



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Departamento de Engenharia Mecânica

Engenharia Mecânica

EDILSON EUGENIO DA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO USO DE BIODIESEL
BRASILEIRO EM GRUPOS GERADORES DE PEQUENO PORTE**

Recife

2024

EDILSON EUGENIO DA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO USO DE BIODIESEL
BRASILEIRO EM GRUPOS GERADORES DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito final à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa
Coorientadora: Prof.^a Dr. Andrezza Carolina Carneiro Tomás

Recife

2024

S586a
2025

Silva, Edilson Eugênio da.
Análise do desempenho energético do uso de biodiesel brasileiro em grupos geradores de pequeno porte / Suely Marilene da Silva. --- Recife: O autor, 2024. 85f. il. Color.

TCC (Curso de Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, 2025.

Inclui Referências.

Orientador: Professor Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa

Coorientador: Professora Dra. Andrezza Carolina Carneiro Tomás

1. Engenharia Mecânica. 2. Biodiesel. 3. Eficiência energética. 4. Combustíveis alternativos. I. Título. II. VILLA, Alvaro Antonio Ochoa (orientador). III. TOMÁS, Andrezza Carolina Carneiro (coorientadora). IV. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1 (21ed.)

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO USO DE BIODIESEL
BRASILEIRO EM GRUPOS GERADORES DE PEQUENO PORTE**

Trabalho aprovado. Recife, 18 de setembro de 2025.

Prof. Alvaro Antonio Ochoa Villa

Andrezza Carolina Carneiro Tomás

José Ângelo Peixoto da Costa

Daniel Rodríguez López

Recife

2024

Em memória do meu pai,
José Edilson da Silva, um dos meus maiores
incentivadores na mecânica e na vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo o que tem feito e por tudo que irá fazer.

Aos meus pais, José Edilson da Silva e Édna Maria de Lima Silva, que não mediram esforços para investir nos meus estudos com longas jornadas de trabalho ao longo da semana, sempre abdicando para garantir o melhor para mim.

À minha irmã, Édla Édna da Silva, caçula que sempre me fez rir durante as inúmeras conversas, até mesmo nos momentos ruins. A qual admiro e tenho imenso orgulho da trajetória que tem feito na Fonoaudiologia.

Aos meus familiares, importantes para minha vida por também participarem do meu processo de desenvolvimento pessoal.

A todos os meus amigos, em especial a Edryel, Carlos, Cleberson, Paulo, Marvin, Alex, Francisco, Leonardo e Fernada. Os quais dividiram comigo momentos ímpares durante essa importante trajetória. Desde os que fizeram parte do meu ensino médio até aos que a amizade se construiu na época do bacharelado em física. Todos vocês me influenciaram de forma positiva.

Ao meu orientador, Álvaro Ochoa, pela confiança, conhecimentos e experiências, um grande amigo, professor e pesquisador.

Aos professores Ângelo, Andrezza, George, Fred, Lídice, Heber, Urbano, Jacek, Clóvis, Tiago e todos os demais professores da Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Pernambuco cujo se eu os citasse não caberiam aqui.

E ao próprio Instituto Federal de Pernambuco por todos os apoios e incentivos que tive a oportunidade de ter a partir dos eixos de ensino, pesquisa e extensão.

“Aprender é a única coisa que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.” Leonardo da Vinci

RESUMO

O uso de combustíveis fósseis, como o diesel, em sistemas de geração de energia é uma das principais fontes de emissões de poluentes, destacando a necessidade de alternativas mais limpas e sustentáveis. Nesse cenário, o biodiesel surge como uma solução viável, especialmente em setores onde a eficiência energética e a redução de impactos ambientais são primordiais. O presente trabalho realiza uma análise detalhada do uso de biodiesel brasileiro em grupos geradores de pequeno porte, focando em seu desempenho energético comparado ao diesel convencional. A pesquisa tem como objetivo principal verificar a viabilidade energética e ambiental da utilização do biodiesel como combustível alternativo, visando a redução de emissões poluentes e o aumento da eficiência energética em áreas rurais e setores onde o diesel é amplamente utilizado. Foram realizados testes com diversas misturas de biodiesel e diesel em um gerador de pequeno porte, observando parâmetros como temperatura do motor, rotação, vibração, consumo de combustível e eficiência térmica. Os resultados mostraram que a mistura de 50% biodiesel e 50% diesel se destacou pela melhor relação entre consumo e desempenho, enquanto o uso de 100% biodiesel aumentou o consumo de combustível. A pesquisa conclui que o biodiesel é uma alternativa viável, mas que otimizações são necessárias para maximizar sua eficiência em motores geradores, especialmente em termos de consumo e controle de emissões. Este estudo contribui para o desenvolvimento de soluções sustentáveis no setor energético brasileiro, especialmente no contexto de pequenos produtores rurais e indústrias locais.

Palavras-chave: biodiesel; eficiência energética; grupos geradores; combustíveis alternativos; emissões.

ABSTRACT

The use of fossil fuels, such as diesel, in energy generation systems is one of the leading sources of pollutant emissions, emphasizing the need for cleaner and more sustainable alternatives. In this context, biodiesel emerges as a viable solution, particularly in sectors where energy efficiency and environmental impact reduction are crucial. This study provides a detailed analysis of Brazilian biodiesel in small-scale generators, focusing on its performance compared to conventional diesel. The main goal of this research is to evaluate the energy and environmental feasibility of using biodiesel as an alternative fuel, aiming to reduce pollutant emissions and improve energy efficiency in rural areas and sectors where diesel is commonly used. Tests were conducted using various biodiesel-diesel blends, evaluating parameters such as engine temperature, rotation, vibration, fuel consumption, and thermal efficiency. Results showed that a 50% biodiesel and 50% diesel mixture offered the best balance between consumption and performance, while 100% biodiesel increased fuel consumption. The research concludes that biodiesel is a viable alternative, but optimizations are required to maximize generator engine efficiency, particularly in terms of fuel consumption and emission control. This study contributes to the development of sustainable energy solutions in Brazil, especially for rural producers and local industries.

Keywords: biodiesel; energy efficiency; generators; alternative fuels; emissions.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANP: Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis

ANNs: Artificial Neural Networks (Redes Neurais Artificiais)

B: Mistura de Biodiesel

B100: 100% Biodiesel

B20: 20% Biodiesel

B40: 40% Biodiesel

B5: 5% Biodiesel

B80: 80% Biodiesel

BSFC: Brake Specific Fuel Consumption (Consumo Específico de Combustível de Frenagem)

BTE: Brake Thermal Efficiency (Eficiência Térmica de Frenagem)

CETENE: Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

CTA: Centro de Tecnologia Automotiva

D: diesel

D100: 100% diesel

D30: 30% diesel

D50: 50% diesel

D70: 70% diesel

D75: 75% diesel

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

FP: Fator de Potência

FLIR: Forward-Looking Infrared (Marca de Câmeras Termográficas)

GMG: Grupo Motor Gerador

h: Coeficiente Convectivo

H: Altura

HC: Hidrocarbonetos

IFPE: Instituto Federal de Pernambuco

kW: Quilowatt

LCA: Avaliação do Ciclo de Vida

lm: Lúmen (Unidade de Fluxo Luminoso)

ṁ: Vazão mássica

MCTI: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

m/s: Metros por Segundo

mg: Miligrama

NETD: Noise Equivalent Temperature Difference (Diferença de Temperatura Equivalente ao Ruído)

NO_x: Óxidos de Nitrogênio

PIBIC: Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica

ppm: Partes por Milhão ou em mg/kg.

Q: Fluxo de Calor

RS: Interface de comunicação

RPM: Rotações por Minuto

SFB5: Mistura com 5% de Biodiesel de Sterculia foetida

UFPEL: Universidade Federal de Pelotas

UFPE: Universidade Federal de Pernambuco

UR: Umidade Relativa

v/v: Volume por Volume

W: Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Motivação.....	14
1.3	Objetivos.....	15
1.3.1	Objetivo geral.....	15
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
1.4	Estrutura do Trabalho de Conclusão de Curso	16
2	ESTADO DA ARTE.....	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
3.1	Óleo diesel.....	29
3.1.1	Biodiesel.....	31
3.2	Grupo Gerador.....	33
3.2.1	Motor diesel.....	33
3.2.2	Grupo Motor Gerador.....	35
4	METODOLOGIA.....	37
4.1	Localização do experimento.....	38
4.2	Esquema geral.....	38
4.3	Aparato Experimental.....	39
4.3.1	Motor.....	39
4.3.2	Lâmpadas.....	41
4.3.3	Reatores.....	42
4.3.4	Bancada móvel.....	44
4.3.5	Óleo diesel S10.....	46
4.3.6	Biodiesel de algodão.....	46
4.4	Instrumentos e sensores.....	46
4.5	Amostras utilizadas.....	54
4.6	Execução dos testes para a coleta de dados.....	55
4.7	Análise dos dados coletados.....	56
4.7.1	Fórmulas.....	56
5	RESULTADOS.....	58

5.1	Resultados sem carga aplicada.....	58
5.1.1	Temperatura do bloco de motor.....	58
5.1.2	Temperatura do escapamento.....	60
5.1.3	Rotação do motor.....	60
5.1.4	Consumo.....	61
5.2	Resultados com carga aplicada.....	62
5.2.1	Temperatura do bloco do motor.....	63
5.2.2	Temperatura do escapamento.....	63
5.2.3	Rotação do motor.....	64
5.2.4	Consumo.....	65
5.3	Cálculo da energia gerada no sistema com carga.....	66
5.4	Fluxo de calor produzido pelo combustível.....	67
5.4.1	Densidade das misturas.....	67
5.4.2	Cálculo do Poder Calorífico Inferior	67
5.4.3	Cálculo da Vazão Mássica dos Gases de Escape.....	68
5.4.4	Cálculo do calor fornecido pelos gases na exaustão.....	69
5.4.5	Energia Química Total Disponível no Combustível.....	70
5.4.6	Eficiência Global Experimental do Sistema Motor-Gerador.....	71
5.4.7	Calor dissipado por convecção das Superfícies do Motor.....	73
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	77
6.1	Conclusões.....	77
6.2	Trabalhos futuros.....	79
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

As demandas por energia têm aumentado significativamente em todo o mundo, seguido por aumentos nas tarifas de energia elétrica devido à utilização de termelétricas e recursos não renováveis, como petróleo e outros combustíveis fósseis. Este cenário tem motivado a busca por novas tecnologias e configurações que possam satisfazer as demandas globais e reduzir os custos associados à geração adicional. O principal objetivo é extrair o máximo potencial termodinâmico dos recursos consumidos por meio de estratégias de eficiência energética e diminuir o impacto ambiental associado aos serviços de energia (Marques *et al.*, 2020).

Existe, no Brasil, uma necessidade em manter a matriz energética diversificada com o intuito de garantir, com segurança, o fornecimento de energia a diversos setores (industrial, residencial, comercial, transportes, entre outros), de modo que os sustentem, em termos de quantidade e disponibilidade de energia (Preilipper *et al.*, 2016). A previsão é que a demanda global por energia crescerá 62% até 2050 e que no Brasil a demanda por energia alcance 3,6% ao ano até 2029 (Empresa de Pesquisa Energética, 2017). O melhor aproveitamento da energia tem sido um fator essencial para a economia energética e, sobretudo, para reduzir a poluição do meio ambiente. O aumento das tarifas elétricas integrado ao alto consumo de energia, e a altos custos de instalação de novas centrais de geração de energia elétrica, resulta em uma pressão significativa sobre a economia, que pode levar ao encarecimento de bens e serviços, comprometendo a competitividade industrial e a qualidade de vida da população, além de aumentar a dependência de fontes energéticas não renováveis e agravar questões ambientais.

Todavia o país tem enfrentado crises de energia cíclicas ao longo dos anos. Em alguns pontos, houveram blecautes e em outros uma crise, causada devido ao uso da energia termelétrica, o que é aproximadamente seis vezes mais cara do que a energia hidrelétrica, o setor industrial e os consumidores residenciais têm enfrentado sobretaxas altas. Mesmo em tempos de baixo crescimento econômico, observa-se que a oferta interna de energia diminuiu 2,2% (Empresa de Pesquisa

Energética, 2021), o que mostra que a conexão entre a oferta e a demanda sempre apresenta desafios quando se fala em energia.

Assim, a poligeração tem um lugar importante nos estudos de pesquisa devido às flutuações nos cenários de energia e tecnologias aplicadas. O presente trabalho faz parte de um projeto maior e tem por objetivo conceber um sistema de refrigeração de alimentos, para pequenos produtores rurais, acionados por um grupo gerador a diesel. A hipótese tem como ponto de partida a estimativa de que o produtor tenha menos perdas em seu trabalho, como também aumentar a disponibilidade e a segurança da energia elétrica ao usuário, uma vez que esta chega a ser escassa ou de baixa qualidade no serviço de áreas rurais.

1.1 Justificativa

A motivação para este trabalho surge do cenário atual em que as demandas por energia estão crescendo de forma significativa em todo o mundo, acompanhadas por aumentos nas tarifas de energia elétrica, especialmente devido ao uso de hidrelétricas e combustíveis fósseis, como o diesel. Diante desse contexto, a busca por novas tecnologias que possam não só atender essas demandas crescentes, mas também reduzir os custos e o impacto ambiental, torna-se essencial.

No Brasil, essa necessidade é ainda mais evidente, uma vez que o país enfrenta desafios recorrentes no setor energético, com crises que afetam tanto o setor industrial quanto os consumidores residenciais. A energia gerada por termelétricas, por exemplo, é consideravelmente mais cara, o que acaba resultando em sobretaxas para a população. Além disso, a qualidade e a disponibilidade da energia no meio rural ainda são problemáticas, o que impacta diretamente pequenos produtores, que muitas vezes sofrem com perdas de produção devido à falta de uma infraestrutura energética adequada.

