

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA NA
AGRICULTURA - NÍVEL DE MESTRADO

CELINO GERALDO DO CARMO

**MOTOR GERADOR OPERANDO COM DIESEL E BIODIESEL DE
NABO FORRAGEIRO**

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2025

CELINO GERALDO DO CARMO

**MOTOR GERADOR OPERANDO COM DIESEL E BIODIESEL DE
NABO FORRAGEIRO**

Dissertação 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 Mestre.

Orientador: Reginaldo Ferreira Santos

Coorientadora: Luciene Kazue Tokura

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo precioso dom da vida, por todas as bênçãos e livramentos que me tem dado e por sempre encontrar uma maneira de me colocar ao lado das pessoas certas nas horas certas.

À minha esposa, Maria da Conceição Pina do Carmo, por todo amor, carinho e paciência pelas incontáveis horas dedicadas à elaboração deste trabalho, e aos meus filhos, pela maravilhosa família que tenho.

Aos meus saudosos pais, Osvaldo Gonçalo do Carmo, que me introduziu no mundo da cultura e minha querida mãe, Maria Auxiliadora do Carmo, que preencheu com ternura e carinho todas as lacunas da minha vida.

Ao meu orientador, professor Dr. Reginaldo Ferreira Santos e à minha coorientadora Dra. Luciene Kazue Tokura, pela oportunidade, pelos ensinamentos ministrados, pela preciosa dedicação e empenho na busca de soluções para os problemas encontrados e, em especial, pelo carinho e amizade desfrutados ao longo deste caminho.

Ao meu grande amigo Luiz Felipe Porto, que tanto me incentivou a trilhar os caminhos de um programa de pós-graduação, já nesta fase da minha vida.

A empresa Estrada Distribuidora de Derivados de Petróleo LTDA, localizada na BR 277 - km 579, na cidade de Cascavel - PR, pela doação do combustível A-S10 utilizado no experimento.

E por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

LISTA DE SÍMBOLOS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEN: Balanço Energético Nacional
CE: Consumo específico
CH₃OH: álcool metílico
CH₄: Metano
CNPE: Conselho Nacional de Política Energética
CO: Monóxido de carbono
CO₂: Dióxido de carbono
cSt: centiStokes
DC: Corrente contínua
EPE: Empresa de Pesquisa Energética
GEE: Gases de Efeito Estufa
GWh - Gigawatt-hora
HC: Hidrocarbonetos
HPA - Hidrocarboneto Policlínico Aromático
IEA: International Energy Agency
INT: Instituto Nacional de Tecnologia
KOH - Hidróxido de potássio
MP: Material Particulado
NaOH - Hidróxido de sódio
NO: Monóxido de nitrogênio
NO_x: Óxidos de nitrogênio
O₂: Oxigênio
ONU: Organização das Nações Unidas
ODS: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PNPB: Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
PROBIODIESEL: Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel
Projeto OVEG: Programa de Óleos Vegetais
PROOLEO - Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos
SPD - Sistema de Plantio Direto
TEP - tonelada-equivalente de petróleo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Regulação sobre a mistura obrigatória do biodiesel no diesel	5
Figura 2. Ciclo do carbono	6
Figura 3. Matriz energética mundial 2022	7
Figura 4. Matriz energética brasileira 2023	7
Figura 5. Consumo de Energia no Brasil e no mundo 2022	8
Figura 6. Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil em 2023, por fonte	8
Figura 7. Participação Setorial do Consumo de Eletricidade no Brasil em 2023	9
Figura 8. Sementes de nabo forrageiro tipo IPR 116	15
Figura 9. Sementes de nabo forrageiro na extrusora, com detalhe do óleo coletado ao centro e a torta, à direita	18
Figura 10. Filtragem do óleo de nabo forrageiro	19
Figura 11. Óleo extravirgem à esquerda, e biodiesel pronto, à direita	19
Figura 12. Termômetro digital	20
Figura 13. Forno com agitador magnético, frasco fechado e barra magnética lisa	20
Figura 14. Processo de transesterificação	21
Figura 15. Balança digital, proveta graduada e álcool metílico	22
Figura 16. Separação de fases entre o biodiesel e o glicerol	22
Figura 17 Lavagem do biodiesel	23
Figura 18. Secagem do biodiesel em estufa	24
Figura 19. Motor-gerador diesel BD-8000 E3	25
Figura 20. Banco de cargas resistivas	25
Figura 21. Circuito elétrico para as cargas resistivas.....	26
Figura 22. Painel elétrico para aquisição, processamento e indicação dos dados	27
Figura 23. Analisador de Gases TM 131 Tecnomotor	28
Figura 24. Diagrama esquemático do sistema utilizado, com motor ciclo diesel/gerador, cargas resistivas e biocombustível	28

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Acionamento das cargas resistivas	26
TABELA 2 – Ensaio e métodos das caracterizações dos óleos	30
TABELA 3 – Características do óleo diesel e do biodiesel de nabo forrageiro	34
TABELA 4 – Valores médios do peso (g), tensão (V), corrente (A), potência (W) e energia (W.h) do diesel e do biodiesel de nabo forrageiro, em função das diferentes cargas	40
TABELA 5 – Valores médios do Oxigênio (%), CO (%), CO ₂ (%), Nox (ppm) e HC (ppm) do diesel e do biodiesel de nabo forrageiro, em função das diferentes cargas	44

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 - Especificação do Biodiesel - Resolução ANP Nº 920 DE 04/04/23	55
ANEXO 2 - Certificado da análise química do biodiesel de nabo	56
ANEXO 3 - Certificado da análise química do óleo diesel S10	57

CARMO, Celino Geraldo do. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro, 2025. **Motor gerador operando com diesel e biodiesel de nabo forrageiro.** Orientador: Dr. Reginaldo Ferreira Santos; Coorientadora: Dra. Luciene Kazue Tokura.

RESUMO

Este estudo visa apresentar o uso potencial do biodiesel de nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L) como combustível em motores diesel. No experimento, foi utilizado um motor gerador diesel de 8,0 kVA, alimentado com cargas resistivas de 1.000 W, 1.500 W, 4.500 W e 6.000 W. Foram avaliados o desempenho e o impacto ambiental, através dos gases emitidos. O experimento foi conduzido no Laboratório de Tecnologias Sustentáveis da Unioeste, Campus de Cascavel – PR. Os tratamentos utilizados foram diesel de origem fóssil, puro, sem adição de biodiesel, e biodiesel de nabo forrageiro puro. O biodiesel apresentou ponto de fulgor mais elevado, menor presença de aromáticos totais e benzeno, maior teor de ésteres, olefinas totais e tolueno, ponto de congelamento maior que o diesel e sem resíduos de água e sedimentos. A energia gerada se manteve crescente e estável conforme o aumento de carga. As análises apresentaram variações no consumo em função das cargas, redução na emissão de CO e NOx, emissão nula de HC e aumento na emissão de CO₂ com a aplicação de cargas maiores. Os resultados encontrados demonstraram que o biodiesel de nabo forrageiro se apresentou como uma solução viável para uso em motores diesel, sem a necessidade de alterações estruturais no motor.

PALAVRAS-CHAVE: Biocombustível, Emissão de gases, Transesterificação, ODS, Energia;

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001"

CARMO, Celino Geraldo do. State University of Western Paraná, February, 2025.
Generator engine operating with diesel and biodiesel from forage radish. Advisor:
Dr. Reginaldo Ferreira Santos; Co-advisor: Dra. Luciene Kazue Tokura.

ABSTRACT

This study aims to present the potential use of biodiesel from forage radish (*Raphanus sativus* L) as fuel in diesel engines. In the experiment, an 8.0 kVA diesel generator engine was used, fed with resistive loads of 1,000 W, 1,500 W, 4,500 W and 6,000 W. Performance and environmental impact were evaluated through the gases emitted. The experiment was conducted at the Laboratory of Sustainable Technologies of Unioeste, Campus of Cascavel - PR. The treatments used were: diesel of fossil origin, pure, without addition of biodiesel, and pure turnip biodiesel. The biodiesel had higher flash point, lower presence of total aromatics and benzene, higher content of esters, total olefins and toluene, higher freezing point than diesel and no water and sediment residues. The generated energy remained increasing and stable as the load increased. The analyses showed variations in consumption as a function of loads, reduction in CO and NOx emission, zero HC emission and increase in CO₂ emission with the application of higher loads. The results showed that forage radish biodiesel presented itself as a viable solution for use in diesel engines, without the need for structural changes in the engine.

KEYWORDS: Biofuel, Gas emissions, Transesterification, SDG, Energy

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001"

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.2. OBJETIVO GERAL	3
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. O BIODIESEL NO BRASIL E NO MUNDO	4
2.2. MATRIZ ENERGÉTICA	6
2.3. CULTURA DO NABO FORRAGEIRO	9
2.4. EXTRAÇÃO E PRODUÇÃO DE ÓLEO DE NABO FORRAGEIRO.....	10
2.5. O BIODIESEL E SUAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	11
2.6. VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL	13
2.7. ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MOTORES DIESEL USANDO BIODIESEL	13
2.8. EMISSÃO DE POLUENTES E PERFORMANCE DE MOTORES USANDO BIODIESEL	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. MATERIAL	15
3.1.1. Local do experimento	15
3.1.2. Equipamentos utilizados	15
3.2. MÉTODOS	17
3.2.1. Extração do Óleo	18
3.2.2. Produção do biodiesel	19
3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	24
3.3.1. Motor Gerador	24
3.4. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	29
3.4.1. Massa Específica a 20°C	31
3.4.2. Ponto de Fulgor	31
3.4.3. Água e Sedimentos % (BSW)	31
3.4.4. Ponto de Congelamento	31
3.4.5. Viscosidade a 40°C	31
3.4.6. Ésteres	32
3.4.7. Aromáticos Totais	32

3.4.8. Olefinas	32
3.4.9. Benzeno	32
3.4.10. Tolueno	32
3.4.11. Glicerol	32
3.4.12. Água por Karl Fisher	32
3.4.13. Análise dos Dados	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. GRANDEZAS FÍSICO-QUÍMICAS	34
4.1.1. Massa específica a 20 °C	34
4.1.2. Ponto de fulgor	35
4.1.3. Água sedimentos % (BSW)	35
4.1.4. Ponto de congelamento	36
4.1.5. Viscosidade a 40°C	36
4.1.6. Ésteres	37
4.1.7. Aromáticos totais	37
4.1.8. Olefinas	38
4.1.9. Benzeno	38
4.1.10. Tolueno.	38
4.1.11. Glicerol	39
4.1.12. Água por Karl Fisher	39
4.1.13. Resultados Obtidos com as Grandezas Físicas	40
4.1.14. Consumo de Combustível	40
4.1.15. Tensão	41
4.1.16. Corrente	42
4.1.17. Potência	43
4.1.18. Energia Disponibilizada	45

4.2. RESULTADOS OBTIDOS COM AS EMISSÕES	44
4.2.1. Monóxido de Carbono (CO)	44
4.2.2. Dióxido de Carbono (CO ₂)	45
4.2.3. Óxidos Nitrosos	46
4.2.4. Hidrocarbonetos	47
5. CONCLUSÕES	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. INTRODUÇÃO

A revolução industrial passou por várias fases, sendo a primeira caracterizada pela introdução de máquinas e equipamentos na produção industrial, quando reinava o uso do carvão mineral e máquinas a vapor. O uso de novas fontes de energia, associadas à eclosão de novas indústrias, representaram o marco da segunda revolução industrial. Desde então, o uso predominante de combustíveis fósseis como fonte de energia dominou o mundo, (Rahbari *et al.*, 2019).

Segundo Silveira (2021), houve significativas mudanças no estilo de vida das pessoas desde então. As inovações tecnológicas colocaram à disposição uma infinidade de eletrodomésticos, meios de transporte e equipamentos, que junto com aumento global da população desencadearam um expressivo aumento no consumo de energia em todo o globo.

Shefali (2022) considera a queima deste tipo de combustível como o principal agente causador da emissão de gases de efeito estufa, com consequências nefastas para o ecossistema, principal preocupação dos ambientalistas atualmente. As reservas destes combustíveis fósseis são finitas, e por terem um ciclo de reposição natural extremamente lento, são vulneráveis a um inevitável esgotamento (Canuto; Mazza; Novara, 2024).

A busca por novos recursos energéticos, mais limpos e sustentáveis, tem impulsionado a pesquisa e o aprimoramento de alternativas para substituir os combustíveis atualmente em uso. Entretanto, estes novos recursos precisam atender a três pilares fundamentais: estarem facilmente disponíveis, serem economicamente viáveis e não serem agressivos ao meio ambiente.

Para Abreu e Bassoto (2021), o biodiesel, obtido a partir de fontes vegetais ou animais, surge como uma promissora opção para redução dos poluentes, por ser um recurso renovável e capaz de substituir, com excelência, os combustíveis que levaram milhões de anos para se formar. Além do impacto ambiental reduzido, o biodiesel é biodegradável, praticamente livre de enxofre e outros compostos químicos, tendo elevado nível de energia e segurança energética, o que lhe permite diminuir a dependência dos recursos não renováveis.

Vários artigos foram publicados nos últimos anos sobre o uso de oleaginosas como matéria prima para a fabricação de biodiesel, como óleo de canola (Silveira, 2021); óleo de cártamo (Gongora, 2021); (Nobre *et al.*, 2023); óleo de gergelim

(Santos, 2023); óleo de soja: Sala, (2020) e Neiva, (2022); óleo de milho (Hyppolito, 2021); óleo de uva (Ferreira, 2022); óleo de amendoim, girassol e de fritura (Tavares, 2022), entre outras. Este trabalho tem como propósito investigar uma matéria prima ainda pouco explorada para a produção de biodiesel, o óleo da semente do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.).

O nabo forrageiro é uma planta de cobertura que apresenta uma série de vantagens sobre outras culturas. Para Hansen *et al.* (2023), ela é rústica, tolerante à seca e à geada, e com grande potencial de cultivo em qualquer clima. Tem floração abundante em grãos e contribui para a estruturação do solo através da formação de matéria orgânica, sendo capaz de reter umidade e protegê-lo contra a erosão e a lixiviação de nutrientes. Tem ainda uma característica peculiar para o plantio, que é apresentar boa isolamento térmica e fornecer massa seca para o sistema de plantio direto.

Segundo Stevanato *et al.* (2020), o nabo forrageiro é um cultivo de baixo custo e com poucas exigências agronômicas, resistente a doenças e pragas e suas sementes têm elevada concentração de óleo, composição adequada em ácidos graxos e outras características físico-químicas, tornando-a excelente matéria-prima para a produção de biodiesel. Ao avaliar o desempenho fitotécnico do nabo forrageiro em cultivo solteiro e consorciado com pinhão-manso, Silva *et al.* (2013) obteve uma produtividade de grãos entre 400 e 600 Kg/ha. O teor de óleo encontrado foi de 32,64% do peso das sementes.

Para Hansen *et al.* (2023), sua fitomassa é capaz de se decompor rapidamente, o que lhe confere capacidade de reciclar nutrientes como o nitrogênio e o fósforo, fornecendo-os aos próximos cultivos. Esta característica o elege como poderosa fonte de adubo para a rotação de culturas. Seu florescimento é muito rápido, apresentando 70% de cobertura 60 dias após o plantio. O nabo forrageiro compete com as ervas daninhas, promovendo forte ação supressora contra plantas indesejadas, doenças, pragas e nematoides. Segundo Saboia (2024), devido ao seu sistema radicular robusto, o nabo forrageiro é capaz de produzir bioporos no solo durante sua decomposição, o que lhe confere imensa capacidade de descompactação.

