZHAO, F. Impact of energy depletion, human development, and income distribution on natural resource sustainability. **Resources Policy**, v. 83, p. 103531, 2023.
- YAHYA, S. I.; AGHEL, B. Estimation of kinematic viscosity of biodiesel-diesel blends: Comparison among accuracy of intelligent and empirical paradigms. **Renewable Energy**, v. 177, p. 318–326, 2021.
- YANG, X. Is fossil fuel intensity adversely affecting health improvement and sustainability?. **Resources Policy**, v. 101, p. 105388, 2025.

YUSUFF, A. S.; OLADEPO, S. A.; GANIYU, S. A. Efficient and Sustainable Biodiesel Production via Transesterification: Catalysts and Operating Conditions. **Catalysts**, v. 14, n. 9, p. 581, 2024.

ZANDIE, M.; NG, H. K.; GAN, S.; SAID, M. F. M.; CHENG, X. The viability of using gasoline-integrated biodiesel–diesel mixtures in engines as a solution to greenhouse gas emissions: a review. **Clean Energy**, Oxford, v. 6, n. 6, p. 848-868, 2022.

ZHANG, Z.; E, J.; DENG, Y.; PHAM, M.; ZUO, W.; PENG, Q.; YIN, Z. Effects of fatty acid methyl esters proportion on combustion and emission characteristics of a biodiesel fueled marine diesel engine. **Energy Conversion and Management**, v. 159, p. 244–253, 2018.

ZHANG, J.; AKYOL, Ç.; MEERS, E. Nutrient recovery and recycling from fishery waste and by-products. **Journal of Environmental Management**, Oxford, v. 348, Art. 119266. 2023.

ZHANG, J. Energy access challenge and the role of fossil fuels in meeting electricity demand: Promoting renewable energy capacity for sustainable development. **Geoscience Frontiers**, v. 15, n. 5, p. 101873, 2024.

ZHU, Z.; HUNJRA, A. I.; ALHARBI, S. S.; ZHAO, S. Global energy transition under geopolitical risks: An empirical investigation. **Energy Economics**, v. 145, p. 108495, 2025.

ZOU, C.; MA, F.; PAN, S.; LIN, M.; ZHANG, G.; XIONG, B.; WANG, Y.; LIANG, Y.; YANG, Z. Earth energy evolution, human development and carbon neutral strategy. **Petroleum Exploration and Development**, abr. 2022.