1.2 Motivação

O presente trabalho é motivado pelo desejo de contribuir para a solução dos problemas expostos, desenvolvendo um sistema de refrigeração de alimentos para pequenos produtores rurais, acionado por um grupo gerador a diesel. Logo, a ideia é

oferecer uma solução que não apenas minimize as perdas agrícolas, mas que também melhore a disponibilidade e a segurança da energia elétrica nessas áreas, proporcionando uma melhor qualidade de vida para os produtores e garantindo a continuidade de seus trabalhos. Assim, o objetivo é aliar a eficiência energética à sustentabilidade, em um contexto em que isso, mais do que necessário, é urgente.

Todas as atividades deste trabalho de conclusão de curso foram desenvolvidas em colaboração com o grupo de pesquisa em sistemas termo-fluido mecânicos inteligentes (STFMI) da Coordenação de Refrigeração e Climatização do Instituto Federal de Pernambuco, localizado no Bloco F do campus Recife.

Além disso, o trabalho é fortemente motivado pelas pesquisas anteriores realizadas no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do IFPE, onde estudos conduzidos por Davi Campos Barbosa e Rafael Barbosa Moreira Monteiro, sob a orientação dos professores Andrezza Carolina Carneiro Tomás e Álvaro Antônio Ochoa Villa, trouxeram contribuições significativas. Davi conduziu experimentos para identificar a proporção ideal de diesel e biodiesel que otimizem a eficiência energética e minimizem as emissões de poluentes. Ele descobriu que uma mistura de 70% de diesel com 30% de biodiesel era a mais equilibrada, proporcionando bom desempenho e menor impacto ambiental. Paralelamente, Rafael explorou o uso de uma mistura de 50% de diesel e 50% de biodiesel em grupos geradores, revelando que essa combinação, além de ser energeticamente eficiente, trazia vantagens ambientais importantes, como a redução de emissões nocivas. Esses trabalhos não só ofereceram uma base técnica valiosa para este projeto, mas também reforçaram a viabilidade e a importância de se buscar soluções energéticas mais sustentáveis, que atendam às necessidades atuais com menos impactos ambientais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho energético de grupos geradores utilizando misturas de diesel e biodiesel como fonte alternativa renovável de acionamento.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar o levantamento bibliográfico sobre os sistemas de geração de energia – especificamente grupos geradores a diesel e biodiesel;
- Estudar e compreender os combustíveis diesel e biodiesel como fonte de acionamento do grupo gerador;
- Estudar e compreender o funcionamento de microcontroladores e atuadores;
- Estudar e compreender índices de impacto ambiental;
- Acoplar o motor a uma bancada resistiva e realizar as medições com a carga aplicada;
- Validar o modelo da bancada com os dados coletados no grupo gerador em função dos combustíveis utilizados;
- Realizar os testes com o Protótipo da Bancada de refrigeração.

1.4 Estrutura do Trabalho de Conclusão de Curso

O presente trabalho está estruturado por meio de seis capítulos. A introdução faz parte do capítulo I, que inclui a contextualização, problemática e objetivos e no capítulo II é possível encontrar uma breve relevância e aplicação de grupos geradores a diesel sobre motores de combustão interna a partir do estado da arte.

No capítulo III é apresentada a fundamentação teórica. Já no capítulo IV, dedicamo-nos à experimentação, detalhando os procedimentos metodológicos, as adaptações necessárias para o uso do motor com os aparatos experimentais empregados. Por fim, o capítulo V apresenta e discute os resultados obtidos em

relação aos objetivos pré-definidos e o capítulo VI traz as conclusões observadas, destacando os principais resultados alcançados.

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem o objetivo de apresentar um breve levantamento sobre a trajetória do biodiesel, assim como a relevância e aplicação de grupos geradores a diesel, visando estudos no âmbito nacional e internacional.

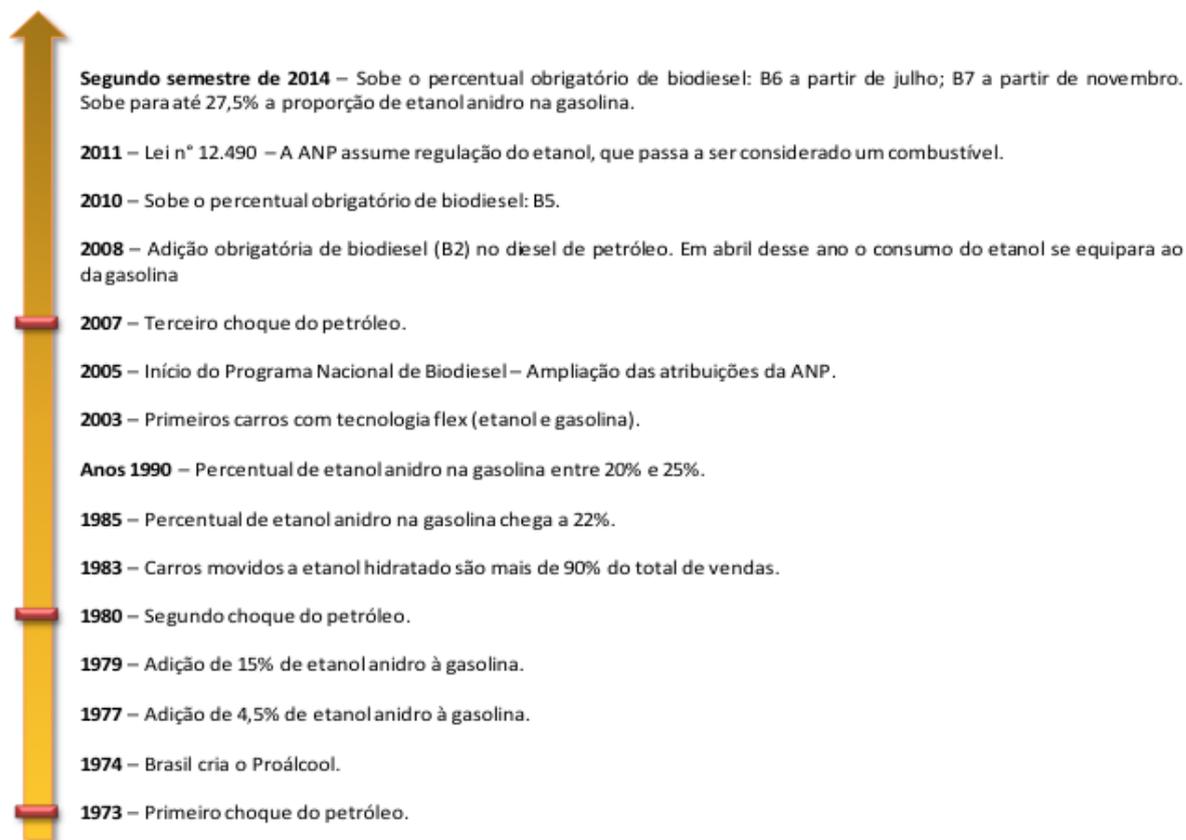
A evolução do biodiesel no Brasil é uma narrativa que abrange várias décadas, marcada por uma série de avanços tecnológicos, políticas públicas inovadoras, e desafios contínuos. Esta trajetória pode ser traçada desde os primeiros desenvolvimentos internacionais do biodiesel até sua consolidação como uma parte integral da matriz energética brasileira.

No cenário global, o biodiesel começou a ganhar destaque a partir da década de 1930, como Suarez e Meneghetti (2007) relatam, com a primeira patente registrada na Bélgica em 1937. Este período inicial foi caracterizado por experimentações e desenvolvimento de tecnologias básicas, como a transesterificação, que ainda hoje é uma das principais técnicas para a produção de biodiesel. No Brasil, o interesse pelo biodiesel foi renovado durante as crises de petróleo nas décadas de 1970 e 1980, culminando na criação de programas governamentais, como o PROÁLCOOL e o PROBIODIESEL, que promoveram a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias para a produção de biodiesel em larga escala (Figura 1).

Avançando para os anos 2000, o Brasil deu um passo significativo com a implementação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) em 2004, como relatado por Costa et al. (2024) e Esteves e Pereira (2016). Este programa estabeleceu a base regulatória e as metas para a inclusão do biodiesel na matriz energética do país, com um foco especial na inclusão social e no desenvolvimento regional. Esteves e Pereira (2016) destacam que o PNPB foi fundamental para impulsionar o crescimento do mercado de biodiesel no Brasil, com a soja emergindo como a principal matéria-prima, seguida pelo sebo bovino.

O programa também incentivou o uso de matérias-primas regionais, adaptando a produção às características agrônômicas de diferentes partes do país.

Figura 1. Evolução dos biocombustíveis no Brasil.



Fonte: Esteves, 2016 adaptado de Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2014.

Nos anos que se seguiram, a produção de biodiesel no Brasil cresceu significativamente. Costa *et al.* (2024) documentam o período de 2012 a 2022, quando a produção de biodiesel atingiu novos patamares, impulsionada por inovações tecnológicas e políticas governamentais robustas. Durante este período, o Brasil se consolidou como um dos maiores produtores mundiais de biodiesel, com um mercado que continua a expandir-se graças à antecipação de metas de mistura e ao aumento da capacidade produtiva.

No entanto, Esteves e Pereira (2016) apontam que, apesar dos sucessos, ainda há desafios importantes a serem enfrentados, como a necessidade de desenvolver novas matérias-primas não alimentícias e reduzir os custos de produção para garantir a competitividade a longo prazo.

Um estudo de Shirneshan et al. (2016) explora o uso de redes neurais artificiais (ANNs) como uma ferramenta preditiva para avaliar o desempenho de geradores a diesel alimentados com misturas de biodiesel. O biodiesel utilizado foi produzido a partir de óleo de cozinha residual, e os testes foram realizados em um gerador CAT3412 sob diferentes condições de carga. As variáveis de desempenho analisadas incluem a potência de frenagem, o torque de frenagem, o consumo específico de combustível de frenagem (BSFC) e a eficiência térmica de frenagem (BTE). Esse estudo conseguiu modelar essas variáveis com alta precisão, mostrando que as ANNs podem substituir com eficácia os experimentos laboratoriais tradicionais.

Os resultados obtidos indicam que as ANNs podem prever o desempenho de geradores a diesel com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,95 para todas as variáveis analisadas. Este nível de precisão sugere que a utilização de ANNs não apenas economiza tempo e recursos em comparação com testes experimentais, mas também fornece uma base sólida para a otimização das misturas de biodiesel. Especificamente, a pesquisa mostrou que a adição de biodiesel pode melhorar o desempenho em termos de potência e eficiência térmica, dependendo da carga do motor e da proporção de biodiesel na mistura.

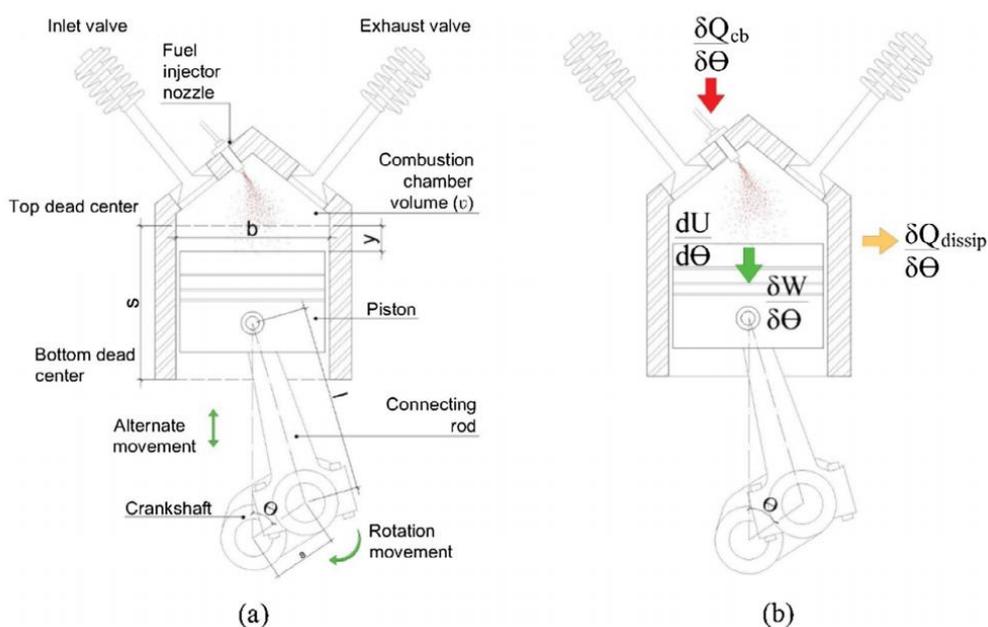
Este trabalho se destaca ao demonstrar que a inteligência artificial, por meio das redes neurais artificiais, pode ser uma ferramenta crucial para a avaliação e otimização do desempenho de motores utilizando combustíveis alternativos. Ao reduzir a necessidade de experimentos complexos e demorados, as ANNs permitem que pesquisadores e engenheiros testem e validem novas misturas de combustíveis de maneira mais eficiente e econômica. Assim, a pesquisa de Shirneshan contribui significativamente para a interseção entre tecnologias de combustíveis renováveis e inteligência artificial, abrindo novas possibilidades para o desenvolvimento de sistemas energéticos mais sustentáveis.

Novaes *et al.* (2018) motivados pela busca de soluções que reduzam as emissões de poluentes e melhorem a eficiência energética, apresentam uma investigação aprofundada sobre o desempenho de motores diesel utilizando misturas de diesel e biodiesel, com foco na simulação numérica e modelagem matemática. Sua metodologia adota um modelo zero-dimensional onde aplica a primeira lei da termodinâmica para descrever os processos de compressão, combustão e expansão

no cilindro do motor, considerando a transferência de calor através das paredes do cilindro, a energia liberada durante a combustão, e as propriedades termofísicas dos combustíveis, utilizando a função de Wiebe (Fórmula matemática usada para modelar a fração de massa queimada durante a combustão em motores de combustão interna, descrevendo o perfil de queima ao longo do tempo) para modelar a taxa de liberação de energia durante a combustão.