Esta pesquisa se baseia na necessidade de encontrar fontes alternativas de energia, limpa e sustentável, com propriedades físicas e químicas similares aos combustíveis de origem fóssil. A hipótese do trabalho é verificar a viabilidade do uso

de biodiesel de nabo forrageiro como combustível em motores diesel, buscando identificar possíveis implicações no desempenho deste motor (variáveis elétricas e eficiência) e na poluição atmosférica (gases emitidos durante a queima).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Analisar o potencial de uso do biodiesel de origem vegetal, produzido a partir do óleo das sementes de nabo forrageiro e as implicações na performance do motor gerador diesel e na poluição do ar.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o consumo de combustível do motor gerador e a energia disponibilizada;
- Avaliar as propriedades físico-químicas do biodiesel de nabo;
- Avaliar as emissões de gases do diesel puro e do biodiesel de nabo forrageiro (monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos nitrosos e hidrocarbonetos);

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O BIODIESEL NO BRASIL E NO MUNDO

Segundo Souza (2019), Rudolf Diesel e Henry Ford foram os primeiros no mundo a realizar experimentos usando óleos de origem vegetal (amendoim) para alimentar motores diesel. Ao notarem o grande potencial que esta descoberta traria, apresentaram os resultados na Feira Mundial de Paris, em 1900. Os motores daquela época já conseguiam funcionar tanto com diesel quanto com biodiesel, porém o petróleo era abundante e de baixo custo, tornando-se a opção mais viável, o que provocou uma lacuna no avanço das pesquisas com combustíveis renováveis. O marco inicial havia sido dado para potenciais pesquisas futuras e, desde então, diversos biocombustíveis têm sido experimentados em motores, produzidos a partir de matéria orgânica.

Em 1903 já se debatia o uso de derivados de biomassa renovável para funções energéticas no Brasil, e com o incentivo do Instituto Nacional de Tecnologia, em 1920, foi dada a largada na trajetória do biodiesel no país. Segundo Souza (2019), Uma crise energética de âmbito internacional no final dos anos 1970 deu origem à criação do PROOLEO - Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos.

Em 1983 foi implantado o Programa de Óleos Vegetais (Projeto OVEG) para testar a utilização do biodiesel com diferentes misturas ao diesel de origem mineral.

Em 2002 foi criado o PROBIODIESEL (Portaria MCT nº 702), escolhendo a etanolise de óleos de origem vegetal como a rota principal para um plano nacional de substituição do diesel de origem mineral, porém descontinuado pouco depois por não priorizar a agricultura familiar.

Em julho de 2003 foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), objetivando adicionar biodiesel no conjunto de fontes de energia utilizadas no Brasil, sendo implantado efetivamente em dezembro de 2004.

Em 2004, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2024) determinou a nível nacional, e de forma experimental, o percentual de biodiesel em volume (2%), a ser adicionado ao óleo diesel.

Em 2005, a Lei 11.097/2005 dispôs sobre a introdução do combustível biodegradável na matriz energética do Brasil e em 2008, passa a ser obrigatória a mistura de 2% em todo o país, sendo sucessivamente ampliada pelo Conselho Nacional de Políticas Energéticas (CNPE) até atingir o percentual de 14%, em março

de 2024. A Figura 1 apresenta a evolução da mistura obrigatória do biodiesel no diesel proposta pela ANP, onde a letra **B** representa o **Biodiesel**, e o **número** subsequente, a **proporção** obrigatória.



Figura 1. Regulação sobre a mistura obrigatória do biodiesel no diesel.

Fonte: Mercado em Foco (2024).

O Projeto de PL 528/2020, ainda em tramitação, estabelece maior participação de recursos renováveis na mistura dos combustíveis fósseis, propondo um acréscimo de 1 ponto percentual na mistura de biodiesel ao diesel até atingir 20%, em março de 2030.

O Brasil tem reunido esforços para atingir as metas do ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), documento criado pela ONU (2022), que contém 17 metas globais focadas na erradicação da pobreza, na proteção do ambiente e do clima, além de assegurar que todos possam desfrutar de paz e prosperidade, onde quer que estejam. São metas desafiadoras, principalmente a de número 7, que trata dos sistemas de produção de energia, que exclui qualquer tipo de poluição que possa resultar em mudanças climáticas, garantindo o acesso a fontes confiáveis e atualizadas de energia a todos, e que busquem equilíbrio entre a disponibilidade dos recursos e a sua exploração (Silveira, 2021).

Os biocombustíveis têm se destacado entre as fontes disponíveis para geração de energia por terem origem a partir de biomassa renovável, seus gases poluentes têm ciclo de vida de curta duração, não produzem resíduos tóxicos e podem ser biodegradados (Malode, 2020).

Para Souza (2019), o Brasil é considerado um dos maiores consumidores de biocombustíveis do mundo, sendo o biodiesel e o etanol os mais utilizados, assegurando ao país o uso de uma grande ferramenta para alcançar parte dos objetivos definidos pela ONU (2022). Segundo Santos (2023), a soja representa a

maior parte do fornecimento de matéria-prima para a fabricação de biodiesel, seguido pela gordura bovina, óleo residual e óleo de algodão.

O uso de fontes renováveis para geração de energia possibilita a perpetuação de um ciclo biogeoquímico, denominado ciclo do carbono (Figura 2). O gás carbônico lançado na atmosfera é produzido a partir da respiração, da combustão e da decomposição de matérias orgânicas. As plantas, por sua vez, absorvem o dióxido de carbono do ar e realizam a fotossíntese na presença de luz solar e água, produzindo grãos que irão conter óleo para sobrevivência da semente e perpetuação da espécie. Após extração e processamento, este óleo poderá ser convertido novamente em energia, liberando nova carga de CO₂ para a atmosfera, completando o ciclo (Santos, 2018).

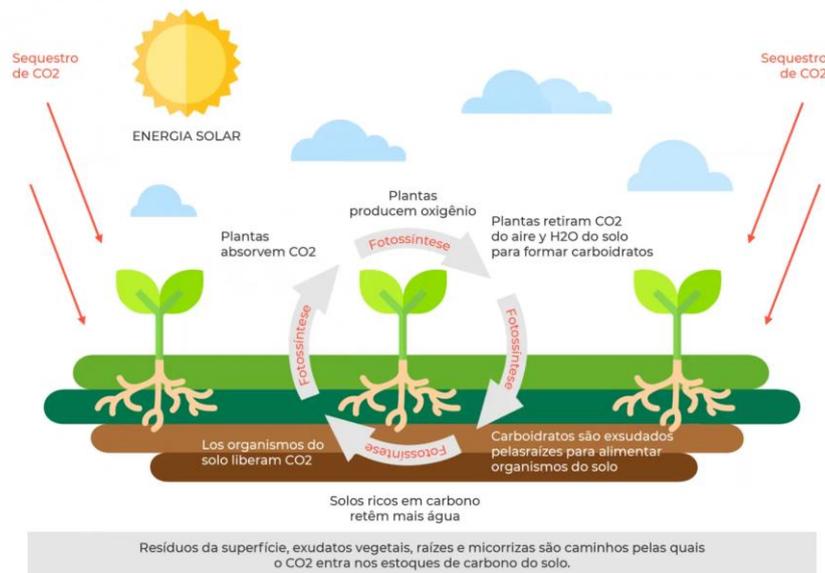


Figura 2. Ciclo do carbono.

Fonte: Adecoagro (2022).

2.2. MATRIZ ENERGÉTICA

A matriz energética de um país é representada pelo conjunto de fontes utilizadas para suprir suas necessidades energéticas. As maiores demandas globais por energia se concentram em fontes não renováveis (Figura 3), onde o petróleo e seus derivados ocupam o primeiro lugar, seguido pelo mineral e o gás natural (EPE, 2024). “Outros” representa o grupo das fontes renováveis solar, eólica e geotérmica, que somados à participação da energia hidráulica e da biomassa, representam cerca de 14% da matriz energética mundial.

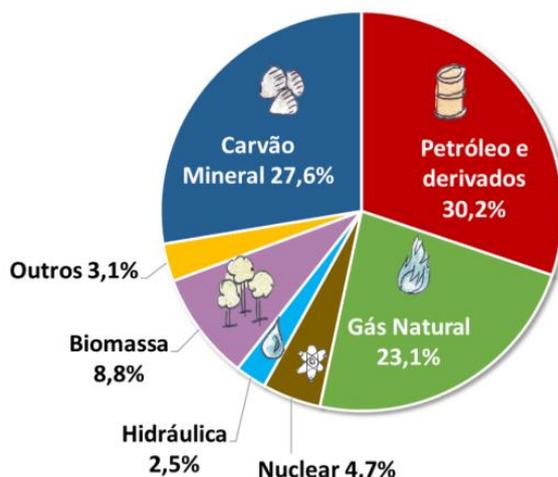


Figura 3 - Matriz Energética Mundial 2022.

Fonte: IEA (2023) - total em 2022: 622 milhões de TJ - terajoule.

Outros – energia solar, eólica e geotérmica

Fontes não renováveis - carvão, petróleo e gás natural

Biomassa – lenha, bagaço de cana-de-açúcar, cavaco de madeira, palha de cereais, cascas de arroz, restos de colheita, ramos, folhas, plantas cultivadas para a produção de biomassa como milho, sorgo, capim-elefante e salgueiro energético

A matriz energética brasileira tem uma assinatura muito peculiar, bem diferente do conjunto das fontes de energia utilizadas no mundo, onde predomina o uso de fontes alternativas de energia limpa. A soma das fontes renováveis totaliza 49,1%, quase a metade da matriz energética brasileira. A Figura 4 apresenta a composição dessa matriz, sendo as fontes renováveis caracterizadas pelo uso de lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, eólica, solar, eólica e geotérmica

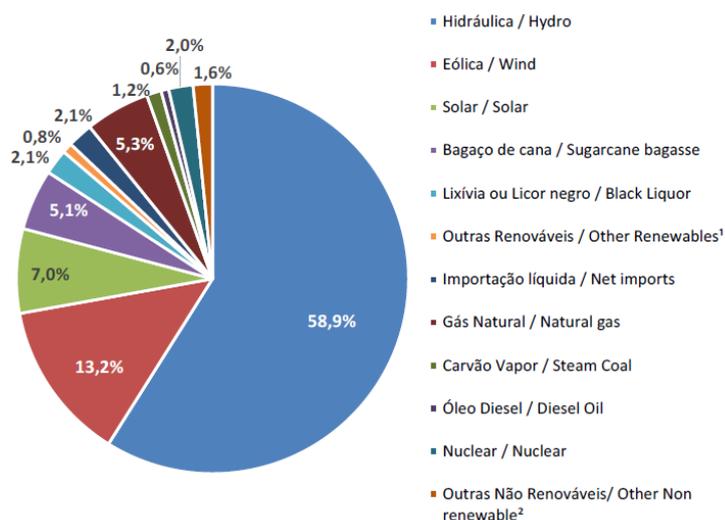


Figura 4 - Matriz Energética Brasileira 2023.

Fonte: BEN, 2024 (total de 314 milhões de tep).

Segundo a EPE (2024), os maiores vilões da matriz energética mundial em 2022 foram: carvão mineral, gás natural e petróleo e seus derivados, totalizando pouco mais de 85%, enquanto no Brasil, não passaram de 52% (Figura 5). As renováveis no mundo não chegaram a 15%, contra mais de 47% no Brasil. Tendo uma matriz energética mais renovável que a mundial, o Brasil possui uma posição privilegiada no uso de fontes renováveis, já que estas têm menor custo operacional e, em geral, emitem bem menos gases de estufa (GEE).

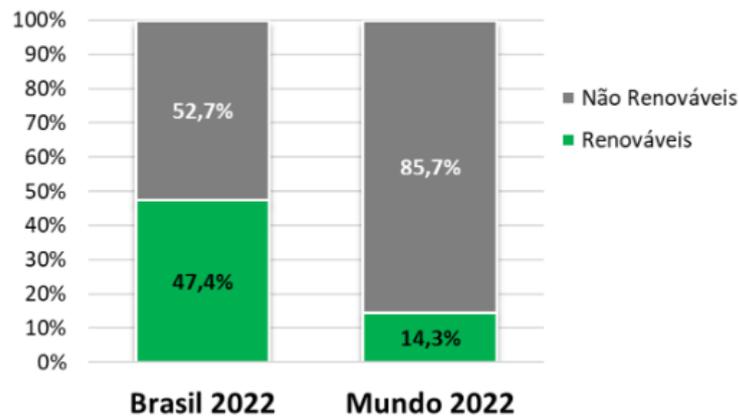


Figura 5 – Consumo de Energia no Brasil e no mundo 2022.

Fonte: EPE (2024).

A Figura 6 apresenta a oferta interna de energia elétrica no Brasil por fonte, em 2023, com destaque para a fonte hidráulica (58,9%), seguida pela eólica (13,2%) e pela solar (7%).

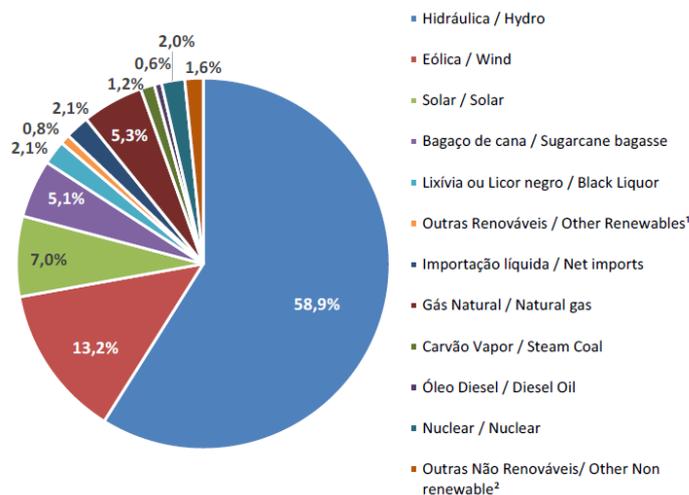


Figura 6 - Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil em 2023, por fonte.

Fonte: EPE (2024 – Ano Base 2023).

Notas:

1. Inclui Lenha, Biodiesel e Outras Renováveis
2. Inclui Óleo Combustível, Gás de Coqueria, Outras Secundárias e Outras Não-Renováveis

A Figura 7 apresenta a distribuição do consumo de eletricidade, por setor, no Brasil. Como pode ser observado, os três maiores consumidores são representados pelo setor industrial (36,4%), seguido pelo residencial (27,5%) e pelo comércio (16,9%).

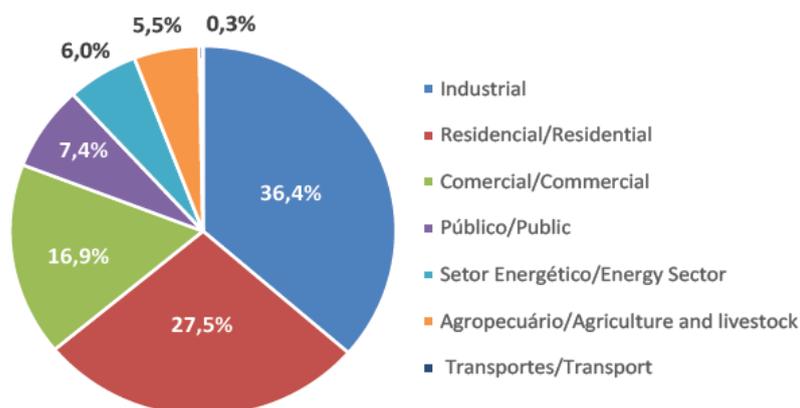


Figura 7 - Participação Setorial do Consumo de Eletricidade no Brasil em 2023.
Fonte: EPE (2024 – Ano Base 2023)

Segundo a EPE (2024), o Brasil tem crescido no uso das energias renováveis solar, eólica e biomassa, e o consumo de petróleo diminuiu nas últimas décadas. Contudo, houve aumento no consumo de gás natural. Quando comparada a outros países, a matriz energética nacional é bastante renovável, contudo, ainda é muito dependente da hidrelétrica, precisando de uma maior diversificação.

2.3. CULTURA DO NABO FORRAGEIRO

O nabo forrageiro, planta oleaginosa pertencente à família *Brassicaceae*, é uma cultura que foi introduzida no Brasil na década de 80, objetivando promover a cobertura do solo. Desde então, passou a ser amplamente utilizada como uma espécie de adubo verde, pois tem crescimento vertiginoso, fornece massa seca (palha) para o Sistema de Plantio Direto (SPD), é capaz de reciclar vários nutrientes como o nitrogênio e fósforo, além de ter um sistema radicular muito robusto, com imensa capacidade de descompactação do solo, sendo considerado um subsolador natural. Sua floração é abundante, com grande rendimento de grãos (Hansen *et al.*, 2023).