As análises foram realizadas em um motor diesel de quatro cilindros e quatro tempos, com dados de entrada obtidos de experimentos realizados anteriormente, permitindo assim, uma validação rigorosa do modelo (Figura 2).

Figura 2. Modelagem da câmara de combustão.



Fonte: Novaes *et al.* (2018)

O estudo também incluiu um estudo paramétrico que varia a proporção de biodiesel na mistura, o ângulo de início da combustão e a relação de equivalência, proporcionando uma visão abrangente dos efeitos dessas variáveis no desempenho do motor. As simulações mostraram que, quanto maior a proporção de biodiesel na mistura, ocorre uma diminuição significativa nos valores de pressão e temperatura dentro do cilindro. Tal redução ocorre devido ao menor poder calorífico do biodiesel

em comparação ao diesel, algo que impacta diretamente a energia liberada durante a combustão.

Seus dados também sugerem que, embora a utilização de biodiesel possa reduzir a eficiência térmica, ajustes na relação de equivalência podem compensar essa perda, resultando em um desempenho aceitável. As conclusões do estudo ressaltam a eficácia da simulação numérica como uma ferramenta valiosa para entender e otimizar o funcionamento de motores diesel com combustíveis alternativos, o que contribui significativamente para o avanço do conhecimento na área de biocombustíveis, destacando a necessidade de mais investigações para abordar os desafios associados à implementação do biodiesel em aplicações práticas.

Cavalcanti *et al.* (2019) avaliaram o desempenho de um motor diesel alimentado com diferentes proporções de biodiesel, empregando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) e testes de desempenho em um motor de seis cilindros sob diversas cargas (9, 18 e 27 kW) utilizando os combustíveis diesel classe S10 (com até 10 ppm de enxofre) e biodiesel, que era uma mistura de biodiesel de soja (17% v/v) e biodiesel de gordura amarela (83% v/v), desses combustíveis, foram produzidas cinco misturas com diferentes concentrações de biodiesel: 5%, 25%, 50%, 75% e 100% em volume.

Seus resultados indicaram que o uso de biodiesel pode reduzir significativamente as emissões de poluentes, além de destacar a importância da otimização das condições de operação do motor para maximizar a eficiência e minimizar os impactos ambientais. O estudo se alinhou com suas pesquisas anteriores e reforçaram os benefícios do biodiesel, a exemplo da redução das emissões de CO₂, assim como a melhoria na eficiência energética, e sugere implicações práticas para políticas energéticas e práticas industriais, enfatizando a adoção do biodiesel como uma estratégia para reduzir a pegada de carbono nos setores de transporte e geração de energia.

No entanto, limitações como a variabilidade nas propriedades dos combustíveis, assim como a degradação do biodiesel que também pode ocorrer devido a vários fatores, incluindo a oxidação, a presença de água e a exposição à luz e ao calor, podem afetar a estabilidade da mistura, levando à formação de produtos

de degradação que podem impactar negativamente suas propriedades de combustão e desempenho no motor.

Amaral *et al.* (2020) destacam a crescente adoção de biodiesel como componente de misturas com diesel convencional, gerando um interesse significativo na avaliação da estabilidade e qualidade desses blends, especialmente em regiões com condições climáticas desafiadoras. O estudo demonstrou que a umidade do ambiente de armazenamento exerce uma influência negativa nas propriedades das misturas de diesel/biodiesel, particularmente em composições com maior teor de biodiesel, como B15 e B20.

A pesquisa revelou que a degradação da qualidade do combustível é acentuada em ambientes úmidos, resultando em não conformidades em parâmetros críticos, como conteúdo de água, estabilidade oxidativa e contaminação total. Esses achados ressaltam a necessidade de um monitoramento rigoroso e de práticas de armazenamento adequadas para garantir a integridade do biodiesel e a eficiência dos motores que utilizam essas misturas.

Além disso, observaram que a composição do biodiesel também se mostrou determinante na qualidade das misturas, com diferentes fontes de matéria-prima apresentando variações significativas em termos de estabilidade oxidativa e resistência à degradação. A inclusão de aditivos antioxidantes foi identificada como uma estratégia potencial para melhorar a estabilidade das misturas em condições adversas.

No entanto, mesmo com a adição de antioxidantes, as misturas com alto teor de biodiesel não conseguiram atingir períodos de indução satisfatórios, especialmente em climas tropicais e equatoriais. Assim, a pesquisa enfatiza a importância de desenvolver diretrizes específicas para o uso de biodiesel em diferentes contextos climáticos, visando otimizar a qualidade e a performance dos combustíveis, além de mitigar os desafios associados ao seu armazenamento e manuseio.

O estudo de Mirhashemi (2020) explora as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) nos motores a diesel que utilizam diferentes misturas de biodiesel, pois são poluentes que afetam tanto o meio ambiente quanto a saúde das pessoas. Com o aumento da preocupação com o impacto ambiental, o biodiesel surge como uma alternativa para ajudar a reduzir as emissões de gases que contribuem para o efeito

estufa, já que é feito a partir de fontes renováveis. No entanto, é visto que o uso de biodiesel pode, paradoxalmente, aumentar as emissões de NOx em comparação com o diesel comum.

Mirhashemi (2020) analisou como diferentes combinações de biodiesel com outros combustíveis, como gasolina, etanol, hidrogênio e biogás, podem afetar essas emissões. Por exemplo, ao se misturar biodiesel com gasolina pode melhorar a queima do combustível, assim ajuda a reduzir as emissões de NOx. Adicionar hidrogênio ao biodiesel pode fazer com que a combustão seja mais completa, também reduzindo as emissões. Cada tipo de combinação teve suas próprias vantagens e desafios, e o estudo buscou entender quais são as melhores opções.

Outra abordagem que o estudo explora é a utilização de aditivos, como nanopartículas, que podem ser misturados ao biodiesel. Esses aditivos têm o potencial de melhorar o desempenho do combustível e, ao mesmo tempo, reduzir as emissões de NOx. No entanto, o sucesso dessa estratégia não é garantido e pode variar bastante. Isso porque a eficácia dos aditivos depende de vários fatores, como a composição específica do biodiesel que está sendo usado e as condições em que o motor opera, como a temperatura e a pressão.

Em outras palavras, não é uma solução simples, e o que funciona em um cenário pode não funcionar em outro. Embora o biodiesel tenha um grande potencial, seu uso não é isento de desafios. Ainda há questões a serem resolvidas, como garantir que o combustível seja estável, que ele funcione bem com os motores existentes e que a qualidade do biodiesel seja consistente. Além disso, para obter os melhores resultados, é necessário ajustar cuidadosamente os parâmetros do motor, como a injeção de combustível e a compressão.

O trabalho conclui que, embora o biodiesel e suas misturas tenham mostrado um grande potencial para reduzir as emissões de NOx, ainda há muito a ser explorado. Para realmente entender como essas misturas funcionam e como podemos otimizar sua formulação, é necessário continuar investigando. Os autores sugerem que os próximos passos devem incluir estudos mais aprofundados, especialmente em condições de uso real, fora do ambiente controlado do laboratório. Os testes de longo prazo são fundamentais para garantir que os resultados que parecem promissores no laboratório também se mantenham na prática do dia a dia.

Silveira (2021) realizou uma análise detalhada do desempenho e das emissões de um motor gerador utilizando diesel e diversas misturas de biodiesel, motivada pela busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis. O experimento, conduzido no Centro de Tecnologia Automotiva (CTA) da UNIOESTE, envolveu testes com um motor monocilíndrico de ciclo diesel operando com diesel de petróleo tipo A e seis diferentes misturas de biodiesel de canola. O motor foi submetido a cargas variando entre 1,0 kW e 6,0 kW, e os dados foram monitorados em tempo real por sistemas de automação, avaliando energia gerada, consumo específico, eficiência energética e emissões de gases.

Os resultados mostraram que o diesel apresentou o menor consumo específico, enquanto o biodiesel, especialmente em sua forma pura (B100), apresentou uma eficiência energética crescente em cargas mais altas, apesar de um desempenho inferior em termos de consumo específico. O uso de biodiesel resultou em menores emissões de CO, embora as emissões de CO₂ tenham aumentado com o incremento das cargas. A pesquisa conclui que, apesar dos desafios de desempenho, as vantagens ambientais do biodiesel o tornam uma opção promissora para a transição energética, destacando a importância de otimizar as misturas de biodiesel e continuar as investigações científicas na área.

O estudo realizado por Sebayang *et al.* (2022) investigou o uso de biodiesel derivado de **Sterculia foetida** em um motor diesel, com o objetivo de avaliar como essa alternativa sustentável influencia o desempenho do motor e as emissões de poluentes. O motor utilizado foi um modelo de 4 cilindros, típico em aplicações industriais e de transporte, conhecido por sua robustez e eficiência em operações prolongadas. Utilizando misturas que variaram de 5% a 30% de biodiesel com diesel convencional, os pesquisadores aplicaram técnicas avançadas de inteligência artificial, como redes neurais artificiais (ANNs) e máquinas de aprendizado extremo (ELMs), para prever o comportamento do motor sob diferentes condições de operação. As ELMs se mostraram particularmente eficazes, superando as ANNs tradicionais em termos de previsões, alcançando uma precisão de mais de 99% em aspectos críticos como consumo específico de combustível e eficiência térmica.

Entre as misturas testadas, a combinação com 5% de biodiesel (*SFB5*) se destacou por melhorar a eficiência térmica do motor e, ao mesmo tempo, reduzir

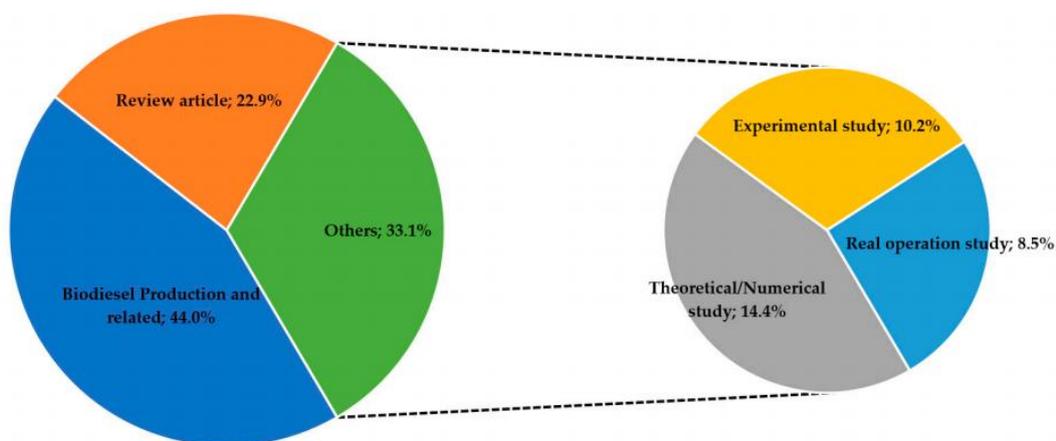
significativamente as emissões de poluentes como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e a opacidade da fumaça. No entanto, observou-se um aumento nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) com a maior presença de biodiesel, o que é comum devido às características de combustão do biodiesel. Mesmo assim, o estudo concluiu que o uso de *SFB5* poderia substituir o diesel puro sem comprometer o desempenho do motor, proporcionando benefícios ambientais relevantes.

Este trabalho oferece uma contribuição significativa ao demonstrar como a inteligência artificial pode ser usada de maneira eficaz para otimizar o uso de biocombustíveis em motores diesel. As descobertas sugerem que misturas moderadas de biodiesel, especialmente em motores industriais de 4 cilindros, não só são viáveis, como também podem representar um avanço significativo em termos de sustentabilidade, ajudando a equilibrar a necessidade de desempenho com a responsabilidade ambiental.

Souza *et al.* (2023), por meio de uma revisão crítica da literatura, apresentaram uma análise abrangente sobre a produção de biodiesel a partir de cultivares tropicais, destacando sua importância como alternativa renovável aos combustíveis fósseis e seu potencial para mitigar a degradação ambiental e as emissões de gases de efeito estufa. Identificando vários cultivos promissores a exemplo da palma, soja, algodão, mamona, entre outros adequadas a produção de biodiesel.

Em sua revisão pode-se observar que 44% dos estudos eram sobre produção de biodiesel e tópicos relacionados, 23% eram artigos de revisão sobre diferentes assuntos e 33% eram estudos experimentais, teóricos/numéricos e de desempenho real (Figura 3). Assim, os autores discutiram as vantagens e desvantagens do biodiesel, incluindo viabilidade econômica, eficiência energética e impactos ambientais, além de explorar suas aplicações práticas em motores de combustão interna. Concluem, adicionalmente, que a viabilidade do biodiesel como combustível, assim como suas misturas se mostram como alternativas eficazes aos combustíveis fósseis, contribuindo para uma matriz energética mais diversificada e sustentável.

Figura 3. Visão geral dos artigos encontrados na revisão da literatura



Fonte: Souza *et al.* (2022)

Também é dito que, com o uso de catalisadores adequados, é possível alcançar taxas de conversão de quase 100% dos óleos vegetais em biodiesel, o que não só melhora a eficiência do processo, mas também reduz significativamente as emissões de poluentes, ajudando a combater as mudanças climáticas. Essa abordagem não apenas fortalece a segurança energética, mas também integra o biodiesel a outras fontes renováveis, como solar e eólica, especialmente em países tropicais, onde as condições são favoráveis para o cultivo dessas matérias-primas.

Santos (2023) em sua dissertação de mestrado explora o potencial do biodiesel de gergelim como uma alternativa sustentável ao diesel convencional em motores geradores. Este estudo foi motivado pela necessidade de encontrar fontes de energia renováveis que possam reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar as emissões de gases de efeito estufa. O gergelim, uma oleaginosa resistente a condições climáticas adversas e com alto teor de óleo, foi escolhido devido à sua capacidade de produzir um biodiesel de qualidade que poderia substituir, parcial ou totalmente, o diesel.

Em seus métodos, o biodiesel de gergelim foi produzido através do processo de transesterificação e posteriormente misturado ao diesel em diferentes proporções (B5, B10, B20, B40, B80 e B100). Essas misturas foram testadas em um motor gerador de 5 kVA, operando sob diferentes cargas que variavam de 1000 a 6000 W. Durante os testes, foram monitorados parâmetros como consumo específico de

combustível e emissões de gases poluentes, incluindo monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx). A coleta de dados foi realizada com equipamentos de medição de alta precisão, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

Os resultados revelaram que o aumento da proporção de biodiesel de gergelim na mistura reduziu o consumo específico de combustível e as emissões de CO, o que indica um melhor desempenho energético e um menor impacto ambiental em comparação com o diesel puro.

No entanto, as emissões de NOx aumentaram, o que é uma tendência comum em biocombustíveis, sugerindo que ajustes futuros nas formulações podem ser necessários para mitigar este efeito. O estudo conclui que o biodiesel de gergelim, especialmente em misturas de até 20%, é uma alternativa promissora para a substituição parcial do diesel, combinando eficiência energética com benefícios ambientais, e contribuindo para a diversificação da matriz energética brasileira.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento deste capítulo serão descritas informações fundamentais para o entendimento sobre grupos geradores de energia, diesel e biodiesel agrupadas por meio de uma revisão bibliográfica de literatura.

3.1 Óleo diesel

O óleo diesel é um combustível líquido derivado do petróleo, amplamente utilizado em motores de combustão interna, especialmente em veículos pesados, como caminhões, ônibus e máquinas agrícolas, além de grupos geradores de energia. Sua popularidade se deve à alta densidade energética e à eficiência dos motores de ignição por compressão, que são mais econômicos e duráveis em comparação aos motores de ignição por centelha. Quimicamente, o diesel é composto por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 átomos de carbono, além de pequenas proporções de nitrogênio, enxofre e oxigênio. Algumas de suas principais propriedades físico-químicas estão descritas no quadro 1, sendo fundamentais para a compreensão do seu desempenho e comportamento na combustão.

Este tipo de óleo tem uma toxicidade moderada e uma baixa volatilidade, ou seja, não evapora facilmente e tem um cheiro forte e típico. Além disso, é transparente e não tem partículas sólidas misturadas. O óleo diesel é usado em motores que funcionam por meio da compressão do ar e da injeção do combustível (motores do tipo diesel), que são usados em vários tipos de veículos e equipamentos, como: carros, vans, ônibus, caminhões, barcos pequenos, máquinas pesadas, locomotivas, navios e geradores de eletricidade.

O crescimento dos padrões de vida, a intensificação do transporte terrestre e o aumento do uso de produtos petroquímicos nos últimos anos têm contribuído significativamente para a elevação da demanda global por diesel, resultando em um aumento considerável no seu consumo em todo o mundo. Este crescimento influencia negativamente na estabilidade dos ecossistemas e do clima global, sem contar com as reservas do próprio petróleo, que são esgotáveis devido ao tempo que se leva até a sua recomposição (Balat; Mustafa, 2009). Atualmente existem programas e

trabalhos publicados com o intuito de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis pelo uso de fontes alternativas de energia sustentável (Namasivayam, 2010).

Quadro 1. Propriedades do Óleo diesel

Propriedade	Valor Médio	Unidade	Descrição
Potencial Calorífico Superior (PCS)	45.500 - 46.500	kJ/kg	Energia total liberada na combustão completa, incluindo a condensação da água.
Potencial Calorífico Inferior (PCI)	42.500 - 43.500	kJ/kg	Energia liberada na combustão, excluindo a condensação da água.
Densidade a 15°C	820 - 850	kg/m ³	Massa por unidade de volume do diesel.
Ponto de Fulgor	60 - 80	°C	Temperatura mínima onde o diesel libera vapor suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar.
Índice de Cetano	40 - 55	-	Medida da qualidade de ignição do diesel; quanto maior, melhor a combustão.
Viscosidade Cinêmica a 40°C	2.0 - 4.5	cSt (centistokes)	Resistência ao fluxo do diesel, importante para o desempenho do sistema de injeção.
Ponto de Névoa	-10 a -15	°C	Temperatura na qual o diesel começa a formar cristais de parafina, que podem obstruir filtros e dutos.
Conteúdo de Enxofre	≤ 10	ppm (partes por milhão)	Quantidade de enxofre no diesel; níveis baixos são importantes para reduzir emissões de SO _x .
Número de Carbono	dez/20	-	Intervalo do número de átomos de carbono nas moléculas de hidrocarbonetos do diesel.
Ponto de Congelamento	-20 a -30	°C	Temperatura na qual o diesel se solidifica, importante para o desempenho em climas frios.
Conteúdo de Água	Máx. 200	ppm	Quantidade máxima de água permitida no diesel, pois a água pode causar corrosão e reduzir a eficiência do motor.
Estabilidade à Oxidação	≤ 25	g/m ³	Medida da resistência do diesel à degradação quando exposto ao oxigênio, influenciando a formação de depósitos.
Cor	2.0 - 3.5	ASTM D1500	Medida de comparação de cor, usada para verificar a qualidade do combustível e detectar contaminação.
Conteúdo de Cinzas	Máx. 0.01	% (massa)	Percentual de resíduos sólidos não combustíveis, que podem danificar motores e aumentar emissões.
Tensão de Vapor	0.4 - 0.7	kPa	Pressão exercida pelos vapores do diesel, importante para o desempenho em sistemas de injeção.
Destilação Final	360 - 370	°C	Temperatura à qual o diesel termina de evaporar durante a destilação, indicando a volatilidade do combustível.

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2023; Mendes, 2012 adaptado pelo Autor.

3.1.1 Biodiesel

Uma forma de produzir energia limpa e renovável é usando o biodiesel, que é um tipo de combustível feito a partir de óleos e gorduras de origem vegetal ou animal. Esses óleos e gorduras são formados por moléculas grandes chamadas ácidos graxos, que podem ter ou não ligações duplas entre seus átomos. Para transformar essas moléculas em biodiesel, é preciso fazer uma reação química chamada transesterificação, na qual elas reagem com um álcool simples na presença de um catalisador.

Essa reação produz o biodiesel e um outro produto chamado glicerina, que pode ter outras aplicações. (ANP resolução N37, 2015), as principais características físico-químicas do biodiesel, relevantes para seu desempenho como combustível, estão descritas no quadro a seguir.

Quadro 2. Propriedades do Biodiesel.

Propriedade	Valor Médio	Unidade	Descrição
Potencial Calorífico Superior (PCS)	39.500 - 41.000	kJ/kg	Energia total liberada na combustão completa, incluindo a condensação da água.
Potencial Calorífico Inferior (PCI)	36.500 - 38.000	kJ/kg	Energia liberada na combustão, excluindo a condensação da água.
Densidade a 15°C	860 - 900	kg/m ³	Massa por unidade de volume do biodiesel.
Ponto de Fulgor	100 - 170	°C	Temperatura mínima na qual o biodiesel libera vapor suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar.
Índice de Cetano	45 - 65	-	Medida da qualidade de ignição do biodiesel; quanto maior, melhor a combustão.
Viscosidade Cinêmica a 40°C	4.0 - 5.0	cSt (centistokes)	Resistência ao fluxo do biodiesel, importante para o desempenho do sistema de injeção.
Conteúdo de Enxofre	≤ 10	ppm (partes por milhão)	Quantidade de enxofre no biodiesel; níveis baixos são importantes para reduzir emissões de SOx.
Número de Carbono	16 - 18	-	Intervalo do número de átomos de carbono nas moléculas de hidrocarbonetos do biodiesel.
Ponto de Congelamento	-5 a -10	°C	Temperatura na qual o biodiesel se solidifica, importante para o desempenho em climas frios.
Conteúdo de Água	Máx. 500	ppm	Quantidade máxima de água permitida no biodiesel, pois a água pode causar corrosão e reduzir a eficiência do motor.
Conteúdo de Cinzas	Máx. 0.02	% (massa)	Percentual de resíduos sólidos não combustíveis, que podem danificar motores e aumentar emissões.

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2023; Mendes, 2012 adaptado pelo Autor.

O biodiesel é um combustível ecológico que pode substituir o diesel derivado do petróleo, que é uma fonte não renovável e poluente. O biodiesel pode ser produzido a partir de diferentes matérias-primas renováveis, como óleos vegetais de diversas plantas, gorduras animais de origem bovina, suína ou avícola e óleos usados na preparação de alimentos fritos. (Ramos *et al.*, 2003).

A grande compatibilidade do biodiesel com o diesel convencional o caracteriza como uma alternativa capaz de atender à maior parte da frota de veículos a diesel já existente no mercado, sem qualquer necessidade de investimentos tecnológicos no desenvolvimento dos motores. Por outro lado, o uso de outros combustíveis limpos, como o óleo in natura, as microemulsões, o gás natural ou o biogás requerem uma adaptação considerável para que o desempenho exigido pelos motores seja mantido (Laurindo, 2003).

Adotar o biodiesel, mesmo que de forma progressiva, em termos ambientais resultará em uma redução significativa no padrão de emissões de materiais particulados, óxidos de enxofre e gases que contribuem para o efeito estufa (Mittelbach *et al.*, 1985). Sendo assim, sua difusão, a longo prazo, proporcionará maiores expectativas de vida à população e, como consequência, um declínio nos gastos com saúde pública, possibilitando o redirecionamento de verbas para outros setores, como educação e previdência.

Dentro do programa Brasileiro de produção de biodiesel, o óleo de soja é responsável pelo maior percentual das matérias-primas utilizadas. Em 2012, segundo a Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2013), a divisão percentual das matérias primas utilizadas, ficou em 77,4% para o óleo de soja, 16,8% para gorduras animais, 4,3% para o óleo de algodão e 1,5% para outros materiais graxos.

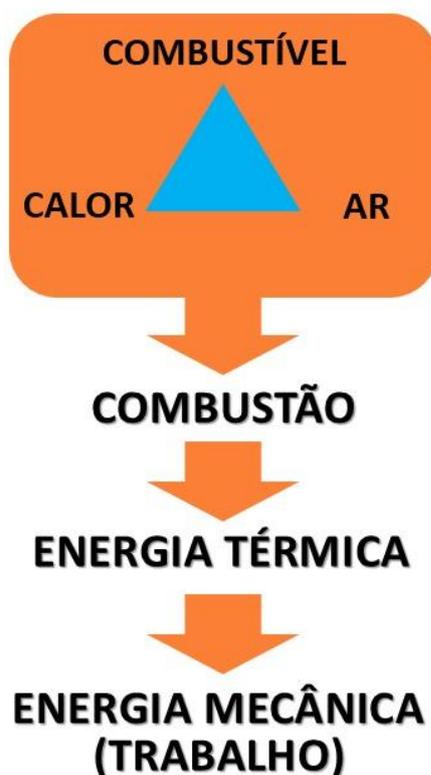
Cabe ressaltar, ainda, que a adição de biodiesel ao diesel comum, em termos gerais, melhora as características do combustível fóssil, pois possibilita a redução dos níveis de ruído e melhora a eficiência da combustão pelo aumento do número de cetano (Gallo, 2003).

3.2 Grupo Gerador

3.2.1 Motor diesel

É conhecido que os motores de combustão interna têm como finalidade transformar a energia química dos combustíveis em energia mecânica (Figura 4). Esta transformação ocorre através do processo de oxidação ou combustão do combustível no interior do motor. Estas máquinas térmicas funcionam seguindo ciclos termodinâmicos específicos (Heywood, 1988).

Figura 4. Diagrama das necessidades de um motor para realização de trabalho.



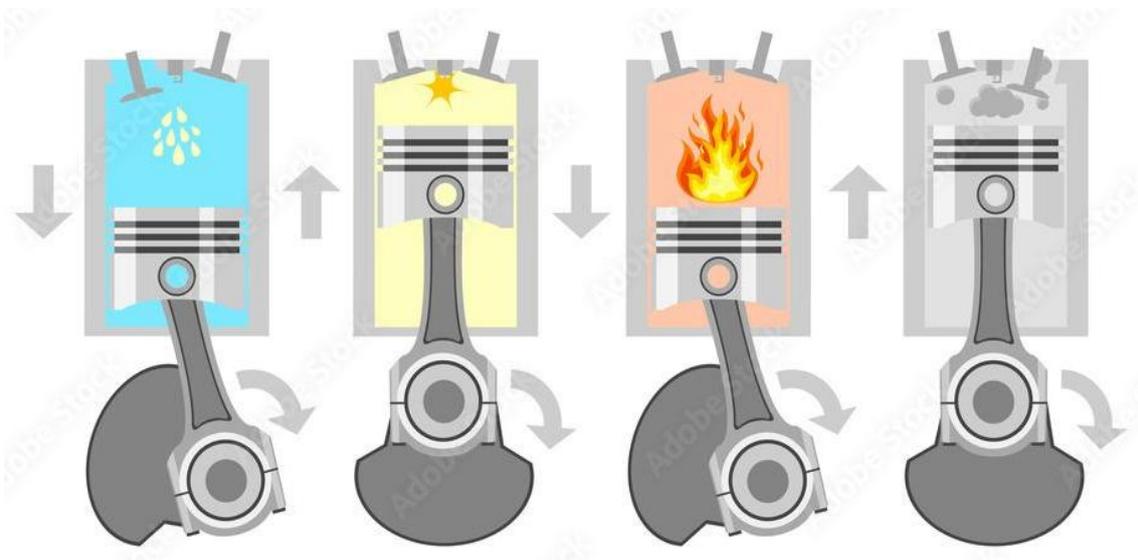
Fonte: Oficina Expert, 2016

O motor a diesel foi inventado por Rudolf Diesel, um engenheiro alemão, no final do século XIX. Ele queria criar um motor mais eficiente do que os motores a vapor

e a gasolina da época, e usou óleo de amendoim para alimentar um de seus primeiros motores na Exposição de Paris de 1900.