Adubação verde compreende a utilização de medidas que possibilitem a melhoria das condições químicas, físicas e biológicas do solo. Geralmente é utilizada em leguminosas por terem um sistema radicular profundo, elevada capacidade de

aproveitamento do nitrogênio do ar e de produção de biomassa, além de menor relação Carbono/Nitrogênio. Contudo, pode ser usada em outras famílias (Matheis, 2020).

Filho (2023) reforça a importância de se usar espécies vegetais conhecidas como adubos verdes, por terem características capazes de melhorar o ambiente de produção.

Segundo Stevanato *et al.* (2020), o cultivo do nabo forrageiro pode ser feito em climas temperados, continentais e tropicais, sendo tolerante a temperaturas baixas e bastante resistente a geadas. É muito empregado no Brasil nas regiões sul, centro-oeste e estado de São Paulo como composto para rotação de culturas (adubação de inverno). É uma planta que não exige muitos custos de plantio, é bastante resiliente a pragas e pouco afetada por doenças, e são baixos os cuidados para a sua sobrevivência (necessidade de água, sais minerais, ar, luz e calor).

Os óleos vegetais se destacam dentre as fontes disponíveis para a geração de energias renováveis por apresentarem propriedades físico-químicas adequadas e por terem um forte apelo à agricultura familiar, oferecendo alternativas para problemas econômicos e ambientais.

2.4. EXTRAÇÃO E PRODUÇÃO DE ÓLEO DE NABO FORRAGEIRO

Existem duas tecnologias para a fabricação de óleos derivados de plantas: a extração por meio mecânico, utilizando prensas hidráulicas, e a extração com substâncias solventes de origem orgânica, que apresenta ótimo rendimento, mas baixa qualidade. Já os óleos obtidos por prensagem têm qualidade bem superior.

O uso da tecnologia de prensagem mecânica para a extração do óleo de oleaginosas é um processo muito utilizado em pequena escala, geralmente para atender pequenas demandas. Para otimizar a produtividade do óleo, geralmente as prensas têm um sistema de aquecimento interno, e o material que sobra depois da prensagem é chamado de torta. A torta do nabo forrageiro é um subproduto não comestível pois contém altos níveis de ácido erúxico. Entretanto, ela é muito nutritiva por apresentar elevada concentração de fibras e proteína, podendo ser diluída e usada como complemento na alimentação animal, desde que respeitadas as regras de diluição (Beran, 2024). Para o pequeno produtor, o uso da torta pode gerar renda ou economia no uso da ração. Segundo Silvestre (2016), a incorporação da torta de nabo forrageiro ao solo disponibiliza micro e macronutrientes (Ca, Mg, K, P, S, Cu, Zn, etc)

que poderão ser absorvidos pelas plantas.

Para Ávila e Sodré (2012), o biodiesel de nabo forrageiro atende às especificações nacionais e internacionais quanto às propriedades físico-químicas, exceto pelo teor de acidez, cujos valores estão acima do especificado (segundo a ANP, o teor máximo de acidez para o óleo diesel é de 0,5 mg KOH/g, conforme a Resolução ANP nº 920/2023, e o valor encontrado foi de 1,15 mg KOH/g, usando o método ASTM D664).

Segundo Cardoso (2020), o biodiesel é um combustível não tóxico, proveniente de recursos que podem ser naturalmente repostos e com grande facilidade de decomposição.

2.5. O BIODIESEL E SUAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Cardoso (2020) e Ayoola *et al.*, (2021) relatam que o biodiesel apresenta características físico-químicas muito parecidas com as do diesel de origem mineral, apresentando ainda uma série de vantagens: é menos volátil à temperatura ambiente e tem ignição a temperaturas mais elevadas, o que lhe assegura maior segurança durante o manuseio, armazenamento e transporte; tem maior capacidade de lubrificação, aumentando a vida útil das partes móveis do motor; é menos poluente pois emite menos fumaça, material particulado e monóxido de carbono durante a queima; tem menor percentual de cetano, melhorando a combustão, e não contém quase nada de enxofre em sua estrutura molecular. Este valor é tão desprezível que alguns autores chegam a mencionar como 0% o teor de enxofre no biodiesel, como o próprio Cardoso (2020) e Ayoola *et al.*, (2021).

A viscosidade de um fluido representa a sua resistência ao fluxo. O biodiesel é mais viscoso que o diesel pois suas gotículas são maiores. Esta característica afeta negativamente a combustão, podendo levar a falhas na dispersão das partículas e obstruções de filtros, comprometendo a circulação do combustível durante o funcionamento do motor, provocando uma queima incompleta e maior deposição de carbono na cabeça do pistão (Nayak, 2014). Para Bari (2014), por ser menos volátil, as misturas do biodiesel vão evaporar mais lentamente, dificultando a sua queima e reduzindo a eficiência e torque do motor.

Por ser menos volátil, o biodiesel precisa de temperaturas maiores para entrar em combustão espontânea, apresentando assim menor quantidade de energia para

um mesmo volume de óleo. Uma solução para mitigar esses problemas seria utilizar uma combinação de misturas de diesel com biodiesel. Entretanto, cada oleaginosa é ímpar, podendo apresentar características muito singulares como variação no percentual de ácidos graxos e composições moleculares peculiares, o que abre perspectivas para exploração de novos experimentos com sementes que ainda não esgotaram toda as possibilidades de testes, como o nabo forrageiro.

Com base na matéria prima utilizada, a produção do biodiesel pode ser dividida em três categorias:

- Primeira geração: uso de culturas oleaginosas comestíveis e de resíduos biodegradáveis;
- Segunda geração: uso de culturas não comestíveis, resíduos de culturas comestíveis e culturas específicas;
- Terceira geração: uso de culturas energéticas notadamente projetadas, como as algas;

Segundo Ayoola *et al.* (2021), existem três métodos para produção de biodiesel:

- Pirólise ou craqueamento – quebra das moléculas de triglicerídeos em moléculas menores, expostas a temperaturas elevadas e com uso de um catalisador. É uma tecnologia pouco utilizada por ser cara e poluente;
- Microalgas – utiliza o óleo obtido da biomassa de algas. Tem alto custo e baixo rendimento;
- Transesterificação – reação de triglicerídeos com álcool de cadeia curta usando um catalisador;

Dos três, a transesterificação é o mais utilizado devido à sua baixa complexidade de execução. Neste processo, um mol de triacilglicerol reage com três mols de álcool (metílico ou etílico) diante de um catalisador, produzindo 3 mols de monoéster (metílico ou etílico) e um mol de glicerol. Como catalisadores, podem ser usados tanto o NaOH quanto o KOH, sendo o NaOH o mais usado. No Brasil, a transesterificação é o processo mais usado pois reduz tanto a viscosidade como a densidade e o ponto de fulgor do combustível (Souza, 2019).

2.6. VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Para Cardoso et al. (2020), os principais fatores que podem afetar a reação química durante a produção de biodiesel por transesterificação são: razão molar, tempo e temperatura, ácidos graxos livres de água, tipo de catalisador, velocidade de agitação e catálise química.

A razão molar tem interferência direta no rendimento dos ésteres de ácidos graxos, produzindo três mols de ésteres alquílicos de ácidos graxos e um mol de glicerina. A temperatura não atua como catalisador, apenas aumenta a energia do meio reacional. O teor de ácidos graxos livres precisa ser menor que 3% para uma catálise completa. Com relação aos catalisadores, os básicos têm apresentado resultados mais eficazes para a catálise ácida, sendo os alcoóxidos os melhores. A velocidade de agitação é fundamental para o processo pois os óleos de origem vegetal ou animal não se misturam com o metanol, sendo necessário vigorosa agitação para que a movimentação de massa entre os reagentes ocorra. Nas reações químicas, o catalisador tem como objetivo aumentar a velocidade da reação ao reduzir a energia de ativação.

2.7. ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MOTORES DIESEL USANDO BIODIESEL

Para Silveira (2021) os motores diesel são mais adequados para geração de energia por serem mais eficientes, baratos e de fácil manutenção. Entretanto, são muito poluentes durante o funcionamento, com emissões de gases que agravam o efeito estufa.

Estabelecer o efeito do biodiesel nos gases emitidos pelos motores não é tarefa simples, pois existem diversos fatores que podem afetá-lo, como a matéria prima usada na fabricação do biodiesel, o processo de refino e até mesmo as características construtivas do motor. Estudos têm demonstrado que misturas de biodiesel e diesel podem reduzir as emissões de CO, HC e material particulado, porém comprometendo a eficiência energética e as emissões de NOx (Gomes; Falco; Severino, 2024).

2.8. EMISSÃO DE POLUENTES E PERFORMANCE DE MOTORES DIESEL USANDO BIODIESEL

Segundo Gomes e Falco (2024), a queima de biodiesel em motores diesel reduz a emissão de material particulado. Por outro lado, as emissões de NOx têm seu valor aumentado. A estabilidade oxidativa dos biocombustíveis deve ser considerada pois afeta a eficiência de combustão, tornando este tipo de combustível mais suscetível à oxidação e comprometer a vida útil dos motores.

Os motores a diesel são muito eficientes, porém, altamente impactantes ao meio ambiente, sendo uma grande preocupação na emissão de gases poluentes. Silveira (2021) aponta dois possíveis caminhos para mitigar estas emissões: aperfeiçoar a eficiência da queima no motor e criar mecanismos de pós-tratamento.

Para Attia e Hassaneen (2016), a translucidez da fumaça é uma evidência da presença de materiais fuliginosos e partículas suspensas. Esta opacidade pode ser reduzida misturando diesel com biodiesel. Segundo Silveira (2021), aumentar o número de moléculas de oxigênio no biodiesel irá favorecer a redução da opacidade da fumaça e melhorar a combustão, o que pode ser feito simplesmente misturando o biodiesel ao óleo diesel.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. MATERIAL

3.1.1. Local do Experimento

O experimento foi realizado no Laboratório de Tecnologias Sustentáveis (LABTES), localizado na Unioeste - campus de Cascavel, latitude 24°59'18.1"S, longitude 53°26'55.4"O e altitude de 790m. Foram usadas sementes de nabo forrageiro tipo IPR 116 (Figura 8), fornecidas pelo Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IAPAR-EMATER), para obtenção do óleo a ser transformado em biodiesel. O óleo diesel utilizado (AS-10) foi doado pela empresa “Estrada Distribuidora de Derivados do Petróleo Ltda”, situada na BR 277, km 579, na cidade de Cascavel, PR. Este diesel é puro, sem a mistura obrigatória de biodiesel em sua composição.



Figura 8 - Sementes de nabo forrageiro tipo IPR 116.

Fonte: O autor (2023)

3.1.2. Equipamentos Utilizados

Prensa extrusora, para extração do óleo das sementes. Especificações técnicas: fabricante EUROLUME, modelo YJ-220, dimensões 47,5 x 23 x 25 cm, alimentação 220 VCA, aplicação semiprofissional, cor prata, composição aço inox, peso 10kg.

Balança digital, para pesagem dos insumos utilizados (óleo de nabo forrageiro, torta de nabo forrageiro, catalisador). Especificações técnicas: fabricante SHIMADZU, modelo BL3200N; capacidade 3200 g, resolução mínima 0,01 g, dimensões aproximadas (mm) L159 x P126.

Termômetro digital, para monitoração da temperatura do processo. Especificações

técnicas: fabricante DAHORA, modelo TP101, cor preto, material aço inox e plástico ABS, faixa de medição -50°C a 300°C , resolução $0,1^{\circ}\text{C}$, dimensões 22.5 cm x 2 cm x 4 cm, peso 75 g, tamanho da haste 15cm, funções ligar/desligar, Centígrados/Fahrenheit e Hold (fixa a última medição), desligamento automático para economia de energia.

Agitador magnético digital com aquecimento, para aquecer e agitar as moléculas, procedimentos necessários ao processo de transesterificação. Especificações técnicas: fabricante SPLABOR, modelo 33Ga-10L, material aço inox, capacidade 10 litros, velocidade 250 a 1600 rpm, temperatura $+5^{\circ}\text{C}$ a 300°C .

Barra magnética cilíndrica lisa, para promover a agitação das moléculas no interior do frasco reagente. Especificações técnicas: fabricante LumiLabor, revestimento em teflon, temperatura de trabalho -50°C a 120°C , dimensões 55 x 11 mm.

Painel de aquisição de dados (PLC), para efetuar o registro dos dados fornecidos pelos equipamentos, máquinas, sensores e sistemas de aquisição durante o processo. Especificações técnicas: processador 400 MHz, memória RAM 64 MB, alimentação 24VCC, interfaces de comunicação (RS485, RS232, CAN, Ethernet e USB), sistema operacional Windows CE, software de programação CLP CODESYS2, unidade terminal remota de entradas e saídas (RTU), um medidor multifuncional de parâmetros elétricos, um indicador de pesagem com célula de carga e alguns protocolos de redes industriais.

Medidor de energia inteligente, para registrar os parâmetros elétricos, apresentando valores instantâneos em seu display e/ou enviando os dados (tensão, corrente, demanda e energia) via protocolo Modbus-RS485 para o PLC processar e fazer os cálculos necessários. Especificações técnicas: fabricante Delta, modelo DPM-C520, faixa de tensão 100/240Vca, trifásico, frequência 50/60Hz, medição de parâmetros de energia e eletricidade bidirecional de alta precisão classe 0,5S, em conformidade com os critérios IEC 62053, tempo de leitura (35 parâmetros) MODBUS (usando agrupamento de parâmetros) 0,18 s. O medidor está localizado na parte frontal do gabinete do PLC.

Motor gerador diesel, para execução experimental do uso de biodiesel de nabo forrageiro em um motor diesel. Especificações técnicas: fabricante BRANCO, modelo BD-8000E3, monocilíndrico, arrefecimento a ar, sistema de combustão por injeção direta, diâmetro x curso 88 mm x 75 mm, cilindrada 456 cm^3 , taxa de compressão

20:1, acionado por um motor de 13 cv e acoplado a um gerador, com potência máxima de 8,0kVA a 3600 rpm e potência contínua de 7,5kWA a 3600mrpm, tensão de trabalho 110/220 VCA, saída trifásica com controle de tensão, capacidade do tanque 10 litros, consumo 2,7 l/h, autonomia 5,0 h, dimensões 720 x 492 x 650 mm, peso 110 kg, nível de ruído (7 m) 79 dB.

Analizador de gases, para monitorar a emissão de CO (%), CO₂ (%), NO_x (ppm) e HC (ppm), através de uma sonda introduzida no escapamento do motor. Especificações técnicas: fabricante TECNOMOTOR, modelo TM 131, alimentação 127/220VCA (automática), frequência de entrada 50 a 60 Hz, potência 35W, temperatura de armazenamento 0 a 50°C, leitura e comandos no painel, impressora acoplada, dimensões 290 x 200 x 420 mm, peso 10 Kg.

Banco de resistências, para simular a demanda de energia consumida no experimento. Especificações técnicas: constituído por quinze resistências em formato de "U", conectadas em paralelo, com potência nominal de 1.000 W cada, operando com tensão de alimentação de 220VCA, em corrente alternada.

Câmara de Secagem (estufa), utilizada para secagem do biodiesel. Especificações técnicas: fabricante NOVA ÉTICA ETHIC, modelo 400 / 7D – 300, alimentação 220 V 60 Hz, potência 3750 W, capacidade 340 l, dimensões externas 1120 x 770 x 1545 mm, dimensões internas 800 x 600 x 700 mm.

Célula de carga, usada para registrar a massa de combustível consumida durante o experimento. Especificações técnicas: fabricante ALFA S.A., modelo SV 50, material alumínio, esforços TRAÇÃO, sensibilidade 2,000 mV/V, temperatura de trabalho -5°C a 60°C, número de divisões 5.000, classe de proteção (interferência) IP67

Vidrarias, para medição e manipulação das misturas durante o processo. Balão de fundo chato, para promover a mistura do álcool metílico com o catalisador (KOH); béquer, para filtragem e secagem do óleo; proveta graduada, para medição do volume de óleo e de álcool metílico utilizados; funil de decantação, para a separação de fases no processo de transesterificação e para separação do biodiesel produzido e da água utilizada para lavagem; frasco reagente com tampa, para processar a reação de transesterificação.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Extração do Óleo

O processo de extração utilizado foi por prensagem a frio. As sementes de nabo forrageiro foram colocadas na entrada da extrusora que, ao ser energizada, fazia girar um eixo rotativo que as comprimia no compartimento de grãos, esmagando-as e liberando o óleo bruto em seu interior. Este processo deu origem a dois subprodutos: o óleo bruto propriamente dito e a biomassa, doravante denominada torta de nabo forrageiro (Figura 9).