O motor a diesel é um tipo de motor que usa como combustível o óleo diesel, biodiesel ou suas combinações. Ele é um motor que queima o combustível dentro do próprio motor, sendo que a queima acontece por causa da alta pressão. Ele funciona em quatro etapas, que são chamadas de quatro tempos porque cada uma delas corresponde a um movimento do pistão. As quatro etapas são: entrada, compressão, explosão e saída (Figura 5) (Smith *et al.*, 2007).

- Na primeira etapa, o pistão se move para longe do ponto de entrada e puxa a mistura de ar e combustível para dentro do cilindro.
- Na segunda etapa, todas as válvulas estão fechadas e o pistão comprime a mistura de ar e combustível, fazendo com que ela se acenda. A queima é tão rápida que o volume não muda muito, mas a pressão aumenta muito.
- É na terceira etapa que o trabalho ocorre, nessa etapa os produtos da combustão, os gases, a alta temperatura e a alta pressão, expandem-se, aproximadamente de forma adiabática e então há a abertura da válvula de descarga, e a pressão cai rapidamente.
- Na última etapa, portanto, o pistão empurra os gases de combustão para fora do cilindro, finalizando o ciclo (Smith *et al.*, 2007).

Figura 5. Ciclo de Combustão

Fonte: Adobe Stock, 2024.

3.2.2 Grupo Motor Gerador

No Grupo Motor Gerador (GMG), acoplado ao motor de combustão interna, está o alternador, utilizado para converter potência mecânica em potência elétrica. Os alternadores ou geradores são máquinas síncronas, isto é, máquinas cuja rotação está diretamente relacionada ao número de pólos magnéticos e da frequência da força eletromotriz.

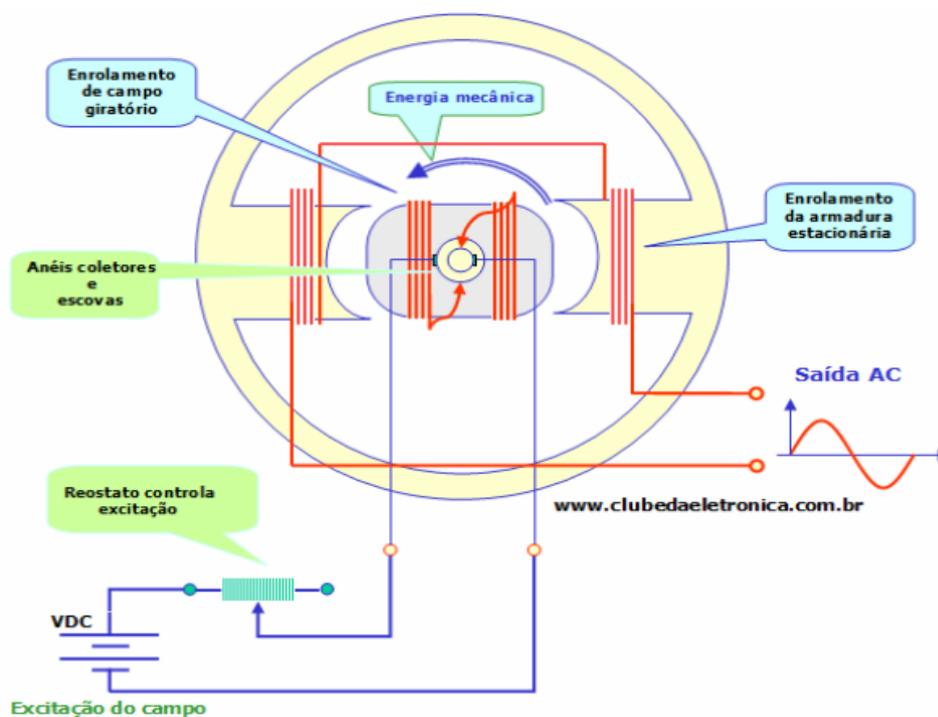
Não há diferenças construtivas significativas entre um alternador e um motor síncrono, podendo um ser substituído pelo outro sem prejuízo de desempenho (Chapman, 2013; Pereira, 2006).

O projeto mecânico do alternador envolve duas partes principais: uma fixa, denominada estator, e outra móvel, denominada rotor. O estator é parte integrante da carcaça do alternador onde se encontram os pés de fixação. Enquanto o rotor é o elemento girante localizado no interior do equipamento (Pereira, 2006).

De forma resumida, no Grupo Motor Gerador (GMG), o alternador converte energia mecânica em elétrica por meio de um princípio eletromagnético. A rotação do rotor, impulsionada pelo motor de combustão interna, cria um campo magnético que induz uma corrente elétrica nos enrolamentos do estator. Como uma máquina

síncrona, a rotação do rotor está diretamente relacionada ao número de polos e à frequência gerada. O estator, fixo, contém as bobinas nas quais a corrente é induzida, enquanto o rotor, girante, contém os ímãs ou eletroímãs responsáveis pela criação do campo magnético (Figura 6).

Figura 6. Rotor Elétrico



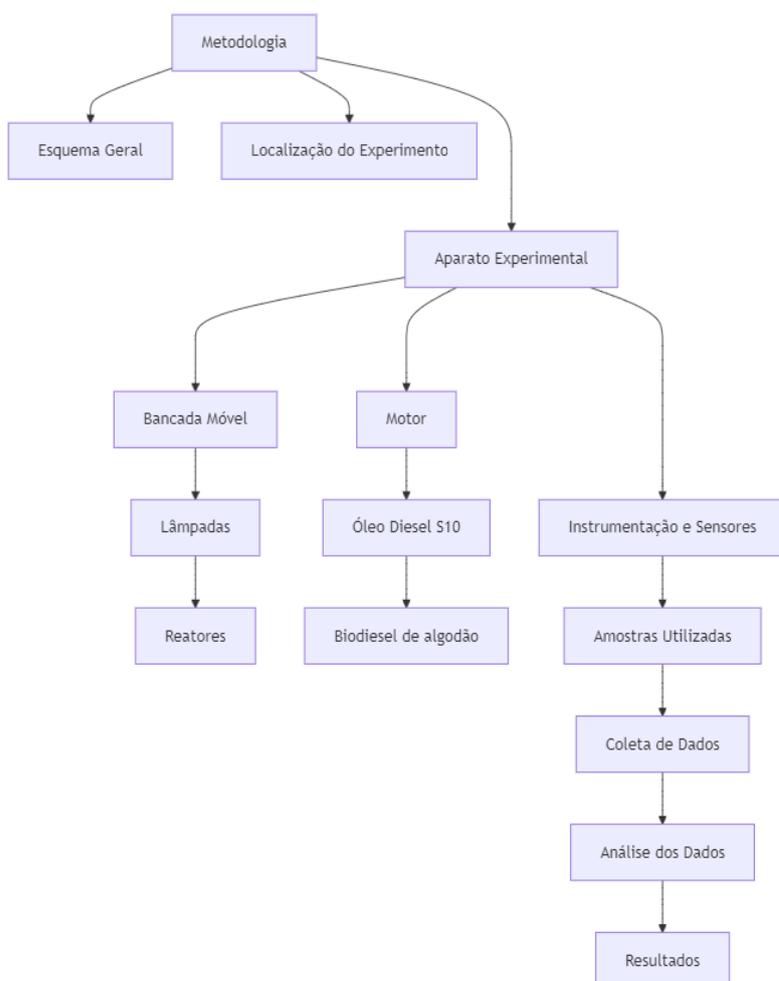
Fonte: Silva, 2019.

4 METODOLOGIA

No presente capítulo é apresentada a estrutura física do aparato experimental com as indicações dos pontos a serem utilizados na comparação teórico-experimental. A comparação será feita com o uso de um motor de combustão interna acoplado a uma bancada experimental de consumo de carga elétrica. O motor selecionado foi do tipo ignição por compressão e operou com misturas de diesel mineral e biodiesel de mamona em diferentes proporções.

A sequência das etapas experimentais adotadas na pesquisa pode ser visualizada no Fluxograma Metodológico (Figura 7), detalhando a organização e execução do estudo.

Figura 7. Fluxograma metodológico



Fonte: O autor, 2024.

4.1 Localização do experimento

O experimento foi realizado na sala C-24, no Laboratório de Motores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), Campus Recife, localizado na Avenida Professor Luís Freire, nº 500, Cidade Universitária, Recife, PE.

Este laboratório, situado na latitude 8°03'14.1"S, longitude 34°52'54.6"O, e a uma altitude de 4 metros (Google, 2024), é dedicado ao estudo e desenvolvimento de tecnologias aplicadas a motores, com foco em práticas experimentais e de pesquisa voltadas para a engenharia automotiva e mecânica.

As instalações do laboratório estão equipadas com ferramentas e instrumentos avançados, permitindo a realização de experimentos detalhados e rigorosos no campo da engenharia mecânica e energética.

4.2 Esquema geral

Neste estudo, foi utilizado um gerador Matsuyama 6500, acionado por um motor adequado para fornecer energia a diversos equipamentos. O registro dos dados contou com uma série de sensores e instrumentos: o Medidor de Vibração e Tacômetro INSTRUTHERM MV-690, utilizado para medir a vibração e a rotação do motor; o Alicata Amperímetro Digital ICEL MANAUS AD-9900, empregado para medir a corrente elétrica e outros parâmetros; a Câmera Termográfica FLIR modelo i7, que monitorou a distribuição de temperatura ao longo do motor e do sistema de escape; e o Termo-Higro-Anemômetro THAR-185, utilizado para medir a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. Para medir o consumo de combustível, foi utilizada uma proveta graduada de 1500 ml, permitindo registrar com precisão o volume consumido durante os experimentos.

Como carga resistiva, foram utilizadas 8 lâmpadas Kian de 400W de vapor de mercúrio, permitindo testar a capacidade de resposta e eficiência do gerador sob condições de carga. Todos esses equipamentos foram integrados ao sistema, permitindo o monitoramento da temperatura do escape, do bloco do motor, da rotação, das vibrações e das condições ambientais durante os experimentos. A coleta de dados foi realizada manualmente, com cada valor sendo registrado em tabelas no Excel, o que facilitou a análise posterior dos resultados.

4.3 Aparato experimental

O experimento utilizou como objeto de análise o grupo gerador diesel Matsuyama 6500, acoplado a uma bancada de resistência elétrica composta por lâmpadas (figura 8). O combustível utilizado incluiu o diesel S-10, adquirido em um posto local, e o Biodiesel, doado por meio de uma parceria entre a UFPE e o IFPE Campus Recife, proveniente de óleo de algodão. Esses componentes foram cuidadosamente selecionados para avaliar o desempenho e a eficiência do gerador sob diferentes condições de operação.

Figura 8. Motor gerador diesel e Bancada de Lâmpadas



Fonte: Matsuyama, 2023 e autor, 2024.

4.3.1 Motor

O motor Matsuyama 6500, é conhecido por sua robustez e eficiência, características que o tornam ideal para suportar as condições variáveis e exigentes do laboratório. A escolha deste gerador se deu pela sua capacidade de gerar uma potência estável, essencial para garantir a consistência nos testes realizados com as misturas de diesel e Biodiesel. Suas principais propriedades estão descritas no quadro 3.

Além disso, sua construção robusta permitiu que o gerador operasse de forma confiável durante todo o processo experimental, assegurando que os resultados obtidos fossem precisos e representativos.

Quadro 3. Propriedades do sistema gerador.

Propriedade	Especificação
Modelo	Matsuyama 6500
Tipo de Motor	diesel 4 tempos
Potência Nominal	5.5 kVA
Potência Máxima	6.5 kVA
Tensão de Saída	220V
Frequência	60 Hz
Sistema de Partida	Elétrico e manual
Capacidade do Tanque de Combustível	12.5 litros
Autonomia	Aproximadamente 8 horas (com carga nominal)
Consumo de Combustível	Aproximadamente 1.5 litros/hora
Sistema de Resfriamento	Ar forçado
Tipo de Alternador	Brushless
Nível de Ruído	Aproximadamente 75 dB(A) a 7 metros
Dimensões (C x L x A)	Aproximadamente 710 X 495 X 620 mm
Peso	Aproximadamente 90 kg

Fonte: Matsuyama, 2023, adaptado pelo autor.

De acordo com as recomendações do fabricante, antes de iniciar o funcionamento do grupo motor gerador Matsuyama 6500, é necessário deixá-lo ligado por aproximadamente cinco minutos, sem carga, para permitir que a temperatura do cárter estabilize. Esse procedimento foi rigorosamente seguido antes do início de cada experimento e em cada sequência de ensaios, garantindo que a temperatura de funcionamento do motor não influenciasse nos resultados obtidos.

Além disso, sempre que foi necessária a troca de combustível, o filtro e as mangueiras foram completamente esgotados para remover o óleo acumulado. Após a introdução do novo óleo, o motor foi acionado e permaneceu em funcionamento até consumir entre 50 a 100mL da nova mistura, assegurando assim a eliminação

completa do combustível anterior antes de quantificar as variáveis em análise. Essa prática foi essencial para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados experimentais.

4.3.2 Lâmpadas

As Lâmpadas de vapor de mercúrio (Figura 9) usadas no experimento foram fabricadas pela marca Kian e possuem uma potência de 400W, com uma vida útil estimada em aproximadamente 10000 horas, as demais propriedades elétricas e operacionais estão descritas no Quadro 4.