Figura 9 - Sementes de nabo forrageiro na extrusora, com detalhe do óleo coletado ao centro e a torta, à direita.

Fonte: o autor (2023).

Foram utilizados 23 Kg de sementes de nabo forrageiro, obtendo 5,18 litros de óleo após a extrusão dos grãos. Os dados registrados durante a extração do óleo foram:

- Temperatura ambiente = 19°C
- Umidade relativa do ar = 54%
- Tempo médio para extração de 1Kg de sementes = 17'07"36
- Para cada **1.000g** de sementes processadas:
 - ✓ Óleo obtido (valor médio) = 225,15g (ou 249ml)
 - ✓ Borra na peneira (valor médio) = 3,73g
 - ✓ Torta (valor médio) = 758,52g
 - ✓ Resíduos no eixo da extrusora (valor médio) = 12,60g
 - ✓ **Total** (225,15g + 3,73g + 758,52g + 12,60g) = **1.000g**
- Eficiência (valor médio) = 22,515 % de óleo / Kg de sementes

Por conter impurezas e partículas sólidas, o óleo produzido foi submetido a uma dupla filtração, colocando simultaneamente 2 filtros de papel Melitta nº 3, com

microfuros e dupla costura, em um suporte de metal. Para cada filtração, era vertido sobre o conjunto cerca de 1 litro de óleo (Figura 10), com tempo médio de filtração de 24 horas para ser concluído. Este tempo prolongado era justificado pela elevada viscosidade do óleo, agravado pelo grande percentual de borra dissolvida.



Figura 10 – Filtração do óleo de nabo forrageiro.
Fonte: o autor.

A Figura 11 apresenta o óleo de nabo forrageiro extravirgem extraído, já filtrado, e o biodiesel já pronto, cujo processo de produção será descrito a seguir.



Figura 11 – Óleo extravirgem à esquerda, e biodiesel pronto, à direita.
Fonte: o autor (2023).

3.2.2. Produção do Biodiesel

Para a produção do biodiesel, foram utilizados metanol (CH_3OH , pureza 99,8%), hidróxido de potássio como catalisador (KOH , qualidade analítica), óleo de nabo forrageiro, água destilada e fenolftaleína a 1%.

Conforme descrito por Carvalho (2011), a metodologia utilizada para a produção do biodiesel foi a transesterificação por rota metílica, onde um mol de

triacilglicerol reage com três mols de álcool de cadeia curta (metanol) na presença de um catalisador (hidróxido de potássio). As proporções utilizadas foram: metanol (30% da massa do óleo), hidróxido de potássio (2% da massa de óleo) e óleo de nabo forrageiro (representando 100% da massa de óleo).

No início do experimento, foi preparada uma solução com pequenas proporções dos insumos para certificar se a fórmula era funcional. Foi preparada uma solução contendo o catalisador (10ml) dissolvido em metanol (150ml), sendo observada uma reação exotérmica logo após a mistura. Enquanto isso, o óleo de nabo forrageiro (500 ml) foi inserido em um frasco e colocado sobre o aquecedor com agitação magnética, com temperatura inicial de 24,3°C até atingir a temperatura de 65°C (temperatura de processo), monitorada continuamente por um termômetro de precisão e mantida assim durante todo o processo (Figura 12).



Figura 12 - Termômetro digital.

Fonte: o autor (2023).

O aquecedor, além de manter a temperatura, induziu um movimento rotativo na barra metálica imersa no óleo, cuja rotação podia ser controlada externamente através de um controle específico no equipamento (Figura 13). A rotação selecionada foi aquela que permitiu a máxima turbulência possível no interior do frasco, sem que esta comprometesse o giro da barra.



Figura 13 - Forno com agitador magnético, frasco fechado e barra metálica lisa.

Fonte: o autor (2023).

Uma vez estabilizada a temperatura em 65°C e a total dissolução do catalisador no álcool, a mistura foi incorporada ao óleo, sendo observado uma queda na temperatura da solução, que caiu para cerca de 60°C. Neste momento, foi dado início à contagem de tempo para o processo de transesterificação, que foi estipulado em 4 horas.

Decorridos cerca de 3 minutos, foi observado que a solução começou a se tornar turva, ficando totalmente turva depois de 7 minutos aproximadamente. A temperatura voltou a se estabilizar em 65°C cerca de 30 minutos após o instante da mistura álcool + catalisador + óleo.

O frasco foi mantido fechado durante todo o tempo pois esta contenção evitaria a perda de álcool por evaporação e a oxidação do óleo, não o deixando exposto ao ar, propiciando assim a máxima conversão possível das moléculas de óleo em biodiesel. O processo de transesterificação pode ser visto na Figura 14.

A temperatura elevada e a agitação das moléculas do óleo reduziram o tempo necessário para a reação, sendo que o controle em 65°C minimizou a oxidação do biodiesel, face à exposição prolongada ao calor.



Figura 14 – Processo de transesterificação.

Fonte: o autor (2023).

Uma balança de precisão e uma proveta graduada foram usados para medição dos insumos utilizados no processo (Figura 15).



Figura 15 – Balança digital, proveta graduada e álcool metílico.

Fonte: o autor (2023).

Aproximadamente 60 minutos depois de iniciada a reação, a mistura começou a se tornar mais límpida, sinalizando que grande parte da reação de transesterificação já estava concluída. No entanto, foi aguardado um tempo maior, 4 horas no total, para assegurar que a maior parte das moléculas do óleo pudesse ter sido efetivamente convertida em biodiesel.

Findo o prazo, a mistura foi transferida para um funil de decantação para separação de fases, que ocorreu em pouco menos de 5 minutos. No entanto, foi aguardado um tempo maior (4 horas), para assegurar a máxima eficiência na decantação. O biodiesel, menos denso, se concentrou na fase superior, e o glicerol mais impurezas, na fase inferior (Figura 16).



Figura 16 – Separação de fases entre o biodiesel e o glicerol.

Fonte: o autor (2023).

Decorridas as 4 horas, o glicerol foi descartado e o biodiesel lavado com água destilada (com o mesmo volume utilizado para o álcool) em suave agitação, para evitar

a formação de espuma, durante um minuto. Ao ser colocado em repouso, pôde ser observado, logo após o primeiro minuto, a formação dos primeiros traços da decantação dentro do funil. Por terem maior densidade relativa, a água e os resíduos da soda que sobraram da reação começaram a se depositar no fundo, e o biodiesel, menos denso, no topo. Dois minutos após, a separação das fases já estava bem delineada e, decorrido mais um minuto, as fases já podiam ser perfeitamente observadas. Por segurança, a mistura foi mantida em decantação por um período de 3 horas.

Findo o prazo, a água foi descartada e o processo refeito por mais duas vezes, com nova porção de água limpa. Após a terceira lavagem, a água descartada foi testada para detecção de possíveis traços de catalisador, pingando sobre ela 4 ou 5 gotas do evidenciador de pH (fenolftaleína a 1%). Caso a água ficasse rosada, o biodiesel precisava ser novamente lavado, até ser considerado totalmente isento do hidróxido de potássio (Figura 17). Esta medida tinha por finalidade evitar que uma eventual contaminação do biodiesel por catalisador pudesse corroer futuramente os internos do motor, durante o seu funcionamento.

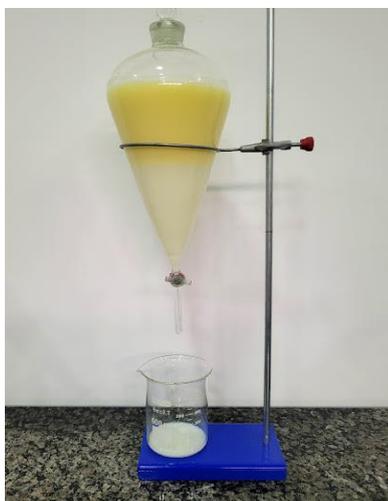


Figura 17 – Lavagem do biodiesel.

Fonte: o autor (2023).

A etapa final da produção do biodiesel consistiu em remover a água residual, colocando o biodiesel em um becker na estufa, a 85°C, por 24 horas (Figura 18). Essa temperatura não poderia exceder os 85°C para evitar que o biodiesel sofresse alteração nos seus parâmetros químicos por oxidação. O biodiesel não chegou a ser pesado antes e depois de passar pela estufa, para avaliar a eficácia do processo.

Uma vez comprovada a eficácia no método de conversão do diesel em biodiesel, ele foi replicado, com sucesso, em proporções maiores.



Figura 18 – Secagem do biodiesel em estufa.
Fonte: o autor (2023).

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.3.1 Motor Gerador

Os motores geradores são construtivamente constituídos pelo acoplamento de um motor de combustão interna a um gerador de energia elétrica. O motor a combustão transforma a energia química do combustível em energia mecânica, e o gerador a transforma em energia elétrica (Silveira, 2021).

Para o experimento, optou-se pelo uso de um motor gerador diesel pois ele apresenta as características necessárias para simular condições reais de operação de um motor diesel (Figura 19).

Características técnicas do motor gerador utilizado: motor monocilíndrico, quatro tempos, naturalmente aspirado e com injeção direta, projetado para uso de óleo diesel como combustível, operando com velocidade constante de 3.000 rpm e usando apenas um tipo de combustível por vez durante o funcionamento (diesel ou biodiesel).

Apesar do manual do fabricante reportar uma potência contínua de 7,5 kVA, os testes iniciais indicaram que o sistema eletrônico de proteção já atuava para uma carga de 7 kW. Mesmo para uma carga de 6,5 kW o funcionamento ainda se mostrou instável, com redução na tensão gerada para valores inferiores 195 V e frequência

menor que 54 Hz, indicando sobrecarga no gerador. Dessa forma, ficou definido que carga máxima aplicada nos testes seria de 6,0 kW, onde o conjunto motor gerador funcionou adequadamente.



Figura 19 – Motor-gerador diesel BD-8000 E3.

Fonte: O autor (2023).

Para o registro das variáveis elétricas, cargas resistivas foram acopladas à saída de tensão do motor gerador para simular demanda de energia consumida no experimento (Figura 20). Estas cargas representaram os diferentes esforços a que um motor diesel estaria sujeito, em condições reais de operação. Este banco, constituído por 15 resistências com potência nominal de 1.000W cada e configuradas no formato triângulo, foi alimentado pelo motor gerador em 220V, em corrente alternada.



Figura 20 - Banco de cargas resistivas.

Fonte: O autor (2023).

O arranjo das resistências permitiu que as cargas pudessem ser agrupadas de forma a assumirem os valores de 1,0 kW; 1,5 kW; 4,5 kW e 6,0 kW (Figura 21). A seleção dos contatores K1, K2 e K3 foi feita manualmente.

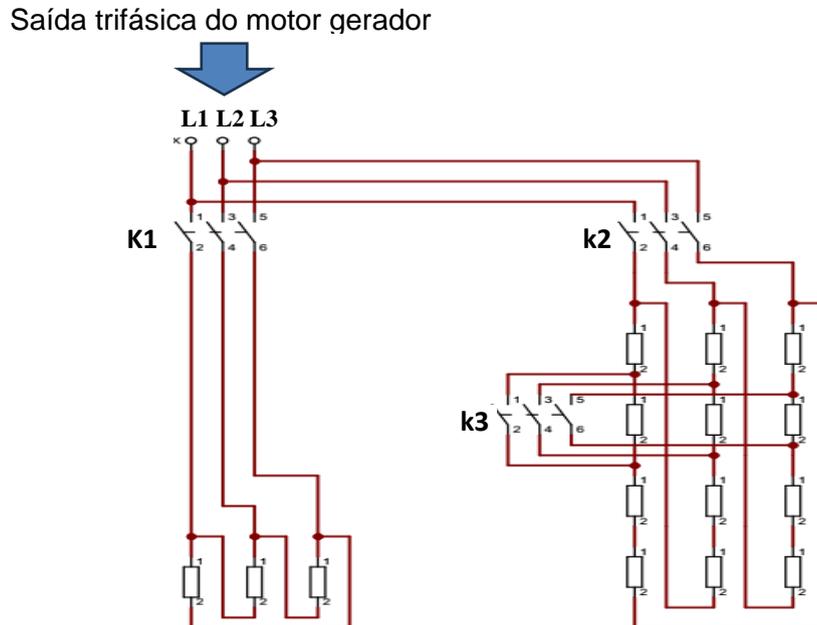


Figura 21. Circuito elétrico para as cargas resistivas.

Fonte: O autor (2023).

A configuração das cargas conectadas ao gerador pode ser vista na Tabela 1, onde o valor de 1,0 kW para a carga foi obtido acionando o contator K2; a carga de 1,5 kW foi obtida acionando os contatores K2 e K3; a carga de 4,5 kW foi obtida com o acionamento do contator K1 e finalmente a carga de 6,0 kW foi obtida quando os contatores K1, K2 e K3 foram simultaneamente acionados.

Tabela 1. Acionamento das cargas resistivas.

Carga	Contatores		
	K1	K2	K3
1,0 kW		X	
1,5 kW		X	X
4,5 kW	X		
6,0 kW	X	X	X

O PLC (Programmable Logic Controller) é um dispositivo eletrônico multifuncional, robusto para funcionar em condições extremas, com hardware e software que permitem comandar aplicações industriais, através do monitoramento

das variáveis de um processo e tomada de decisão em função dos valores encontrados. Softwares específicos, desenvolvidos pelos usuários, permitem que ele possa ser utilizado em aplicações para automação, controle e monitoramento de processos e máquinas de diferentes tipos e complexidades.

Nesta aplicação, o PLC, monitora os valores instantâneos da tensão gerada, da corrente consumida e da carga selecionada, calculando a potência dissipada e o consumo de energia durante o ciclo de operação, disponibilizando os valores em tela (Figura 22).

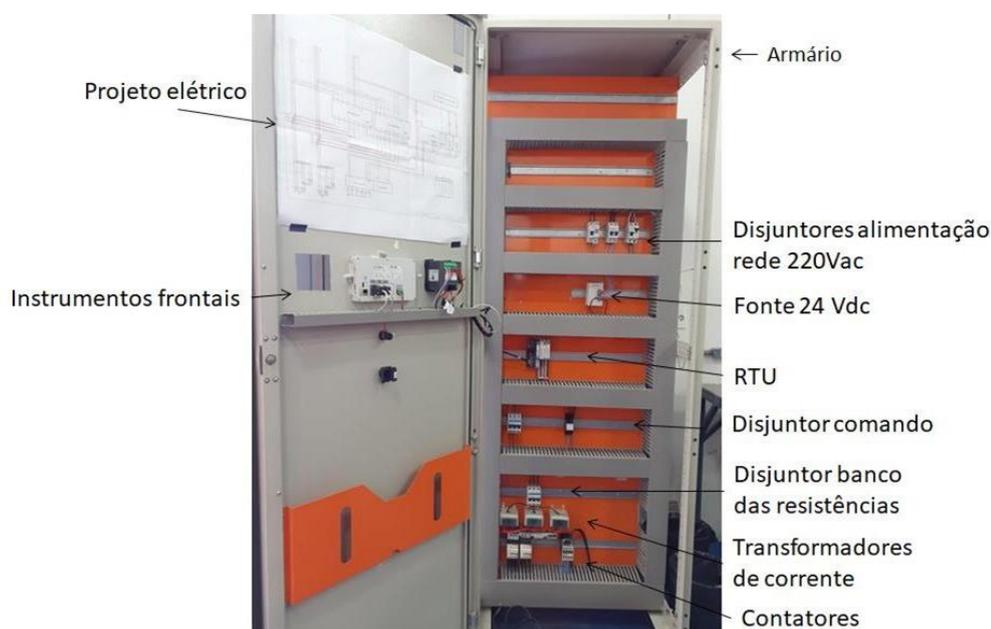


Figura 22 – Painel elétrico para aquisição, processamento e indicação dos dados.
Fonte: Silveira (2021).

Cada ciclo de operação era constituído pelo uso de um único tipo de combustível (diesel ou biodiesel), uma carga resistiva específica aplicada e um tempo determinado para operação. A eficiência energética do conjunto foi medida monitorando o consumo de combustível através de uma balança digital, acoplada à entrada de combustível do motor gerador.

O registro dos gases emitidos pôde ser feito introduzindo uma sonda no escapamento do motor que, por sua vez, foi conectada a um analisador portátil de gases modelo TM 131 da Tecnomotor (Figura 23). O analisador, equipado com sensores eletroquímicos, foi capaz de realizar medições em tempo real dos gases: monóxido de carbono (%), dióxido de carbono (%), óxidos nitrosos (ppm) e hidrocarbonetos (ppm). Durante a queima, os gases eram succionados pelo

analisador que, após a medição, disponibilizava os resultados em tela. Esses dados eram então fotografados a cada 60 s, juntamente com os dados de potência instantânea, por quatro repetições, sendo posteriormente compilados para uma planilha geral.



Figura 23. Analisador de Gases TM 131 Tecnomotor.
Fonte: o autor (2024).

O diagrama esquemático apresentando a configuração completa do circuito elétrico utilizado pode ser visto na Figura 24.

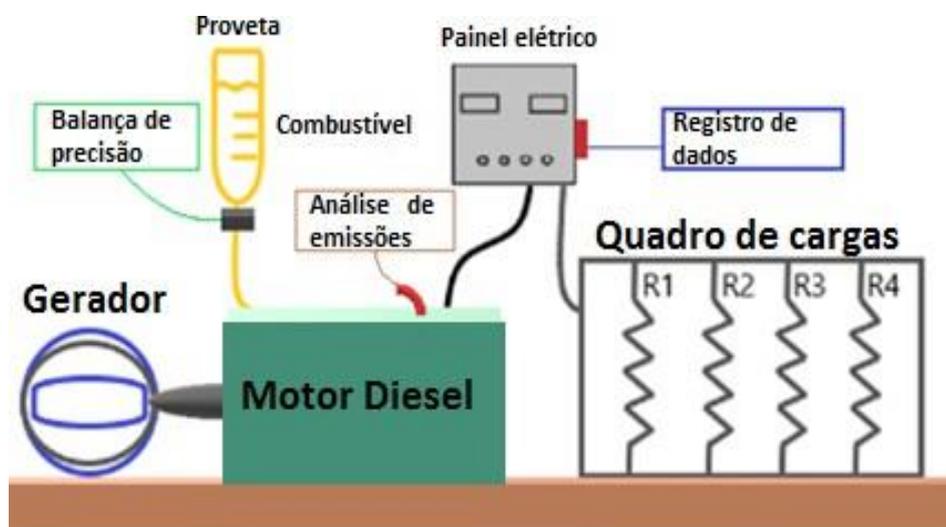


Figura 24. Diagrama esquemático do sistema utilizado, com motor ciclo diesel/gerador, cargas resistivas e biocombustível.
Fonte: Gongora (2021).

A descrição do procedimento experimental para obtenção dos dados a serem compilados (ciclo de operação) está detalhada nos tópicos a seguir:

1. Aferição da célula de carga da balança de precisão, usando massas padrão de chumbo de 100,0 g e 500,0 g. Esta calibração só precisa ser feita uma única vez durante todo o experimento;
2. Selecionar um combustível para ser usado (diesel ou biodiesel de nabo forrageiro);
Obs: as cargas a serem aplicadas são: **Controle, 1 kW, 1,5 kW, 4,5 kW e 6 kW**. A seleção de uma carga no painel do PLC representa o início de cada ciclo. O ciclo consistirá em funcionar o motor para cada carga aplicada e registrar os dados obtidos (tensão, corrente, potência e energia consumida, além do percentual dos gases indicados pelo analisador), conforme detalhamento a seguir;
3. Abastecer o motor com 500ml do combustível selecionado;
4. Manter o motor operando por um minuto, para estabilização;
5. Iniciar o primeiro ciclo de operação, fazendo o registro do peso inicial do combustível, indicado na balança de precisão. Aplicar a primeira carga e, decorridos 60 s, registrar o peso final do combustível utilizado, os parâmetros elétricos fornecidos pelo PLC (tensão gerada, corrente consumida pela carga, potência disponibilizada e energia dissipada durante o ciclo), e também os valores percentuais dos gases indicados no analisador (CO, CO₂, NO_x e HC);
6. Esses procedimentos precisavam ser executados em triplicata, para minimizar erros de leitura. Sendo assim, sem alterar o combustível ou a carga aplicada, o ciclo era reiniciado a partir do item 2, repetindo o processo mais 3 vezes antes de mudar para uma nova carga;
7. Após executar um ciclo completo, a próxima carga era selecionada no painel do PLC, aguardando novamente 60 s para estabilização do motor antes de iniciar o novo ciclo. Todos os procedimentos eram então refeitos, a partir do item 2 até o item 6.
8. Após a aplicação de todas as cargas, selecionava-se o outro combustível, repetindo todos os passos descritos;

3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Amostras do diesel e do biodiesel foram enviadas ao laboratório PoolLab em Itajaí – SC, para a caracterização físico-química de suas propriedades. Este laboratório é referência em análise de óleos (Anexos 2 e 3).

Foram realizados os seguintes ensaios: aspecto, cor visual, massa específica a 20°C (Kg/m³), ponto de fulgor (°C), água e sedimentos (%), ponto de congelamento (°C), viscosidade a 40°C (cSt), éster (%), aromáticos totais (%), olefinas totais (%), benzeno (%), tolueno (%), glicerol (%), corrosividade ao cobre e água por Karl Fisher (ppm).

A massa específica, o ponto de fulgor, a presença de água e sedimentos, o ponto de congelamento, a viscosidade, a corrosividade do cobre e a quantidade de água por Karl Fischer foram determinados seguindo o Standard Test Method for Determination (ASTM). Para avaliar o teor percentual de ésteres, aromáticos totais, olefinas totais, benzeno, tolueno e glicerol, utilizou-se a técnica de espectroscopia de infravermelho. Como os métodos e ensaios foram executados externamente pelo Laboratório PoolLab, eles não serão detalhados aqui, se restringindo apenas à apresentação dos resultados.

As características avaliadas, os métodos de caracterização e as especificações técnicas, determinadas pela ANP segundo a resolução ANP N° 920 de 04/04/23, podem ser vistos na Tabela 2 (ANP, 2024).

Tabela 2. Ensaio e métodos das caracterizações dos óleos

Ensaio	Unidade	Método	Especificação
Aspecto	-	Visual	L.I.I.
Cor visual	-	Visual	Amarelo
Massa específica a 20°C	Kg/m ³	ASTM D 4052	820 a 853,0
Ponto de fulgor	°C	ASTM D 93	38 mín.
Água e Sedimentos % (BSW)	%	ASTM D 1796	0,05 max.
Ponto de congelamento	°C	ASTM D 97	N.A.
Viscosidade a 40°C	cSt	ASTM D 445	1,5 a 6,0
Éster	%	Infravermelho	N.A.
Aromáticos totais	%	Infravermelho	N.A.
Olefinas totais	%	Infravermelho	N.A.
Bezeno	%	Infravermelho	N.A.
Tolueno	%	Infravermelho	N.A.
Glicerol	%	Infravermelho	N.A.
Corrosividade ao cobre	-	ASTM D 130	N.A.
Água por Karl Fisherf	ppm	ASTM D 6304	200,0 max.

N.A.: Não Aplicável; **L.I.I.:** Límpido e Isento de Impurezas

Fonte: O autor (2024)

3.4.1 Massa Específica a 20°C

A massa específica é uma propriedade do combustível que avalia a razão entre a quantidade de matéria existente e a força da gravidade exercida nele, a uma temperatura de referência (Dias, 2019). No Brasil, a ANP estabelece para o óleo diesel valores entre 820 e 850 kg/m³, a 20°C. A temperatura é um fator determinante porque interfere na medição, por causa da expansão térmica.

3.4.2 Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor representa a menor temperatura a partir da qual uma substância é capaz de emanar vapores que podem deflagrar uma combustão, quando expostos ao ar e uma fonte de calor (Gongora, 2021). A análise é feita aquecendo uma amostra do óleo em um recipiente fechado e aplicando uma chama de ignição. O ponto de fulgor é a temperatura em que os vapores do líquido se inflamam.

3.4.3 Água e Sedimentos % (BSW)

Este ensaio mede a quantidade de água e sedimentos que uma amostra de óleo pode conter, dado em porcentagem em relação ao volume total do fluido. Ele é o responsável pela determinação da qualidade do óleo. A análise de sedimentos na água é calculada a partir da vazão de água e sedimentos e comparada com a vazão total de líquidos.

3.4.4 Ponto de Congelamento

O ponto de congelamento determina a menor temperatura que um combustível suporta, antes de começar a solidificar, sendo dado em °C. Valores abaixo da especificação causam problemas de entupimento e falha na ignição, comprometendo o funcionamento do motor.

3.4.5 Viscosidade a 40°C

Conforme Sarin *et al.* (2021), a viscosidade representa a dificuldade que um fluido tem para circular dentro do motor, afetando a combustão e o seu funcionamento. Sua unidade de medida é o centiStokes (cSt).

3.4.6 Ésteres

Os ésteres são substâncias orgânicas obtidas durante a reação química entre um álcool e um ácido carboxílico e sua unidade de medida é %.

3.4.7 Aromáticos totais

São compostos orgânicos altamente poluentes e nocivos à saúde humana, afetando o sistema cardiovascular e respiratório, e potencialmente cancerígenos. Sua unidade de medida é %.

Olefinas

As olefinas são constituídas por moléculas com átomos de carbono e hidrogênio, e sua unidade de medida é %. São poluentes ao meio ambiente por introduzir substâncias nocivas no ecossistema, afetando todo o bioma atingido.

3.4.8 Benzeno

O benzeno é um composto orgânico inflamável e altamente tóxico e reconhecidamente cancerígeno (Mueller; Dennison; Liu, 2021). Sua unidade de medida é %, podendo ser considerado um eficiente marcador de toxicidade de um produto.

3.4.9 Tolueno

É uma substância volátil, incolor, com aroma característico e muito tóxica ao ser humano (Mueller; Dennison; Liu, 2021). Sua unidade de medida é %.

3.4.10 Glicerol

O glicerol é um composto orgânico líquido, incolor, viscoso e de baixa toxicidade, com propriedades emolientes, hidratantes e lubrificantes.

3.4.11 Água por Karl Fisher

É um método analítico utilizado para determinação do teor de umidade em uma amostra, sendo dado em ppm. Percentuais acima do limite especificado pela ANP

podem comprometer o funcionamento dos motores por corrosão das partes móveis ou das tubulações.

3.4.12 Análise dos Dados

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 5: dois combustíveis (diesel e biodiesel) e 5 cargas (Controle, 1 kW, 1,5 kW, 4,5 kW e 6 kW).

Os dados registrados durante a queima foram submetidos a Análise de Variância (ANOVA) e as médias dos resultados foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Utilizando o aplicativo SISVAR versão 5.8 (Buid 92), desenvolvido por Daniel Furtado Ferreira, os dados coletados durante a queima, para os dois combustíveis, foram submetidos a Análise de Variância (ANOVA) para avaliação do quão significativas poderiam ser as diferenças entre eles.

As médias também foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, verificando quais delas poderiam apresentar diferenças estatisticamente significativas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. GRANDEZAS FÍSICO-QUÍMICAS

Na tabela 3 podem ser observadas as características físico-químicas e os limites estabelecidos pela Resolução ANP Nº 920 DE 04/04/23 (ANP, 2024). Também podem ser vistos os valores encontrados para o óleo diesel e para o biodiesel de nabo forrageiro.

Tabela 3. Características do óleo diesel e do biodiesel de nabo forrageiro.

Ensaio	Unidade	Especificação	Diesel	Biodiesel de Nabo
Aspecto	-	L. I. I.	L. I. I.	L. I. I.
Cor visual	-	Amarelo	Amarelo	Amarelo
Massa Específica a 20°C	Kg/m ³	820 a 853,0	853,9	878,6
Ponto de Fulgor	°C	38 mín.	55	171
Água sedimentos % (BSW)	%	0,05 max.	Ausente	Ausente
Ponto de congelamento	°C	N.A.	-17	-5
Viscosidade a 40°C	cSt	1,5 a 6,0	2,555	6,147
Éster	%	N.A.	3,10	96,74
Aromáticos totais	%	N.A.	9,39	1,29
Olefinas totais	%	N.A.	0,65	24,1
Benzeno	%	N.A.	0,06	0,01
Tolueno	%	N.A.	0,00	11,29
Glicerol	%	N.A.	1,412	6,264
Corrosividade ao cobre	-	N.A.	1A	1A
Água por Karl Fisher	ppm	200,0 max.	63,1	579

N.A. Não Aplicável; L. I. I. Límpido e Isento de Impurezas

Fonte: O autor (2024)

4.1.1. Massa Específica a 20°C

A massa específica do biodiesel de nabo forrageiro (878,6 kg/m³) ficou 3% acima do limite estabelecido pela ANP (853,9 kg/m³), enquanto o óleo diesel apresentou o valor 0,11% acima da norma. Uma possível explicação seria uma maior quantidade de água presente na amostra, acima do permitido na normativa da ANP, e que não foi possível ser retirada pelo método de secagem utilizado.

Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores utilizando o mesmo método para produção biodieseis a partir de outras matérias primas, como Nobre *et al.* (2023) que encontrou 880kg/m³ no biodiesel cártamo, Reis (2022) conseguiu 874,3kg/m³ no biodiesel de crambe e Orben (2024), 915,2kg/m³ no óleo refinado de

canola, $879,7\text{kg/m}^3$ no biodiesel de canola refinado, $919,8\text{kg/m}^3$ no óleo de soja extravirgem, $883,2\text{kg/m}^3$ no biodiesel de soja extravirgem, $920,1\text{kg/m}^3$ no óleo de soja refinado e 883kg/m^3 no biodiesel de soja refinado ($175\text{ }^\circ\text{C}$). Todos esses resultados apresentaram massas específicas entre 879Kg/m^3 e $919,8\text{Kg/m}^3$, coerente com o valor encontrado para o biodiesel de nabo forrageiro ($878,6\text{k g/m}^3$).

4.1.2. Ponto de Fulgor

Segundo Cardoso (2020), combustíveis que entram em ignição a temperaturas mais elevadas (ponto de fulgor) são mais seguros para o manuseio, transporte e armazenamento. O ponto de fulgor encontrado para o biodiesel foi 310,91% maior que o do diesel, o que lhe confere boa segurança para a sua manipulação, armazenamento e transporte.

Outros autores obtiveram resultados semelhantes a partir de outras matérias primas, sinalizando que biodieseis de origem vegetal apresentam características similares aos valores encontrados neste experimento. Na produção do biodiesel de uva, Ferreira (2022) obteve 174°C de ponto de fulgor, Nobre et al. (2023) alcançaram 190°C no biodiesel de cártamo, Reis (2022), 187°C no biodiesel de crambe e Orben (2024) $>200^\circ\text{C}$ no óleo refinado de canola, 169°C no biodiesel de canola refinado, $>136^\circ\text{C}$ no óleo de soja extravirgem, $>132^\circ\text{C}$ no biodiesel de soja extravirgem, 182°C no óleo de soja refinado e 175°C no biodiesel de soja refinado. Estes achados levam a crer que biodieseis de origem vegetal apresentam valores de ponto de fulgor bem acima do diesel de origem mineral.

4.1.3. Água e Sedimentos % (BSW)

A Resolução ANP Nº 920 DE 04/04/23 estabelece um limite máximo de 0,05% de água e sedimentos no volume total de combustível, sendo encontrado 0% nas amostras analisadas do biodiesel. Ponto favorável para o biodiesel pois a ausência de água e partículas estranhas lhe confere boa qualidade como combustível.