Figura 9. Lâmpadas de vapor de mercúrio



Fonte: Kian, 2023.

Quadro 4. Propriedades da lâmpada

Propriedade	Especificação
Marca	Kian
Tipo de Lâmpada	Vapor de Mercúrio
Potência	400W
Tensão Nominal	220V
Corrente Nominal	Aproximadamente 3.25A
Fluxo Luminoso	Aproximadamente 21.000 lm
Temperatura de Cor	4.200K (luz branca)
Base da Lâmpada	E40 (rosca grande)
Vida Útil	Aproximadamente 10.000 horas
Dimensões	Aproximadamente 290 mm (comprimento) x 122 mm (diâmetro)
Posição de Funcionamento	Universal (qualquer posição)
Índice de Reprodução de Cor (IRC)	45-55
Tempo de Reacendimento	3-5 minutos
Aplicações	Iluminação pública, industrial, e áreas externas

Fonte: Kian, 2023, adaptado pelo autor.

4.3.3 Reatores

Os reatores são componentes indispensáveis para o funcionamento das lâmpadas de vapor de mercúrio, como as de 400W usadas neste trabalho. Eles regulam a corrente elétrica que alimenta a lâmpada, prevenindo picos de tensão que poderiam danificá-las especificado no quadro 5.

Além disso, os reatores garantem a estabilidade da operação, permitindo que a lâmpada atinja seu pleno desempenho luminoso e prolongando sua vida útil. Sem um reator adequado (Figura 10), a lâmpada de vapor de mercúrio não funcionaria corretamente, resultando em falhas de ignição e redução significativa da eficiência luminosa.

Figura 10. Preparação dos reatores e bocais.



Fonte: O autor, 2024.

Quadro 5. Especificações do reator.

Especificação	Descrição
Potência Nominal	400W
Tensão de Alimentação	220V
Frequência	50/60 Hz
Corrente de Entrada	Aproximadamente 2,3 ~ 3,6 a 220V
Fator de Potência (fp)	0,5 – 0,7
Eficiência	Alta eficiência, reduzindo perdas energéticas
Temperatura de Operação	-20°C a +50°C
Dimensões	Compacta, para instalação em luminárias padrão
Peso	3 a 5 kg, dependendo do modelo
Material do Corpo	Chapa de aço pintado ou alumínio
Conexão	Conexões rápidas para fácil instalação
Classe de Isolamento	Classe H ou superior
Proteções	Proteção contra sobrecarga e curto-circuito; proteção térmica integrada
Certificações	Conformidade com normas internacionais (IEC)

Fonte: Phillips, 2023, adaptado pelo autor.

4.3.4 Bancada Móvel

Iniciou-se o desenvolvimento de uma bancada resistiva com o objetivo de validar os dados operacionais do grupo gerador. A necessidade surgiu da dificuldade em coletar informações precisas com o sistema operando em plena carga.

Para isso, optou-se por projetar um sistema auxiliar utilizando lâmpadas de alta potência, a fim de simular o funcionamento real do grupo motor-gerador, incluindo suas variações de carga.

Inicialmente, foi concebida uma bancada com resistência elétrica variável composta por 12 lâmpadas (Figura 12), visando reproduzir o consumo elétrico típico de uma residência de pequeno porte e, assim, comprovar a eficiência do sistema gerador com uma determinada mistura de combustíveis.

Figura 11. Montagem da primeira versão da bancada.



Fonte: O autor, 2024.

Essa primeira versão se mostrou instável durante a locomoção e apresentou problemas devido à proximidade excessiva das lâmpadas, o que contribuiu para um aquecimento inadequado da fiação, já que o sistema estava subdimensionado.

Esses fatores comprometem tanto a segurança quanto a eficiência do conjunto. Por essas razões, foi necessário projetar uma segunda versão da bancada, com melhorias para corrigir essas deficiências, garantindo uma disposição mais adequada das lâmpadas, uma menor quantidade de lâmpadas e o dimensionamento correto da fiação, assegurando maior estabilidade e segurança operacional (Figura 12).

Figura 12. Teste da segunda versão da bancada de lâmpadas.



Fonte: O autor, 2024.

4.3.5 Óleo diesel S10

Nos ensaios realizados, o óleo diesel mineral tipo A (S10) foi utilizado como o principal componente das misturas estudadas. Este combustível foi fornecido pelo Posto de Combustíveis CDU Ltda, localizado em Recife, PE.

O combustível A-S10 utilizado segue as mais recentes normas estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), conforme a Resolução nº 798 de 2023. De acordo com o Artigo 3º desta resolução, o diesel S10 deve apresentar um teor máximo de enxofre de 10 ppm, assegurando que o combustível atenda aos requisitos de qualidade e segurança exigidos pela legislação vigente.

4.3.6 Biodiesel de algodão

O biodiesel de semente de algodão usado no trabalho foi produzido no Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE), em parceria com a UFPE. No CETENE, a produção ocorreu por meio do processo de transesterificação, no qual o óleo extraído das sementes de algodão reage com metanol na presença de um catalisador, convertendo triglicerídeos em ésteres metílicos (biodiesel) e glicerol como subproduto.

4.4 Instrumentação e sensores

Durante as medições, foram empregados diversos equipamentos para a obtenção dos dados necessários, cada um deles com a capacidade de medir uma ou mais grandezas. Para a medição das temperaturas nas superfícies do motor, foi utilizada uma câmera termográfica.

Um Termo-higrômetro e Anemômetro foi responsável pela medição da velocidade dos gases de escape, além de monitorar a temperatura e a umidade do ambiente. O controle da rotação e da vibração do motor foi realizado por meio do tacômetro e medidor de vibração da Instrutherm. Para assegurar a precisão na quantidade de biodiesel de algodão e viabilizar o cálculo do consumo médio, utilizaram-se provetas.

Figura 13. Câmera Termográfica Flir.



Fonte: O autor, 2024.

A Câmera termográfica (figura 13) utilizada foi da marca FLIR, modelo i7 2.8" LCD, faixa de temperatura -20°C a 250°C, 2% de precisão, sensibilidade térmica (NETD) de 0.1°C a 25°C, resolução do detector 120x120 pixels vide especificação no quadro 6.

Quadro 6. Especificação da câmera Flir I7

Especificação	Detalhes
Modelo	i7
Marca	FLIR
Tipo	Câmera Termográfica
Resolução do Detector	140 x 140 pixels
Faixa de Temperatura	-20°C a 250°C
Precisão	$\pm 2^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$
Campo de Visão (FOV)	29° x 29°
Distância Focal	0,6 m
Resolução Espacial	3.71 mrad
Sensibilidade Térmica	< 0.10°C

Fonte:Flir adaptado pelo autor., 2024.

Para a coleta dos dados ambientais, foi utilizado o termo-higro-anemômetro digital portátil modelo THAR-185 da INSTRUTHERM (figura 14). Este equipamento foi escolhido por sua praticidade e precisão na medição de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento descritos no quadro 7.

Figura 14. Anemômetro THAR-185



Fonte: INSTRUTHERM, 2023.

O dispositivo, sendo leve e portátil, permitiu a realização de medições diretamente no campo de estudo, sem a necessidade de equipamentos adicionais.

Quadro 7. Especificação do THAR-185.

Especificação	Descrição
Marca	INSTRUTHERM
Modelo	THAR-185
Tipo	Termo-higro-anemômetro digital portátil
Funções	Medição de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento
Faixa de Medição de Temperatura	-10°C a 50°C
Faixa de Medição de Umidade Relativa	10% a 95% UR (umidade relativa)
Faixa de Medição de Velocidade do Vento	0,4 a 30 m/s
Resolução de Temperatura	0,1°C
Resolução de Umidade Relativa	0,1% UR
Resolução de Velocidade do Vento	0,1 m/s
Precisão de Temperatura	±1°C
Precisão de Umidade Relativa	±3% UR (de 30% a 95% UR)
Precisão de Velocidade do Vento	± (2% + 0,2 m/s)

Fonte: INSTRUTHERM, 2023, adaptado pelo autor.

Figura 15. Tacômetro MV-690.



Fonte: O autor, 2024.

O Medidor de Vibração e Tacômetro MV-690 da INSTRUTHERM (figura 15), destaca-se como um instrumento altamente versátil, desenvolvido para realizar medições precisas de vibração em máquinas e equipamentos, assim como a rotação de motores. Com uma ampla faixa de medição, o MV-690 permite a análise detalhada de parâmetros como aceleração, velocidade e deslocamento, cuja especificações estão descritas no quadro 8.

Quadro 8. Especificação do MV-690.

Especificação	Detalhes
Modelo	MV-690
Marca	INSTRUTHERM
Tipo	Medidor de Vibração e Tacômetro
Faixa de Medição de Vibração	0,5 a 199,9 m/s ² (Aceleração), 0,5 a 199,9 mm/s (Velocidade), 0,5 a 1999 µm (Deslocamento)
Faixa de Medição de Rotação (Sensor Óptico)	2,5 a 99,999 RPM
Faixa de Medição de Rotação (Sensor de Toque)	0,5 a 19.999 RPM
Precisão	± (5% + 2d)
Display	LCD com iluminação
Funções Adicionais	RS-232 para conexão com PC, Data Hold, Máximo e Mínimo, Desligamento automático
Alimentação	4 baterias AA
Dimensões	250 x 72 x 30 mm
Peso	Aproximadamente 220 g
Acessórios Incluídos	Cabo RS-232, Adaptador de Vibração, Estojo de Transporte

Fonte: INSTRUTHERM, 2023, adaptado pelo autor.

Figura 16. Alicate Amperímetro AD-9900.



Fonte: O autor, 2024.

O alicate amperímetro modelo AD-9900 (figura 16), foi utilizado para medir a corrente elétrica consumida pelo sistema durante os ensaios. Sua aplicação permitiu o monitoramento em tempo real da variação de corrente nas diferentes condições de carga impostas ao grupo gerador, suas especificações foram descritas no quadro 9 fornecendo uma visão abrangente das suas funcionalidades e desempenho.

Quadro 9. Especificação da AD-9900.

Especificação	Detalhes
Modelo	AD-9900
Marca	ICCEL MANAUS
Medição de Corrente AC	0 a 1000 A
Medição de Tensão AC	0 a 600 V
Medição de Tensão DC	0 a 600 V
Medição de Resistência	0 a 20 MΩ
Frequência de Medição	50/60 Hz
Resolução de Corrente	1 A
Resolução de Tensão	1 V
Display	LCD com 3 ½ dígitos

Fonte: Icel Manaus, 2024, adaptado pelo autor.

Figura 17. Proveta graduada.



Fonte: Postos menor preço, 2024.

Para registrar o volume de combustível consumido durante os testes, e considerando a indisponibilidade de um método de medição eletrônica, optou-se pelo uso de uma proveta graduada (figura 17) de 2000 ml. Essa escolha permitiu medições volumétricas precisas e a quantificação direta do volume consumido. A seleção da proveta baseou-se em sua precisão e capacidade, que se mostraram adequadas às necessidades do experimento. Durante os testes, o volume de combustível foi aferido diretamente na proveta após cada fase, o que assegurou a coleta de dados precisos e consistentes para as análises posteriores.

4.5 Amostras utilizadas

A metodologia adotada nos experimentos consistiu na coleta sistemática de dados durante a queima de diferentes misturas de Biodiesel e diesel, em diversas concentrações, com o objetivo de avaliar o rendimento térmico e energético e seu impacto ambiental.

Foram realizados cinco experimentos distintos, cada um utilizando uma concentração específica de combustíveis:

- Experimento 01: D100/B0 - 100% diesel e 0% Biodiesel;
- Experimento 02: D0/B100 - 0% diesel e 100% Biodiesel;
- Experimento 03: D50/B50 - 50% diesel e 50% Biodiesel;
- Experimento 04: D30/B70 - 30% diesel e 70% Biodiesel;
- Experimento 05: D70/B30 - 70% diesel e 30% Biodiesel.

Durante cada experimento, as medições foram realizadas em intervalos de 10 minutos, ao longo de uma hora.

4.6 Execução dos testes para coleta de dados

Com a aquisição de todos os materiais necessários se deu início ao processo de testar o desempenho do grupo gerador com as diferentes composições de combustíveis: 100% diesel, 30% diesel – 70% biodiesel, 50% diesel – 50% biodiesel, 30% diesel – 70% biodiesel, 100% biodiesel, cada uma dessas concentrações foi analisada durante a queima delas por uma hora, sendo a tomada de dados a cada 10 minutos.

Para avaliar indiretamente o processo de combustão, a temperatura da superfície externa da câmara de combustão foi monitorada através de termografia. O fluxo de calor foi determinado pela análise da vazão dos gases de escape. Adicionalmente, a rotação do motor, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar foram registradas para caracterizar as condições de teste. Além disso, foi calculado o consumo do grupo gerador para cada combustível. Cada experimento foi registrado em uma Quadro da seguinte forma:

Quadro 10. Planilha de Aquisição de Dados

Data:		Quantidade de Lâmpadas:				% do Combustível:				
Dados Antes do Experimento (Motor em aquecimento)										
Hora:	Temp. Bloco Motor	Temperatura Escapamento:	RPM motor:			Vibração(m/s²):		Corrente LD Direito	Corrente LD Esquerdo	
Experimento: 60 min com intervalos de 10 min										
Hora:	Temp. Bloco Motor	Temperatura Escapamento:	RPM motor:	Temp. AR	Umidade	Vibração():	Vibração():	Corrente(A) LD Direito	Corrente(A) LD Esquerdo	Consumo total (mj):
00:00										
00:10										
00:20										
00:30										
00:40										
00:50										
01:00										

Fonte: O autor, 2024.