Resultados semelhantes foram alcançados por outros autores em biodieseis de outras matérias primas. Orben (2024) registrou 0% em todas as amostras analisadas (óleo refinado de canola, biodiesel de canola refinado, óleo de soja extravirgem, biodiesel de soja extravirgem, óleo de soja refinado e biodiesel de soja refinado); Nobre et al. (2023) obteve 0% para o biodiesel de cártamo; Ferreira (2022)

encontrou 0% para o biodiesel de uva e Reis (2022), 0% para o biodiesel de crambe.

4.1.4. Ponto de Congelamento

O valor encontrado para o diesel foi -17°C, e para o biodiesel de nabo, -5°C. A ANP não determina limites para este parâmetro, mas temperaturas mais elevadas de ponto de congelamento limitam o uso dos motores em climas muito frios. Para o valor encontrado, o uso de biodiesel de nabo forrageiro não compromete o funcionamento de motores diesel em climas tropicais, como o Brasil.

Outros autores obtiveram resultados similares usando outras matérias primas, com pontos de congelamento sempre mais altos que o diesel, mas inferiores a 0°C. Ferreira (2022) encontrou -1°C para o ponto de congelamento do biodiesel de uva, Nobre *et al.* (2023) -10°C para o biodiesel de cártamo, Reis (2022), -3°C para o biodiesel de crambe e Orben (2024) obteve <-7°C para óleo refinado de canola, <-8°C para o biodiesel de canola refinado, <-5°C para o óleo de soja extravirgem, -3°C para o biodiesel de soja extravirgem, -11°C para o óleo de soja refinado e -3°C para o biodiesel de soja refinado. Todos esses resultados apresentaram valores de ponto de congelamento entre -1°C e -11°C, o que sugere uma possível similaridade entre os biodieseis de origem vegetal, todos com pontos de congelamento mais elevados que o diesel.

4.1.5. Viscosidade a 40°C

O valor obtido com o biodiesel de nabo (6,147 cSt) foi bem maior do que o encontrado para o diesel (2,555 cSt), porém ligeiramente acima (1,7%) do limite máximo estabelecido pela ANP, não chegando a comprometer o funcionamento do motor.

Outros autores, trabalhando com matérias primas diferentes, confirmaram esta tendência de aumento da viscosidade para biodieseis produzidos a partir de fontes vegetais. Ferreira (2022) obteve 4,088 cSt no biodiesel de uva, Reis (2022) conseguiu 5,876 cSt no biodiesel de crambe, Nobre *et al.* (2023), 4,215 cSt no biodiesel de cártamo e Orben, 40,747 cSt no óleo refinado de canola, 4,343 cSt no biodiesel de canola refinado, 34,838 cSt no óleo de soja extravirgem, 7,58 cSt no biodiesel de soja extravirgem, 30,6 cSt no óleo de soja refinado e 4,61 cSt no biodiesel de soja refinado.

Através dos experimentos realizados pelos autores citados, foi constatado que a viscosidade dos óleos crus é sempre maior que o seu biodiesel correspondente. Por sua vez, a viscosidade dos biodieseis produzidos também é sempre maior que o diesel, porém dentro dos limites estabelecidos pela ANP. O valor de viscosidade de um biodiesel pode ser otimizado misturando-o ao diesel.

4.1.6. Ésteres

Os percentuais de ésteres obtidos com o biodiesel de nabo forrageiro superaram em 3.120,65% os valores encontrados no diesel de origem fóssil, sendo que a ANP não determina limites para este parâmetro. Este achado sugere que os efeitos deletérios provocados pela maior viscosidade do biodiesel de nabo poderiam ser parcialmente compensados devido ao seu elevado teor de ésteres.

Outros autores também encontraram percentuais de ésteres mais elevados nos biodieseis produzidos com outros óleos de origem de fontes naturais, porém nenhum superou os valores encontrados no biodiesel de nabo. Ferreira (2022) obteve 23,036% no biodiesel de uva, Reis (2022) encontrou 22,170% no biodiesel de crambe, Nobre *et al.* (2023), 24,995% no biodiesel de cártamo e Orben (2024), 20,614% no óleo refinado de canola, 27,709% no biodiesel de canola refinado, 93,42% no óleo de soja extravirgem, 97,52% no biodiesel de soja extravirgem, 21,271% no óleo de soja refinado e 28,978% no biodiesel de soja refinado.

4.1.7. Aromáticos Totais

Os valores encontrados para o biodiesel de nabo representaram apenas 9,39% do valor encontrado para o diesel, comprovando que ele tem uma toxicidade bem menor que o diesel. A ANP não determina limites para este parâmetro.

Outros autores obtiveram valores de aromáticos totais menores em diversos biodieseis de origem vegetal, demonstrando que eles são menos agressivos para o homem e para o meio ambiente. Ferreira (2022) encontrou 1,39% de aromáticos totais no biodiesel de uva, Reis (2022) obteve 1,36% no biodiesel de crambe, Nobre *et al.* (2023), 1,06% no biodiesel de cártamo e Orben (2024), 1,18% no óleo refinado de canola, 1,21% no biodiesel de canola refinado, 1,15% no óleo de soja extravirgem, 1,15% no biodiesel de soja extravirgem, 3,34% no óleo de soja refinado e 0% para o biodiesel de soja refinado.

4.1.8. Olefinas

O biodiesel de nabo apresentou um percentual de olefinas 3.707,7 vezes maior que o diesel mineral. Ponto favorável para o biodiesel pois teor elevado de olefinas melhora a octanagem do combustível. A ANP não determina limites para este parâmetro.

Através do estudo de outros autores, é comum encontrar percentuais de olefinas em biodieseis de fontes naturais muitas vezes maior do que as encontradas em combustíveis fósseis. Ferreira (2022) identificou 26,84% no biodiesel de uva, Reis (2022) encontrou 20,91% no biodiesel de crambe, e Nobre *et al.* (2023), 24,39% no biodiesel de cártamo. Orben (2024) obteve os seguintes valores: 28,56% para o óleo refinado de canola, 25,72% para o biodiesel de canola refinado, 32,43% para o óleo de soja extravirgem, 29,75% para o biodiesel de soja extravirgem, 25,31% para o óleo de soja refinado e 31,51% para o biodiesel de soja refinado.

4.1.9. Benzeno

Os percentuais encontrados no biodiesel de nabo foram praticamente nulos, o que lhe aufere uma característica muito importante: uma baixa toxicidade, já que o benzeno é cancerígeno. A ANP não determina limites para este parâmetro.

Outros autores encontraram resultados semelhantes na produção de biodieseis usando outras fontes naturais, o que leva à hipótese de que os combustíveis de origem vegetal não contêm percentuais significativos de benzeno em sua composição. Ferreira (2022) obteve 0,03% no biodiesel de uva, Reis (2022) encontrou 0,01% no biodiesel de crambe, Nobre *et al.* (2023), 0,01% no biodiesel de cártamo e Orben (2024), 0,01% no óleo refinado de canola, 0% no biodiesel de canola refinado, 0,03% no óleo de soja extravirgem, 0,03% no biodiesel de soja extravirgem, 0,03% no óleo de soja refinado e 0,05% no biodiesel de soja refinado.

4.1.10. Tolueno

O biodiesel de nabo apresentou 11,29% de tolueno em sua composição, contra 0% no diesel. Ponto desfavorável para o biodiesel pois, apesar da ANP não estabelecer limites para este parâmetro, o tolueno é muito tóxico ao ser humano

Outros autores encontraram resultados similares em seus experimentos, o que demonstra que biodieseis mesmo sendo provenientes de fontes vegetais podem

trazer riscos à saúde humana, gerando um alerta quanto ao uso em ambientes confinados. Ferreira (2022) encontrou 12,49% no biodiesel de uva, Reis (2022) obteve 9,63% no biodiesel de crambe, Nobre *et al.* (2023), 11,71% no biodiesel de cártamo e Orben (2024) 12,76% no óleo refinado de canola, 3,88% no biodiesel de canola refinado, 15,25% no óleo de soja extravirgem, 13,96% no biodiesel de soja extravirgem, 10,77% no óleo de soja refinado e 13,45% no biodiesel de soja refinado.

4.1.11. Glicerol

Os percentuais de glicerol encontrados no biodiesel foram 443,9% maiores do que os encontrados no diesel, o que o torna mais viscoso. A ANP não determina limites para este parâmetro.

Outros autores encontraram valores bastantes similares ao usar fontes vegetais diferentes e o mesmo método para produção de biodiesel. Ferreira (2022) obteve 4,72% de glicerol no biodiesel de uva, Nobre *et al.* (2023), 6,15% no biodiesel de cártamo e Orben (2024) 1,89% no óleo refinado de canola, 6,63% no biodiesel de canola refinado, 0,98% no óleo de soja extravirgem, 25,15% no biodiesel de soja extravirgem, 0,849% no óleo de soja refinado e 4,204% no biodiesel de soja refinado.

4.1.12. Água por Karl Fisher

O valor encontrado estava 189,5% acima do limite máximo especificado pela ANP, que é 200ppm. Como o procedimento de secagem consistiu em simplesmente preencher um becker com o biodiesel e levá-lo ao forno, a 85°C, uma possível justificativa seria que, apesar da temperatura elevada, o volume de óleo no becker impediu a evaporação natural da água, e que aparentemente a densidade do óleo criou uma barreira, impedindo que as moléculas da água emergissem e sofressem a evaporação esperada. Isto sugere uma ineficiência no método utilizado para a secagem do biodiesel, e não um problema nas características físico-químicas dele.

Utilizando o mesmo procedimento de secagem para biodieseis oriundos de outras oleaginosas, outros autores se depararam com o mesmo problema. Reis (2022) obteve 591,80 ppm para o biodiesel de crambe, Nobre *et al.* (2023) conseguiu 1016,2 ppm para o biodiesel de cártamo e Orben (2024) obteve 579,91 ppm no óleo refinado de canola, 148,6 ppm no biodiesel de canola refinado, 567,9 ppm no óleo de soja extravirgem, 633,8 ppm no biodiesel de soja extravirgem, 650,1 ppm no óleo de soja

refinado e 296 ppm no biodiesel de soja refinado.

4.1.13. Resultados Obtidos com as Grandezas Físicas

Os valores das variáveis físicas: peso (g), tensão (V), corrente (A), potência (W) e energia (W.h) podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios do peso (g), tensão (V), corrente (A), potência (W) e energia (W.h) do diesel e do biodiesel de nabo forrageiro, em função das diferentes cargas

Cargas	Variáveis									
	Consumo				Elétricas					
	Peso (g)		Tensão (V)		Corrente (A)		Potência (W)		Energia (W.h)	
	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B
Controle	15,00Ab	11,25Ad	231,31Aa	231,06Aa	0,00Ae	0,00Ae	0,00Ad	0,00Ad	0,00Ad	0,00Ac
1 kW	16,25Ab	17,50Ac	231,27Aa	230,82Aa	2,94Ad	2,93Ad	1169,32Ac	1163,75Ac	19,50Ac	19,50Ab
1,5 kW	17,50Ab	18,75Ac	231,32Aa	230,77Aa	3,96Ac	3,95Ac	1579,22Ac	1571,30Ac	26,50Ac	26,25Ab
4,5 kW	31,25Aa	32,50Ab	231,62Aa	231,02Aa	11,53Ab	11,53Ab	4624,97Ab	4621,76Ab	77,25 Ab	77,50Aa
6 kW	36,25Ba	43,75Aa	231,83Aa	220,03Bb	14,67Aa	13,77Ba	5869,07Aa	5262,87Ba	98,00 Aa	90,75Aa
Média	23,25	24,75	231,47	228,74	6,62	6,44	2648,52	2523,94	44,25	42,80
C.V. (%)	11,72		1,74		4,38		7,84		19,38	
DMS linha	4,06		5,78		0,41		292,78		12,18	
DMS col.	5,77		8,21		0,59		415,96		17,30	

D: Diesel; B: Biodiesel, C.V.: Coeficiente de variação, DMS: Diferença Mínima Significativa. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: O autor (2024).

4.1.14. Consumo de Combustível

Pode ser visto na Tabela 4 que não houve diferenças significativas no consumo de combustível, usando diesel ou biodiesel, para as cargas de controle, 1 kW, 1,5 kW e 4,5 kW. Para a carga maior (6 kW), o biodiesel apresentou consumo 20,69% maior que o diesel. Uma possível explicação seria o fato de o motor utilizado no experimento ter sido projetado para uso exclusivo com diesel, e o biodiesel, tendo ponto de fulgor mais elevado, precisaria de maior pressão na câmara de combustão para que ocorresse a ignição espontânea, provocando sobrecarga de temperatura no motor e comprometimento do seu funcionamento.

Analisando um combustível por vez, foi observado, ao usar diesel, que não houve diferenças significativas no consumo de combustível para as cargas Controle, 1 kW e 1,5 kW. Para as cargas maiores (4,5 kW e 6 kW) o consumo aumentou, porém, sem diferenças significativas entre elas. Usando só biodiesel, houve um aumento progressivo de consumo à medida em que se aplicavam as cargas Controle, 1 kW, 4,5 kW e 6 kW. Para cargas intermediárias (1 kW e 1,5 kW) não foram encontradas diferenças significativas entre si.

Usando a mesma metodologia, Silveira (2021) encontrou resultados similares com o biodiesel de canola, onde o consumo de combustível é mais baixo em cargas menores (1,0 kW e 1,5 kW), aumentando à medida que a carga aumenta e praticamente iguais ao consumo usando diesel, porém, sem diferenças significativas em relação às cargas aplicadas.

Simsek (2020), como a maioria dos autores, fez o seu experimento usando biodiesel puro e blendas de biodiesel, obtendo resultados semelhantes ao usar biodiesel de canola. Nesse estudo, o biodiesel (BD100) diminuiu a eficiência (aumentou o consumo) à medida que a carga aumentou, com consumo máximo na carga 6 kW. Nobre *et al.* (2023) conseguiu resultados também parecidos com o biodiesel de cártamo, não encontrando diferenças significativas em nenhuma das cargas aplicadas entre diesel e biodiesel, porém observando aumento progressivo de consumo à medida que as cargas aumentam.

Com o intuito de mitigar os problemas e melhorar o desempenho do motor, sugere-se, como estudo futuro, avaliar a adição de blendas de biodiesel de nabo forrageiro ao óleo diesel, objetivando obter uma redução no consumo de combustível em função das proporções da mistura.

4.1.15. Tensão

Pela Tabela 4, não foram encontradas diferenças significativas para a tensão gerada para o diesel e para o biodiesel quando aplicadas as cargas Controle, 1 KW, 1,5 KW e 4,5 KW. Para a carga maior (6 KW), o biodiesel apresentou uma tensão 5,09% menor que o diesel. Com 6 KW de carga, o diesel manteve o valor da tensão sem diferenças significativas, mas o biodiesel comprometeu o funcionamento do motor gerador, causando queda no valor da tensão gerada e superaquecimento no motor. Uma possível causa, já descrita no item anterior, também se aplica aqui e em todos os demais parâmetros elétricos a seguir, como corrente, potência e energia.

Considerando apenas um combustível por vez, o valor da tensão gerada não apresentou diferenças significativas quando se usou só óleo diesel, independentemente da carga aplicada. Quando o biodiesel foi usado, não houve diferenças significativas para as cargas Controle, 1 KW, 1,5 KW e 4,5 KW, ocorrendo uma queda no valor quando foi aplicada a carga maior (6 KW).

4.1.16. Corrente

A Lei de Ohm (Equação 1) determina que, em um circuito elétrico, o valor da diferença de potencial (V) é diretamente proporcional à resistência elétrica (R) e à corrente que circula nela (I).

$$V = R \cdot I \quad (1)$$

Onde:

V = Tensão (V)

R = Resistência (Ω)

I = Corrente (A)

E a potência elétrica, pode ser representada em função da tensão e da corrente (Equação 2).

$$P = V \cdot I \quad (2)$$

Onde:

P = Potência (W)

V = Tensão (V)

I = Corrente (A)

Pela lei de Ohm (Equação 1), para uma resistência constante, a relação entre tensão e corrente é inversamente proporcional. A carga, dada em KW, foi ajustada alterando-se manualmente o valor do banco de resistências para fornecer uma potência dissipada fixa, nos valores de 1 KW, 1,5 KW, 4,5 KW e 6 KW. Pela Equação 2, pode deduzir que quanto maior a carga, menor será a resistência equivalente do banco de resistências para dissipar esta potência e, conseqüentemente, maior será a corrente circulando no circuito, já que a tensão gerada é sempre constante.