4.7 Análise dos dados coletados

Os resultados foram organizados e apresentados em gráficos, facilitando a visualização das diferenças de desempenho entre os combustíveis. Para a comparação das médias de variáveis como temperatura de escape, rotação do motor e consumo de combustível, foram utilizados gráficos de barras, proporcionando uma análise visual rápida e eficaz das tendências.

Além disso, a análise e tratamento dos dados coletados foi realizada com o uso de ferramentas estatísticas apropriadas para determinar as potências térmicas, incluindo o fluxo energético do combustível e o fluxo dos gases de combustão. Esse estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do grupo gerador como a principal fonte de acionamento para o sistema de refrigeração remota.

4.7.1 Fórmulas

Foram utilizadas para cálculo do fluxo de calor do combustível, do calor dissipado do calor dos gases, as seguintes equações:

$$E = P \times t \quad (01)$$

$$\dot{m}_{gases} = \rho_{gases} \times A_{escape} \times v_{gases} \quad (02)$$

$$PCI = \frac{\text{Energia Gerada (kWh)}}{\text{Massa de Combustível (kg)}} \quad (03)$$

$$Q_{conv} = h \times A \times (T_{superfície} - T_{ambiente}) \quad (04)$$

$$Q_{gases} = \dot{m} \times c \times (T_{gases} - T_{ambiente}) \quad (05)$$

$$Q_{Combustão\ teórica} = \dot{m}_{combustível} \times PCI_{teórico} \quad (06)$$

$$\eta_{global} = \frac{E_{eletrica\ medida}}{Q_{combustão\ teórica}} * 100\% \quad (07)$$

$$\eta_{global} = \eta_{Motor} \times \eta_{Gerador} \quad (08)$$

Legenda: E= Energia gerada, P = Potência fornecida pelo gerador, t = Tempo em horas, Q = Fluxo de calor; \dot{m} = Vazão mássica; c = Calor específico; T = Temperatura; PCI = Poder Calorífico Inferior; h = Coeficiente convectivo do ar; A = Área da superfície, η = Rendimento.

5 RESULTADOS

A presente seção apresenta os resultados obtidos a partir dos testes realizados com diferentes misturas de diesel e Biodiesel (D100/B0, D30/B70, D50/B50, D70/B30, D0/B100) como combustíveis para o acionamento de um grupo gerador de pequeno porte. Durante os ensaios, o gerador operou por uma hora em cada uma dessas misturas, com medições feitas a cada 10 minutos. Foram analisados aspectos como a eficiência térmica, estabilidade operacional, rotação do motor, vibração e consumo de combustível, tanto em condições de operação sem carga quanto com carga aplicada.

As variações observadas nesses parâmetros ajudam a entender melhor a viabilidade técnica e econômica de cada combinação de combustível. Estudos anteriores apontam que mudar a composição do biodiesel pode afetar diretamente parâmetros como rotação, vibração e eficiência, o que reforça a importância de analisarmos detalhadamente esses aspectos.

5.1 Resultados sem carga aplicada

É importante elucidar que sem carga a temperatura do bloco do motor tende a permanecer relativamente estável, pois o motor opera em uma condição menos exigente. Nesse estado, a quantidade de combustível queimado é menor, o que resulta em uma menor geração de calor. Isso mantém a temperatura do bloco dentro de limites aceitáveis, sem grandes flutuações.

Este comportamento é típico, pois o motor não está sendo forçado a produzir a potência máxima, permitindo uma dissipação de calor mais eficiente e menos estresse térmico nos componentes do motor.

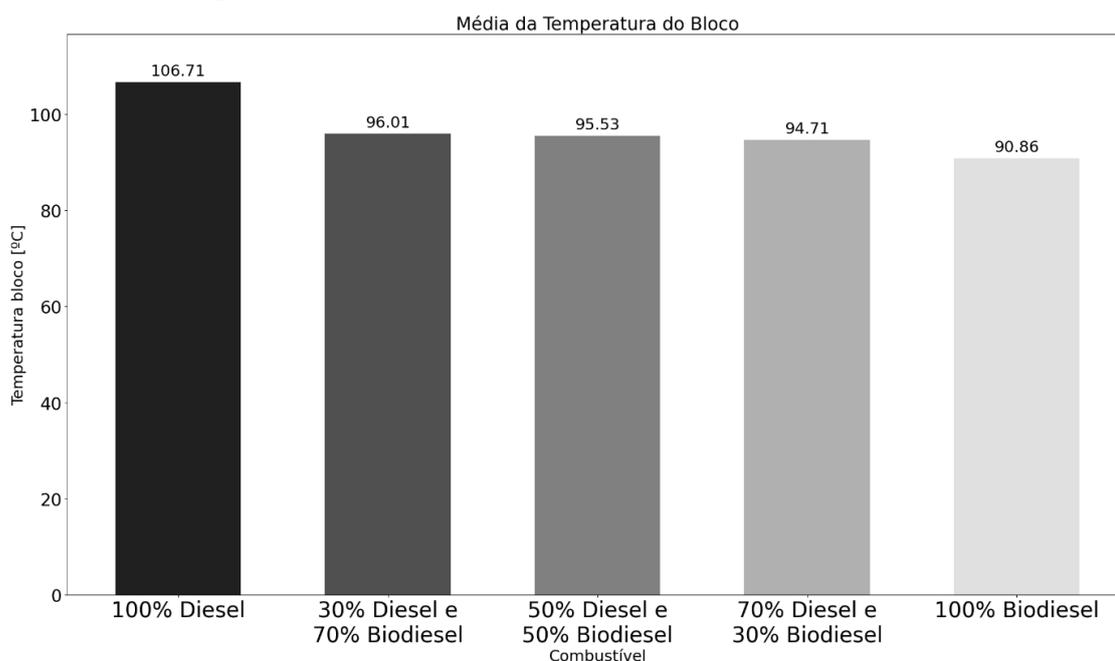
5.1.1 Temperatura do bloco do motor

Durante os ensaios experimentais realizados em regime de operação sem carga, foi avaliada a influência da composição do combustível na temperatura do bloco do motor. As medições foram conduzidas por meio de sensores instalados em pontos estratégicos do bloco, com registros contínuos ao longo do período de operação.

Os resultados demonstraram que as misturas com maior proporção de diesel fóssil, especialmente o diesel 100% (B0), apresentaram temperaturas significativamente mais elevadas no bloco do motor, indicando uma maior demanda térmica sob essas condições. Em contrapartida, o uso de biodiesel puro (B100) resultou nas menores temperaturas registradas durante os testes, conforme ilustrado na Figura 18. Nesse caso, a temperatura inicial foi de 82 °C, com elevação gradual até atingir aproximadamente 96 °C, permanecendo inferior aos valores observados para as demais misturas.

A menor solicitação térmica observada com o uso de B100 pode estar associada às propriedades físico-químicas do biodiesel, como maior teor de oxigênio e menor poder calorífico, que contribuem para uma combustão mais uniforme e com menor geração de calor residual. Esses resultados sugerem que o biodiesel puro promove uma operação térmica mais eficiente, o que pode favorecer a preservação dos componentes internos do motor, reduzir o desgaste térmico e, conseqüentemente, estender a vida útil do equipamento.

Figura 18. Média da temperatura do bloco do motor

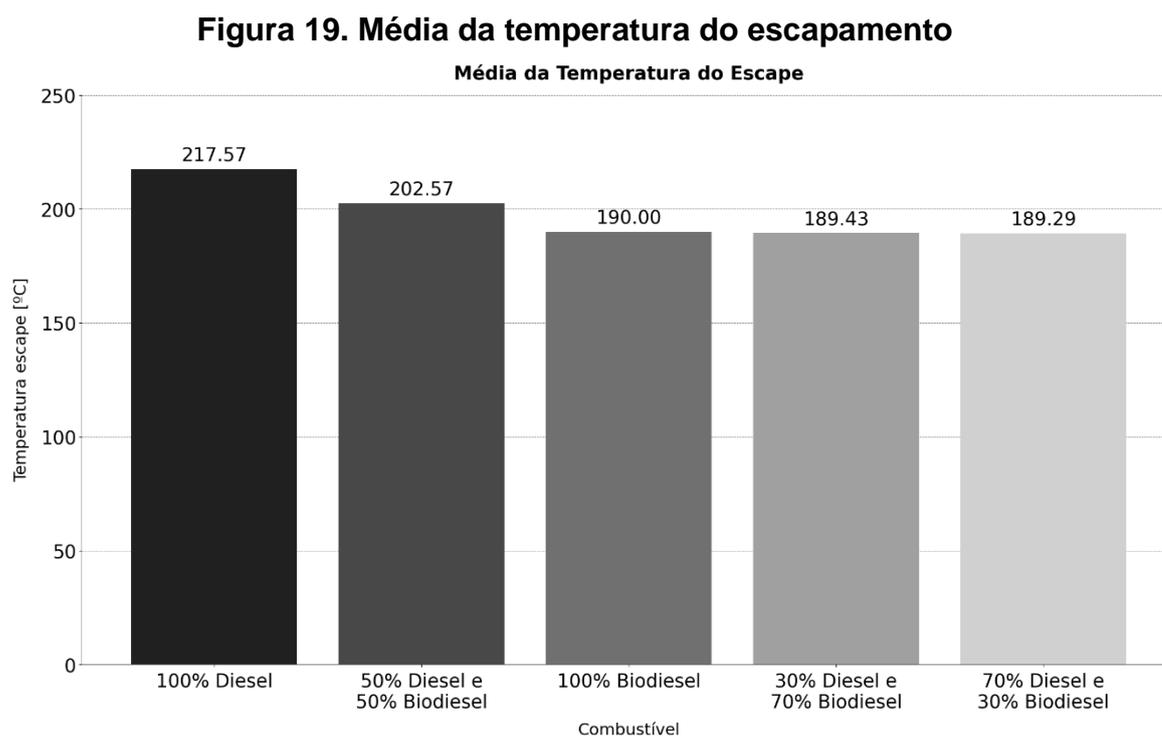


Fonte: O autor, 2024.

5.1.2 Temperatura do escapamento

Nos testes realizados sem carga, observou-se que as misturas com maior proporção de diesel tendem a apresentar temperaturas de escape mais elevadas, o que pode ser indicativo de uma combustão mais completa ou de um maior esforço térmico nessas condições.

Entre as misturas testadas, a combinação de 70% diesel e 30% biodiesel (figura 19) se destacou ao apresentar uma média de temperatura de escape mais baixa, variando entre 186°C e 191°C. As temperaturas mais baixas no escape são geralmente associadas a uma combustão mais eficiente e à menor produção de gases de escape quentes, o que pode ser benéfico para a eficiência energética e a redução de emissões em operações sem carga.



Fonte: O autor, 2024.

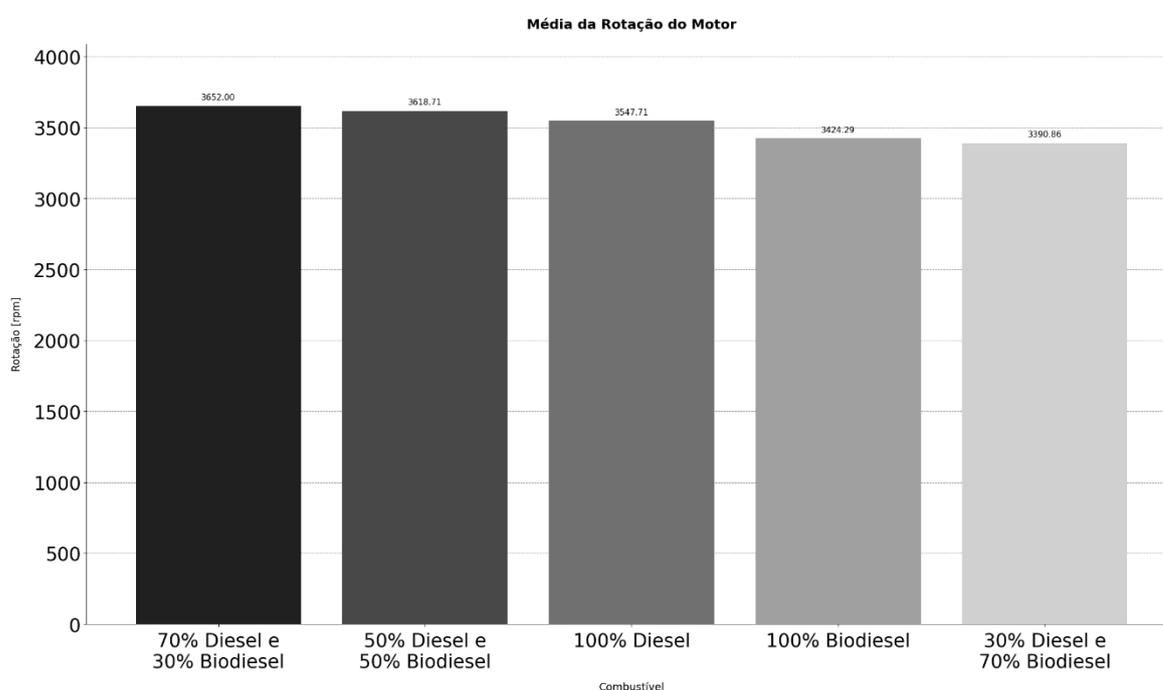
5.1.3 Rotação do Motor

Nos testes realizados sem carga, a rotação mais alta foi obtida com a mistura de 70% diesel e 30% Biodiesel (figura 20), indicando que essa combinação proporciona

um desempenho estável e eficiente quando o motor opera sem carga. Essa mistura manteve uma rotação relativamente alta e constante, com valores variando entre 3600 e 3668 rpm.

Esses resultados sugerem que o motor funciona de maneira otimizada com esta mistura em condições de operação leve, tornando-se uma escolha promissora para situações em que é necessário um desempenho confiável sem a aplicação de carga significativa.