Os dados da Tabela 4 mostram que o biodiesel se comportou de maneira idêntica ao diesel para as cargas Controle, 1 KW, 1,5 KW e 4,5 KW, não apresentando diferenças significativas entre si. Entretanto, o uso de biodiesel para a carga maior (6KW) provocou superaquecimento no motor, fazendo com que o conjunto motor gerador não conseguisse manter a tensão de saída estabilizada em 220V, havendo queda no valor gerado. Sendo fixo o valor de resistência selecionada no banco, a corrente resultante portanto foi menor. Para o diesel, a aplicação da carga 6 KW não afetou a geração. Como a tensão permaneceu estável e a carga aplicada aumentou, a corrente resultante foi maior do que quando se usou biodiesel.

Analisando um único combustível por vez, os dados da Tabela 4 mostram que quando se usa só diesel, o valor da corrente aumenta à medida que os valores de

carga também aumentam, para todas as cargas (Controle, 1 KW, 1,5 KW, 4,5 KW e 6 KW). Usando só biodiesel, os resultados foram idênticos.

Como existe uma correlação direta entre potência, tensão e corrente (Equação 2), outros autores não se aprofundaram especificamente na análise dos parâmetros *tensão* e *corrente*, se limitando apenas à análise da *potência disponibilizada*.

4.1.17. Potência

Os dados encontrados indicam que não houve diferenças significativas de valores de potência quando do uso de diesel ou biodiesel para as cargas de controle, 1 kW, 1,5 kW e 4,5 kW. Para o diesel, a aplicação da carga maior (6 kW) não afetou a geração, porém para o biodiesel, houve uma redução na potência (10,33% menor que o diesel). Conforme já comentado no item anterior (4.2.1. Consumo de Combustível), a carga 6 kW causou superaquecimento no motor, fazendo com que o conjunto motor gerador não conseguisse manter a tensão de saída estabilizada em 220V, provocando queda no valor gerado. Sendo fixo o valor da resistência, a corrente resultante foi menor e, conseqüentemente, menor a potência disponibilizada.

Considerando o uso de apenas um combustível por vez, o comportamento do diesel foi idêntico ao biodiesel. O valor da potência disponibilizada cresce à medida em que se aplicam as cargas de Controle, 1 kW, 4,5 kW e 6 kW, não havendo, entretanto, diferenças significativas entre as cargas 1 kW e 1,5 kW. Isto se explica pelo fato delas apresentarem valores absolutos muito próximos, fazendo com que, no cálculo estatístico, essa pequena diferença de valores seja indevidamente considerada como dentro da margem de erro.

Outros autores usando a mesma metodologia, porém com outras matérias primas, encontraram um comportamento muito parecido. Os estudos de Orben (2024) foram desenvolvidos com biodieseis de canola refinado, canola extravirgem, soja refinado e soja extravirgem, sendo as análises efetuadas somente sobre valores de potência, não sendo analisadas a tensão e a corrente de forma individual. Nestes estudos, não foram encontradas diferenças significativas entre o diesel e os biodieseis para todas as cargas aplicadas, obtendo valores de potência crescentes à medida que as cargas aumentam.

Silveira (2021) obteve com o biodiesel de canola, resultados similares, onde

as médias de consumo específico foram ligeiramente menores, comparadas ao biodiesel puro, e as potências registradas para o diesel e para o biodiesel não apresentaram diferenças relevantes entre si, aumentando de valor com o aumento da carga, quando analisadas separadamente para cada tipo de combustível utilizado.

4.1.18. Energia Disponibilizada

Os dados da Tabela 4 apresentam um comportamento idêntico de entrega de energia por unidade de tempo, tanto para o diesel quanto para o biodiesel, não havendo diferenças significativas quando da aplicação das cargas Controle, 1 kW, 1,5 kW, 4,5 kW e 6 kW.

Considerando os combustíveis de maneira individual, o comportamento do motor gerador tanto para o diesel quanto para o biodiesel para a variável energia foi idêntico à variável potência, descrita no item anterior.

Analogamente, se aplicam os estudos de Orben (2024), com biodieseis de canola refinado, canola extravirgem, soja refinado e soja extravirgem, Gongora, (2021) com biodiesel de cártamo e Silveira (2021), com biodiesel de canola.

4.2. RESULTADOS OBTIDOS COM AS EMISSÕES DE GASES

Os valores das variáveis gasosas: Oxigênio (%), monóxido de carbono (%), dióxido de carbono (%), NOx (ppm) e HC (ppm) podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores médios do CO (%), CO₂ (%), NOx (ppm) e HC (ppm) do diesel e do biodiesel de nabo forrageiro, em função das diferentes cargas

Cargas	Variáveis gasosas							
	CO (%)		CO ₂ (%)		NOx (ppm)		HC (ppm)	
	D	B	D	B	D	B	D	B
Controle	0,22 Aa	0,07 Bb	2,92 Aa	2,95 Aa	32,00 Be	48,75 Ad	73,00 Aa	5,50 Ba
1 kW	0,12 Aab	0,05 Ab	3,60 Bb	3,90 Ab	106,25 Ad	99,00 Ac	25,50 Ab	0,00 Bb
1,5 kW	0,10 Ab	0,05 Ab	3,90 Bc	4,22 Ac	154,40 Ac	121,50 Bb	15,75 Ac	0,00 Bb
4,5 kW	0,04 Aab	0,03 Ab	7,30 Bd	7,67 Ad	483,00 Ab	260,25 Ba	3,00 Ad	0,00 Bb
6 kW	0,13 Bab	0,61 Aa	9,62 Be	10,47Ae	512,00 Aa	253,75 Ba	1,25 Ad	1,00 Ab
Média	0,12	0,16	5,47	5,84	257,55	156,65	24,10	1,30
C.V. (%)	53,95		1,79		3,40		11,27	
DMS linha	0,11		0,15		10,16		2,07	
DMS coluna	0,16		0,21		14,43		2,94	

D: Diesel; B: Biodiesel, C.V.: Coeficiente de variação, DMS: Diferença Mínima Significativa. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: O autor (2024).

4.2.1. Monóxido de Carbono (CO)

Comparando o teor de monóxido de carbono do diesel com o biodiesel segundo os dados da Tabela 5, observou-se diferenças significativas para a variável Controle e para a carga de 6kW, sendo que o diesel apresentou maior emissão de CO para a variável Controle, e menor para a carga de 6kW. Para as demais cargas (1 kW, 1,5 kW e 4,5 kW) não houve diferenças significativas entre si para o diesel nem para o biodiesel. Apesar de não haver diferenças significativas entre o Controle e as cargas até 4,5 kW, é mais vantajoso utilizar o biodiesel em cargas menores, porque é onde ocorre menor consumo de combustível. Para a carga maior (6 kW) observou-se substancial elevação da emissão de CO para o biodiesel (conforme já comentado no item anterior 4.1.15 - Consumo de Combustível).

Avaliando apenas o diesel em função das cargas aplicadas, houve diferença para a variável Controle e para a carga de 1 kW, não sendo observadas diferenças significativas entre si para as demais cargas (1 kW, 4,5 kW e 6 kW), e nem entre a variável Controle e a carga de 1,5 kW. Isto se deve à interpretação do k

Avaliando apenas o biodiesel em relação às cargas, apenas a carga de 6 kW diferiu das demais (controle, 1 kW, 1,5 kW e 4,5 kW). Entretanto, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas para estas cargas (Controle, 1 kW, 1,5 kW e 4,5 kW). Em valores absolutos e analisando apenas a carga 4 kW em relação ao Controle, houve uma redução de 42,9 % da emissão de CO.

Usando a mesma metodologia para os biodieseis de canola refinado, canola extravirgem, soja refinado e soja extravirgem, Orben (2024) obteve resultados semelhantes para todas as cargas aplicadas, com reduções incrementais de CO com o aumento da carga, e não encontrando diferenças significativas entre si, inclusive para as cargas Controle e 6 kW.

Em estudos com biodiesel de canola, Silveira (2021) obteve emissões menores de CO em comparação com o diesel em quase todas as cargas aplicadas, com reduções mais expressivas em cargas maiores, chegando a 58,03% para a carga de 4,5 kW. Para a carga 6 kW ocorreu um aumento substancial na emissão de CO, de maneira análoga aos estudos com nabo forrageiro.

Simsek (2020) também obteve resultados muito parecidos com os de Silveira ao analisar biodiesel de canola, com redução de 34,28% em relação ao diesel.

4.2.2. Dióxido de Carbono (CO₂)

Comparando o valor do CO₂ do diesel com o biodiesel na Tabela 5, observa-se que apenas a variável de controle não diferiu estatisticamente das demais cargas (1 kW, 1,5 kW, 4,5 kW e 6 kW). Os demais valores diferiram entre si quando aplicadas as cargas.

A emissão de CO₂ foi maior para o biodiesel, sendo que é mais vantajoso utilizá-lo em cargas menores, pois é onde ocorre menor emissão de CO₂.

Avaliando apenas o diesel em função das cargas aplicadas, houve diferenças significativas na emissão de CO₂ para todas elas (Controle, 1 kW, 1,5 kW, 4,5 kW e 6 kW), sendo que o percentual de CO₂ aumentou à medida em que o valor da carga também aumentou. Avaliando só o biodiesel, a emissão de CO₂ se comportou de maneira idêntica aos valores encontrados no diesel.

Orben (2024) encontrou diferenças significativas para os combustíveis analisados, sendo o biodiesel de soja extravirgem o que mais teve emissões de dióxido de carbono, seguido pelo biodiesel de canola refinado; os que apresentaram menores emissões foram os biodieseis de soja refinado e canola extravirgem. Já Silveira (2021) encontrou pouca expressividade nas emissões de CO₂ em relação ao diesel nos estudos com biodiesel de canola. Os estudos de Simsek (2020) com biodiesel de canola corroboram este estudo do biodiesel de nabo, onde foi verificado que as emissões de CO₂ aumentam à medida que a carga aumenta, e que houve diferenças significativas na emissão de CO₂ para todas as cargas. O dióxido de carbono (CO₂) aumentou em média 42,62% em função das cargas aplicadas;

4.2.3. Óxidos Nitrosos (NO_x)

Pela Tabela 5, o teor de óxidos nitrosos encontrado nos gases de escape para o diesel e para o biodiesel apresentou diferenças significativas para as cargas Controle, 1,5 kW, 4,5 kW e 6 kW, não sendo encontradas diferenças significativas para a carga de 1kW.

A emissão de NO_x foi menor para o biodiesel, sendo mais vantajoso utilizá-lo em cargas maiores, a partir de 1,5 kW, porque é onde ocorre a menor emissão de NO_x.

Avaliando apenas o diesel em função das cargas aplicadas, houve diferenças

significativas na emissão de NOx para todas elas (Controle, 1 kW, 1,5 kW, 4,5 kW e 6 kW), sendo que o percentual de NOx aumentou à medida em que o valor da carga aumenta. Avaliando só o biodiesel separadamente, não foram encontradas diferenças significativas para as cargas 4,5 kW e 6 kW. Todas as demais cargas diferem entre si e da carga Controle, onde o percentual de NOx aumenta à medida em que o valor da carga aumenta.

Vários autores, usando o mesmo método para produção de biodiesel com outras matérias primas, obtiveram resultados parecidos com o biodiesel de nabo. Santos (2023) registrou uma redução de NOx com o aumento da carga ao usar biodiesel de gergelim. Para os biodieseis de canola refinado, canola extravirgem, soja refinado e soja extravirgem, Orben (2024) não encontrou diferenças significativas para as cargas 1 kW e 1,5kW. Para a carga 4,5 kW, as emissões de NOx foram maiores para o biodiesel de soja extravirgem. Na carga 6 kW houve maior emissão de NOx no biodiesel de soja extravirgem do que no biodiesel de canola extravirgem, porém não apresentando diferenças significativas entre si para os dois biodieseis. Contudo, o comportamento geral para os quatro biocombustíveis foi semelhante ao biodiesel de nabo, onde o aumento da carga provoca um aumento na emissão de NOx.

Alguns autores, entretanto, obtiveram resultados opostos a este trabalho. Gongora (2022) encontrou uma maior emissão de NOx no biodiesel de cártamo, com o aumento da carga, do que no próprio diesel mineral, e Silveira (2021), obteve, no biodiesel de canola, valores de NOx crescendo com o aumento da carga.

4.2.4. Hidrocarbonetos (HC)

Comparando os valores de HC emitidos pelo diesel e pelo biodiesel na Tabela 5, observou-se que os dados encontrados diferiram para todas as cargas (Controle, 1 kW, 1,5 kW, 4,5 kW), exceto para a carga de 6 kW, onde não foram encontradas diferenças significativas entre si.

Avaliando apenas o biodiesel em função das cargas, a emissão de HC difere apenas para a carga Controle, que apresentou um valor bem elevado. Não foram encontradas diferenças significativas para as demais cargas, não apresentando emissões em quase todas elas, exceto para a carga de 6 kW. Para o diesel, não foram observadas diferenças significativas apenas para a carga 6 kW. Os valores para todas as demais cargas diferiram entre si, apresentando uma redução na emissão de HC à

medida em que a carga aumenta. É mais proveitoso utilizar o biodiesel em cargas intermediárias (entre 1 kW e 4,5 kW), onde a emissão de HC foi totalmente nula.

Avaliando apenas o diesel, os valores de HC diferiram para todas as cargas aplicadas, exceto para 6 kW, onde não foram encontradas diferenças significativas entre si. O valor de HC diminuiu à medida que o valor da carga aumentava.

Orben (2024) observou que, independentemente da matéria-prima vegetal utilizada, os biodieseis de canola refinado, canola extravirgem, soja refinado e soja extravirgem apresentaram emissões de HC muito similares, sendo sempre maiores para o diesel do que para os biodieseis, e com redução do valor à medida em que o valor da carga aumenta.

Simsek (2020) observou uma redução nas emissões de HC quando se mistura biodiesel com diesel.

5. CONCLUSÕES

Comparando o diesel e o biodiesel de nabo forrageiro, não foram encontradas diferenças significativas no consumo de combustível e na energia consumida.

Quanto às propriedades físico-químicas, o biodiesel apresentou ponto de fulgor mais elevado que o diesel, com menor presença de aromáticos totais e benzeno, não sendo encontrados resíduos de água e sedimentos. Também foi encontrado maior teor de ésteres, olefinas totais e tolueno, sendo que a viscosidade e a massa específica ficaram ligeiramente acima do especificado pela ANP. O ponto de congelamento do biodiesel foi maior que o diesel.

A respeito da emissão de gases, o biodiesel apresentou redução na emissão de óxidos nitrosos (NOx), leve decréscimo no valor de monóxido de carbono (CO), emissão de hidrocarbonetos (HC) praticamente nula e valores de dióxido de carbono (CO₂) maiores que o diesel, porém com menor impacto ambiental pelo fato do biodiesel ser proveniente de origem vegetal, sendo sua molécula facilmente reciclada pelas plantas através do ciclo do carbono.

Diante dos resultados obtidos, o comportamento do motor gerador diesel operando com biodiesel de nabo se mostrou bastante similar em relação ao diesel de origem fóssil, incluindo a emissão dos gases durante o funcionamento, sinalizando que este biodiesel tem grande potencial de uso como combustível em motores diesel, sem a necessidade de alterações estruturais no motor para a sua operação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. A. P.; BASSOTO L. P. Desempenho entre Motores Ciclo Diesel: Utilização de Óleo de Diesel e Biodiesel. **Revista Científica Interdisciplinar**. v. 6, n. 1, 2021, p. 5. DOI: [https:// doi.org/10.51721/2526-4036/v6n1a11](https://doi.org/10.51721/2526-4036/v6n1a11).
- ALBUQUERQUE, M. C. G *et al.* Properties of biodiesel oils formulated using different biomass sources and their blends. **Renewable Energy**, v. 34, p. 857-859, 2009. DOI: [https:// doi.org/10.1016/j.rser.2022.112391](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112391).
- AL-JABIRI, A. A. *et al.* Applied AMT machine learning and multi-objective optimization for enhanced performance and reduced environmental impact of sunflower oil biodiesel in compression ignition engine. **International Journal of Thermofluids**, v. 24, p. 100838, 2024. DOI: [https:// doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100838](https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100838)
- ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2024**. 2024. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2024>>. Acesso em 01 jan. 2025
- ATTIA, A. M. A.; HASSANEEN, A. E. Influence of diesel fuel blended with biodiesel produced from waste cooking oil on diesel engine performance. **FUEL**, v. 167, p. 316–328, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.064>.
- ÁVILA, R.N.A.; SODRÉ, J. R. Physical–chemical properties and thermal behavior of fodder radish crude oil and biodiesel. **Industrial Crops and Products**, v. 38, p. 54-57, 2012. DOI: [http:// dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.007)
- AYOOLA, A. A. *et al.* Biodiesel fuel production processes: a short review. *In: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 2021, Nigéria. Resumos. Nigéria: IOP Publishing, 2021, p. 012151. DOI: [http:// dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012151](http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012151).
- BARI, S. Performance, combustion and emission tests of a metro-bus running on biodiesel-ULSD blended (B20) fuel. **Applied Energy**, v. 124, p. 35–43, 2014. DOI: [http:// dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.007).
- BERAN, F. H. B. **Degradabilidade in situ e digestibilidades de alguns componentes nutritivos de rações contendo torta de nabo forrageiro em bovinos**. 2024. Tese (Doutorado em Ciência Animal). Universidade Estadual de Londrina. Londrina. Paraná. 2024
- BUENO, J. B.; RODRIGUES, G. A. Palha sobre o solo no crescimento da cultura do nabo forrageiro em área degradada. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 370-377, 2019. DOI: [https:// doi.org/10.1590/S0100-204X2009001000017](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001000017)
- CANUTO E; MAZZA D; NOVARA, C. Projection of the Airborne CO₂ Concentration by Land/Ocean Absorption Dynamics and Fossil-Fuel Reserve Depletion.

Environmental Modeling & Assessment, v. 29, p. 1167–1187, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10666-024-09985-7>.

CARDOSO, T. S. *et al.* Uma revisão da utilização de catalisadores heterogêneos para a produção de biodiesel. **Brazilian Applied Science Review**. v. 4, n. 1, p. 240-276 jan/fev, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34115/basrv4n1-016>.

DIAS, C. B. **Uma sequência de ensino investigativa para o ensino e a aprendizagem dos conceitos de “massa” e “peso”: análise do engajamento disciplinar produtivo dos alunos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Educação para Ciências e Matemática). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Jataí, Goiás, 2019

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética. 2024. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 03 jan. 2025.

FERREIRA, G. V. *et al.* Desempenho de Biodiesel com Óleo de Uva Operando em um Motor Gerador com Blendas de Diesel. **Anais do City Farm**, v. 1, n. 1, 2^a Edição, 2022.

FILHO, O. F. *et al.* Adubação Verde e Plantas de Cobertura no Brasil: fundamentos e prática. V. 2. **Embrapa**. 2023. Disponível em <<https://dspace.unisa.br/bitstreams/d7556dac-4de7-45b7-9408-c74395b1ab2b/download>>, Acesso em 15 jul. 2024.

GOMES, G. C.; FALCO, L. R. R.; SEVERINO, M. C. Análise Integrativa sobre o uso de Biocombustíveis em Motores de Combustão Interna: Desempenho, Emissões e Durabilidade. **Revista Contemporânea**, v. 4, n. 11, p. e6657-e6657, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.56083/RCV4N11-126>.

GONGORA, B. **Desempenho e Emissões de Motor Gerador Utilizando Biodiesel de Cártamo**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2021.

HANSEN, P. H. *et al.* Forage Turnip: Potential of the Species as a Soil Decompactor, Nutrient Recycler and Biomass Producer. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, e11612239863, 2023, DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i2.39863>

HYPOLITO, M. L. *et al.* Produção e caracterização das misturas do diesel com biodiesel de óleo de milho. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1-16, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n4e8872> e-ISSN: 2176-9168. 2020

KAKATI, J.; GOGOI, T. K. Biodiesel production from Kutkura (*Meyna spinosa* Roxb. Ex.) fruit seed oil: Its characterization and engine performance evaluation with 10% and 20% blends. **Energy Conversion and Management**, v. 121, p. 152–161, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.019>.

KUL, B.S.; KAHRAMAN, A. Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with biodiesel-diesel blends containing 5% bioethanol. **Entropy**, v.18, p. 387, 2016.

MALODE, S. J. *et al.* Recent advances and viability in biofuel production. **Energy Conversion and Management: X**, v. 10, n. 2020, p. 100070, 2021. DOI: 10.1016/j.ecmx.2020.100070.

MATHEIS, H. A. S. M.; AZEVEDO, F. A.; FILHO, R. V. Adubação verde no manejo de plantas daninhas na cultura de citros. **Citrus Research & Technology**, v. 27, n. 1, p. 0-0, 2020.

MENEGAES, J. F.; STEFANELLO, R., NUNES, R. N. Sementes: foco em pesquisa sobre qualidade fisiológica e sanitária. Nova Xavantina, MT: Pantanal, v. 2, p. 4-156, 2024. DOI [https:// doi.org/10.46420/9786585756280](https://doi.org/10.46420/9786585756280)

MUELLER, S.; DENNISON, G.; LIU, S. An assessment on ethanol- blended gasoline/diesel fuels on cancer risk and mortality. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 18, n. 13, p. 6930, 2021 DOI: [https:// doi.org/10.3390/ijerph18136930](https://doi.org/10.3390/ijerph18136930).

NAYAK, C.; PATTANAIK, B. P.; NAYAK, S. K. Effect of preheated jatropha oil and jatropha oil methyl ester with producer gas on diesel engine performance. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 9, p. 1709-1722, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.15282/ijame.9.2013.20.0142>

NEIVA, M. O. **Impacto das propriedades físico-químicas de diferentes misturas de biodiesel e diesel no funcionamento de motores do ciclo diesel**. Projeto de final de curso apresentado à Escola de Química - UFRJ/EQ, 2022.

NOBRE, F. L. L. *et al.* Desempenho e caracterização de biodiesel de cártamo em blendas com diesel puro em conjunto motogerador. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 5, p. 2525-3409. 2023. DOI: [https:// dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i5.41471](https://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i5.41471).

ONU. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2022. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs> >. Acesso em: 22 jul. 2024.

ORBEN, J. M. C. **Potencial de geração e emissões em motor gerador utilizando diesel e biodiesel de canola e soja**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2024

RAHBARI, H. *et al.* Bio-Oil Production from Sargassum Macroalgae: A Green and Healthy Source of Energy. **Jundishapur Journal of Health Science**, v. 11, p. 84301,2019. DOI: JY.

REIS, L. S. **Caracterização Físico-química e Desempenho de Motor Gerador Operando com Blendas de Diesel/Óleo de Crambe**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022.

SABOIA, S. A *et al.* Sistema radicular del nabo en descompresión del suelo cultivado en una maceta de poliuretano expandible. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 11, p. e7941-e7941, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n11-212>.

SALA, J. A. **Comportamento de um Motor de Ciclo Diesel com Diferentes Configurações de Injeção e Misturas de Biodiesel**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. Rio Grande do Sul. 2020

SANTOS, R. F. **Culturas Energéticas**. v. 1 ed. EDUNIOESTE, Editora da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Conselho Editorial da Unioeste. 2018. Disponível em: < www.edunioeste.br/editora >. Acesso em: 25 ago. 2023

SANTOS, T. K.; **Caracterização Físico-química e Desempenho de Motor Gerador Operando com Blendas de Biodiesel Óleo de Gergelim**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2023.

SARIN, A. *et al.* Study of kinematic viscosity and density of biodiesels exposed to radiations. **Materials Today: Proceedings**. v. 46, p. 5516–5522, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.257>.

SHEFALI, A. The Inherent Grave Consequences of Glacial Retreat. **Nature Environment and Pollution Technology**. 2022. v. 21, n. 4, p. 1619-1627 DOI: <https://doi.org/10.46488/NEPT.2022.v21i04.014>

SILVA *et al.* Produtividade de Cultivares de Nabo Forrageiro em Cultivo Solteiro e Consorciado com Pinhão-Manso. **Revista de Ciências Exatas e da Terra UNIGRAN**, v. 2, n. 2, p. 56 – 63. 2013

SILVEIRA, V. B. **Comparação de Desempenho e Emissões de um Motor Gerador Operando com Diesel e Blendas de Biodiesel Monitorado por Sistemas de Automação**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2021.

SILVESTRE, W. P. **Conversão Termoquímica de Bagaço de Semente de Nabo Forrageiro (BSNF) em um Reator Rotativo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, R.S., 2016

SIMSEK, S. Effects of biodiesel obtained from Canola, sefflower oils and waste oils on the engine performance and exhaust emissions. **Fuel**, v. 265, p. 117026, 2020.

SOUZA, D. M. **Avaliação de Extratos Naturais na Estabilidade Termo-oxidativa do Biodiesel e Antimicrobiana na Fermentação Alcoólica**. 2019. Dissertação (Mestrado em Bioenergia). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2019.

STEVANATO, N. *et al.* POTENCIAL DO NABO FORRAGEIRO PARA BIODIESEL:

EXTRAÇÃO DO ÓLEO E PRODUÇÃO DE ÉSTERES. **Uningá Review**, v. 35, p. eRUR2872-eRUR2872, 2020. DOI: <https://doi.org/10.46311/2178-2571.35.eRUR2872>.

TAVARES, S. T. **Desempenho de Trator Agrícola em Função das Proporções de Mistura e Tipo de Combustível**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. 2022.

Anexo 1 - Especificação do Biodiesel - Resolução ANP Nº 920 DE 04/04/23.

Ensaio	Unidade	Método	Especificação
ASPECTO	-	VISUAL	L. I. I.
COR VISUAL	-	VISUAL	AMARELO
MASSA ESPECÍFICA A 20°C	Kg/m ³	ASTM D 4052	820 a 853,0
PONTO DE FULGOR	°C	ASTM D 93	38 mín.
ÁGUA SEDIMENTOS % (BSW)	%	ASTM D 1796	0,05 max.
PONTO DE CONGELAMENTO	°C	ASTM D 97	N.A.
VISCOSIDADE A 40°C	cSt	ASTM D 445	1,5 a 6,0
ÉSTER	%	INFRAVERMELHO	N.A.
AROMÁTICOS TOTAIS	%	INFRAVERMELHO	N.A.
OLEFINAS TOTAIS	%	INFRAVERMELHO	N.A.
BENZENO	%	INFRAVERMELHO	N.A.
TOLUENO	%	INFRAVERMELHO	N.A.
GLYCEROL	%	INFRAVERMELHO	N.A.
CORROSIVIDADE AO COBRE	-	ASTM D 130	N.A.
ÁGUA POR KARL FISCHER	PPM	ASTM D 6304	200,0 max.

Fonte: O autor (2023).

N.A.: Não Aplicável

L. I. I.: Límpido e Isento de Impurezas

Anexo 2 – Certificado da análise química do biodiesel de nabo.

 LABORATÓRIO DE COMBUSTÍVEIS <i>desde 1999</i> www.poolab.com.br					CERTIFICADO DE ANÁLISE N.R. 15560/2023	
PRODUTO : BIODIESEL DE NABO - BLEND A 100						
CLIENTE : CELINO GERALDO DO CARMO - CASCAVEL - PR						
AMOSTRADOR : REGINALDO			Amostra:		29/05/2023	
LOCAL DE COLETA : PESQUISA CIENTÍFICA			Recebimento:		10/06/2023 14:00	
			Emissão:		20/11/2023 14:15	
ENSAIOS	UNIDADE	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO		
ASPECTO	-	VISUAL	L.I.I.	L.I.I.		
COR VISUAL		VISUAL	AMARELO	AMARELO		
MASSA ESPECÍFICA A 20°C	Kg/m ³	ASTM D 4052	820 a 853,0	878,6		
PONTO DE FULGOR	°C	ASTM D 93	38 min.	171,0		
ÁGUA SEDIMENTOS % (BSW)	%	ASTM D 1796	0,05 máx	AUSENTE		
PONTO DE CONGELAMENTO	°C	ASTM D 97	N.A.	<-5		
VISCOSIDADE A 40°C	cSt	ASTM D 445	1,5 a 6,0	6,147		
ÉSTER	%	INFRAVERMELHO	N.A.	96,74		
AROMÁTICOS TOTAIS	%	INFRAVERMELHO	N.A.	1,29		
OLEFINAS TOTAIS	%	INFRAVERMELHO	N.A.	24,10		
BENZENO	%	INFRAVERMELHO	N.A.	0,01		
TOLUENO	%	INFRAVERMELHO	N.A.	11,29		
GLYCEROL	%	INFRAVERMELHO	N.A.	6,264		
CORROSIVIDADE AO COBRE		ASTM D 130	N.A.	1A		
ÁGUA POR KARL FISCHER	PPM	ASTM D 6304	200,0 máx.	579,0		
N.A. = Não Aplicável. L.I.I. = Limpo e Isento de Impurezas.						
Observação: _____ _____ _____						
<small>Os resultados destes ensaios têm significado restrito e se aplicam tão somente a amostra entregue pelo interessado.</small>						
CONCLUSÃO: _____ _____ _____						



Químico Responsável
 Roberto Silva
 CRQ: 13400328 13ª Região

Rua Benjamin Dagnoni, 905 – Rio do Melo – Sala 01
 CEP 88.316–100 Itajaí SC.
 Telefone: (47) 3346-1088
 Email: poolab@poolab.com.br

Anexo 3 – Certificado da análise química do óleo diesel S10.

 LABORATÓRIO DE COMBUSTÍVEIS <i>desde 1999</i> www.poolab.com.br				
CERTIFICADO DE ANÁLISE N.R.				15561/2023
PRODUTO : DIESEL PURO				
CLIENTE : CELINO GERALDO DO CARMO - CASCAVEL - PR				
AMOSTRADOR : REGINALDO		Amostra: 29/05/2023		
LOCAL DE COLETA : PESQUISA CIENTÍFICA		Recebimento: 10/06/2023		14:00
		Emissão: 20/11/2023		14:20
ENSAIOS	UNIDADE	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
ASPECTO	-	VISUAL	L.I.I.	L.I.I.
COR VISUAL		VISUAL	AMARELO	AMARELO
MASSA ESPECÍFICA A 20°C	Kg/m ³	ASTM D 4052	820 a 853,0	853,9
PONTO DE FULGOR	°C	ASTM D 93	38 min.	55,0
ÁGUA SEDIMENTOS % (BSW)	%	ASTM D 1796	0,05 máx	AUSENTE
PONTO DE CONGELAMENTO	°C	ASTM D 97	N.A.	-17
VISCOSIDADE A 40°C	cSt	ASTM D 445	1,5 a 6,0	2,555
ESTER	%	INFRAVERMELHO	N.A.	3,10
AROMÁTICOS TOTAIS	%	INFRAVERMELHO	N.A.	9,39
OLEFINAS TOTAIS	%	INFRAVERMELHO	N.A.	0,65
BENZENO	%	INFRAVERMELHO	N.A.	0,06
TOLUENO	%	INFRAVERMELHO	N.A.	0,00
GLYCEROL	%	INFRAVERMELHO	N.A.	1,412
CORROSIVIDADE AO COBRE		ASTM D 180	N.A.	1A
ÁGUA POR KARL FISCHER	PPM	ASTM D 6304	200,0 máx.	63,1
N.A. - Não Aplicável. L.I.I. - Limpo e Isento de Impurezas.				
Observação:				
<small>Os resultados destes ensaios têm significado restrito e se aplicam tão somente a amostra entregue pelo interessado.</small>				
CONCLUSÃO:				



Químico Responsável
 Roberto Silva
 CRQ: 13400326 13ª Região

Rua Benjamin Dagnoni, 905 – Rio do Melo – Sala 01
 CEP 88.316–100 Itajaí SC.
 Telefone: (47) 3346-1088
 Email: poolab@poolab.com.br