Figura 20. Média da rotação do motor



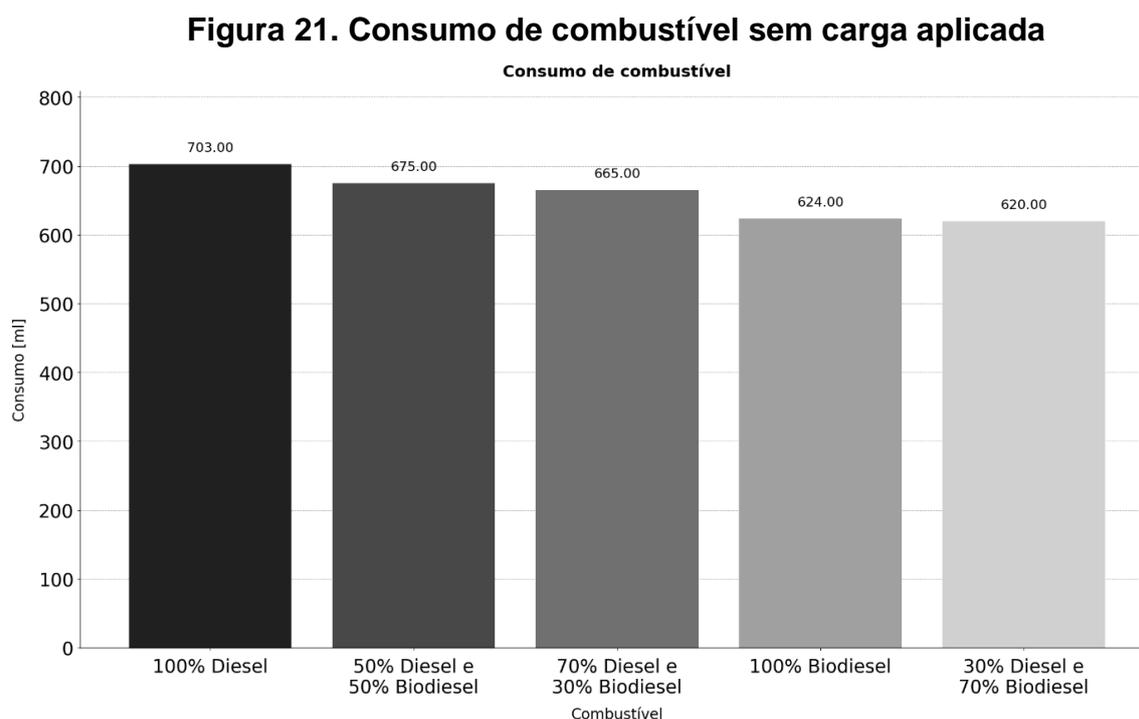
Fonte: O autor, 2024.

5.1.4 Consumo

Nos testes realizados sem carga, o menor consumo de combustível foi observado com o uso de 30% diesel e 70% Biodiesel (figura 21), seguido pela mistura de 100% Biodiesel, sugerindo que essas combinações são mais eficientes em termos de consumo de combustível quando o motor não está sob carga.

Especificamente, a mistura de 30% diesel e 70% Biodiesel apresentou um consumo de apenas 620 ml ao final do teste, destacando-se como a mais eficiente em termos

de economia de combustível. Este resultado indica que essa mistura pode ser particularmente vantajosa para aplicações que priorizam a sustentabilidade e a redução de custos operacionais.



Fonte: O autor, 2024.

5.2 Resultados com carga aplicada

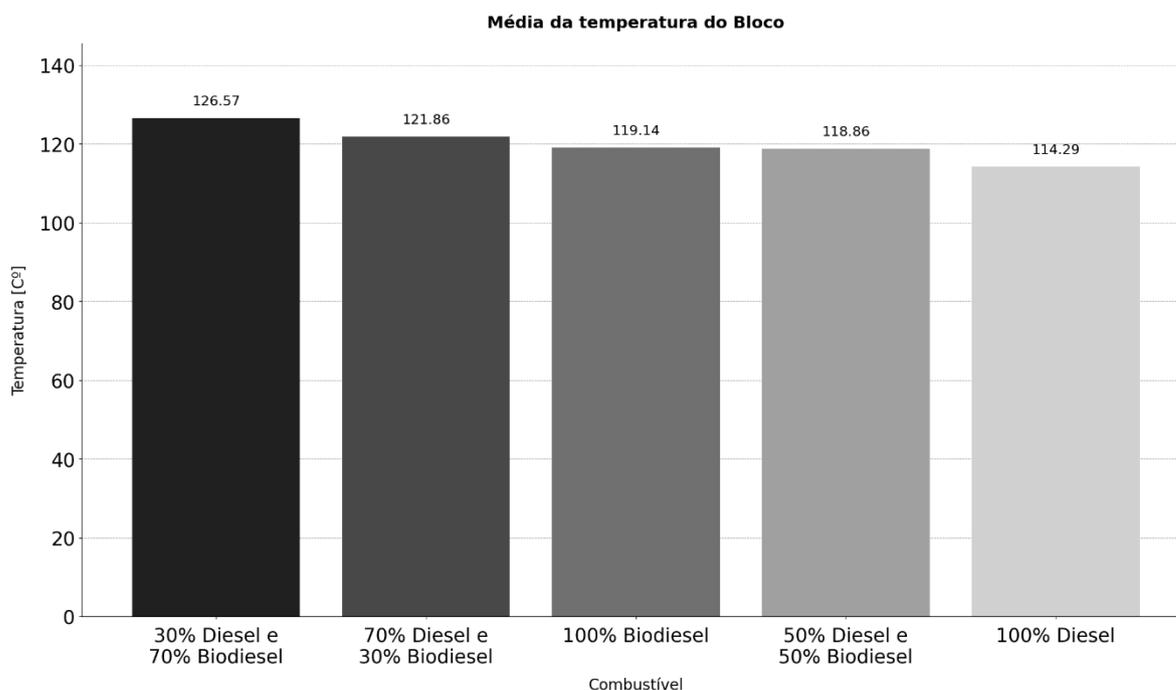
Quando o Matsuyama 6500 opera sob carga, a situação muda significativamente. O motor é solicitado a fornecer mais potência, o que leva a um aumento na quantidade de combustível queimado e, por conseguinte, a uma elevação na temperatura do bloco e escapamento.

Esse aumento é esperado, dado o maior esforço necessário para sustentar a carga aplicada. No entanto, é essencial monitorar cuidadosamente essa temperatura para garantir que ela permaneça dentro dos limites seguros de operação

5.2.1 Temperatura do Bloco do Motor

A análise da temperatura do bloco do motor, quando operando sob carga, revelou variações distintas conforme o tipo de combustível ou mistura utilizada. Entre as opções avaliadas, o combustível 100% Diesel (figura 22) destacou-se por apresentar a menor temperatura média do bloco, registrando 114,29 °C. Este resultado indica que o uso de diesel puro tende a gerar um menor aquecimento do motor. Uma temperatura de operação mais baixa pode ser benéfica, contribuindo para uma maior durabilidade dos componentes do motor e para uma eficiência térmica potencialmente mais estável, fatores relevantes para o desempenho geral e a vida útil do motor.

Figura 22. Temperatura do bloco do motor com carga aplicada



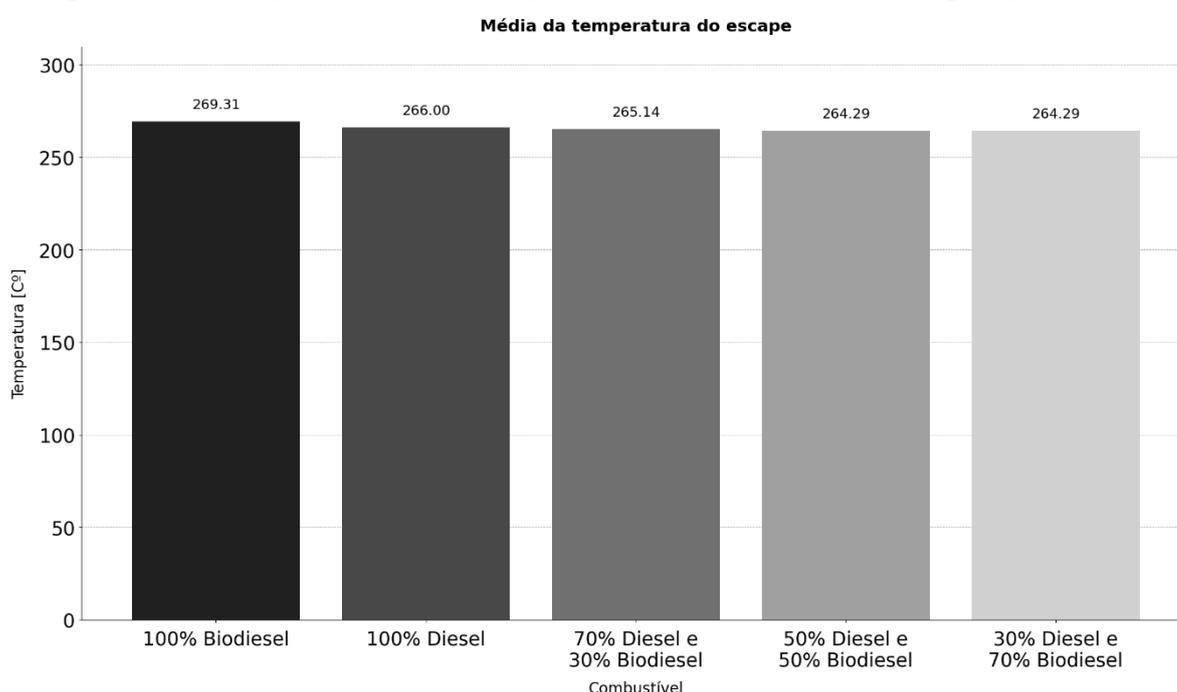
Fonte: O autor, 2024.

5.2.2 Temperatura do escapamento

A análise das temperaturas de escape revelou que a maioria das misturas de combustíveis, incluindo aquelas com altos teores de biodiesel, mantiveram a temperatura de escape próxima de 270 °C (figura 23). No entanto, as misturas com 30% diesel e 70% biodiesel e 50% diesel e 50% biodiesel apresentaram uma média de temperatura de escape ligeiramente mais baixa, em torno de 264,29 °C.

Uma temperatura de escape mais baixa pode ser um indicativo de uma combustão mais eficiente dentro dos cilindros, onde uma maior parcela da energia do combustível é convertida em trabalho, ou de características de combustão que resultam em menor temperatura final dos gases. A constatação de que o ajuste nas proporções da mistura de biodiesel influencia a temperatura de escape reforça a importância da otimização dessas misturas para o desempenho do motor.

Figura 23. Temperatura do escapamento do motor com carga aplicada



Fonte: O autor, 2024.

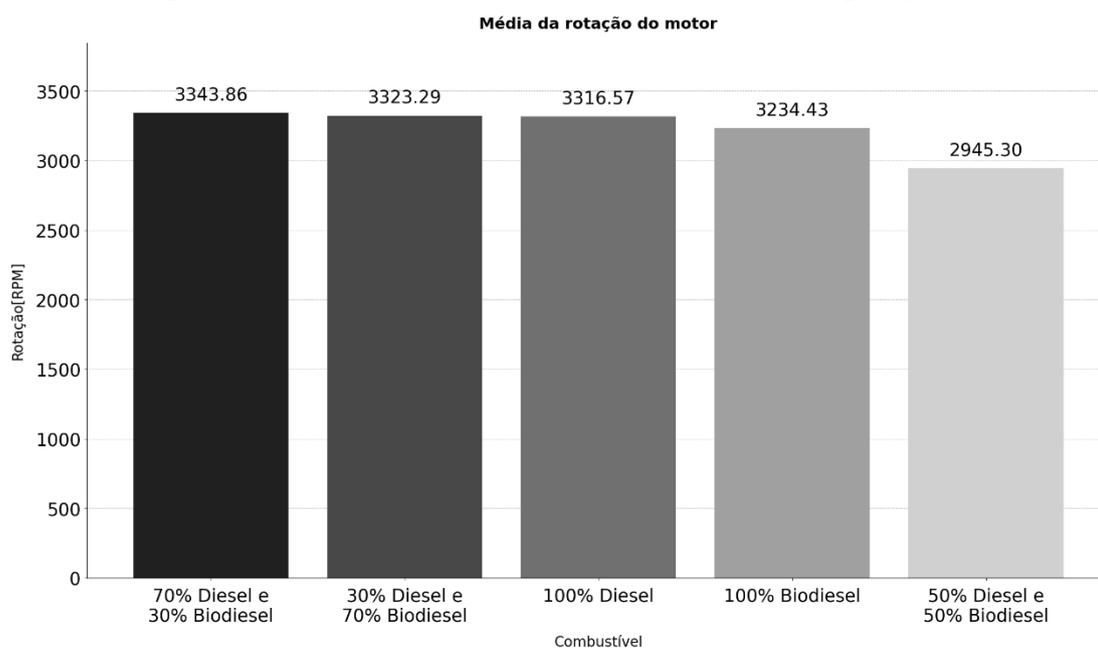
5.2.3 Rotação do motor

A rotação do motor variou bastante entre as diferentes misturas de combustíveis que foram testadas. A mistura com 70% diesel e 30% biodiesel teve a rotação mais alta (figura 24), com uma média de 3.343,86 rpm, o que indica que essa combinação pode proporcionar um desempenho mais forte, especialmente quando o motor está sob carga.

Isso faz pensar que, em situações em que o motor precisa de mais potência, essa mistura pode ser a melhor escolha. Já a mistura de 50% diesel e 50% biodiesel

resultou nas menores rotações, o que sugere que ela pode não ser tão eficaz em termos de potência, mas talvez ofereça outros benefícios, como menor consumo de combustível.

Figura 24. Média da rotação do motor com carga aplicada

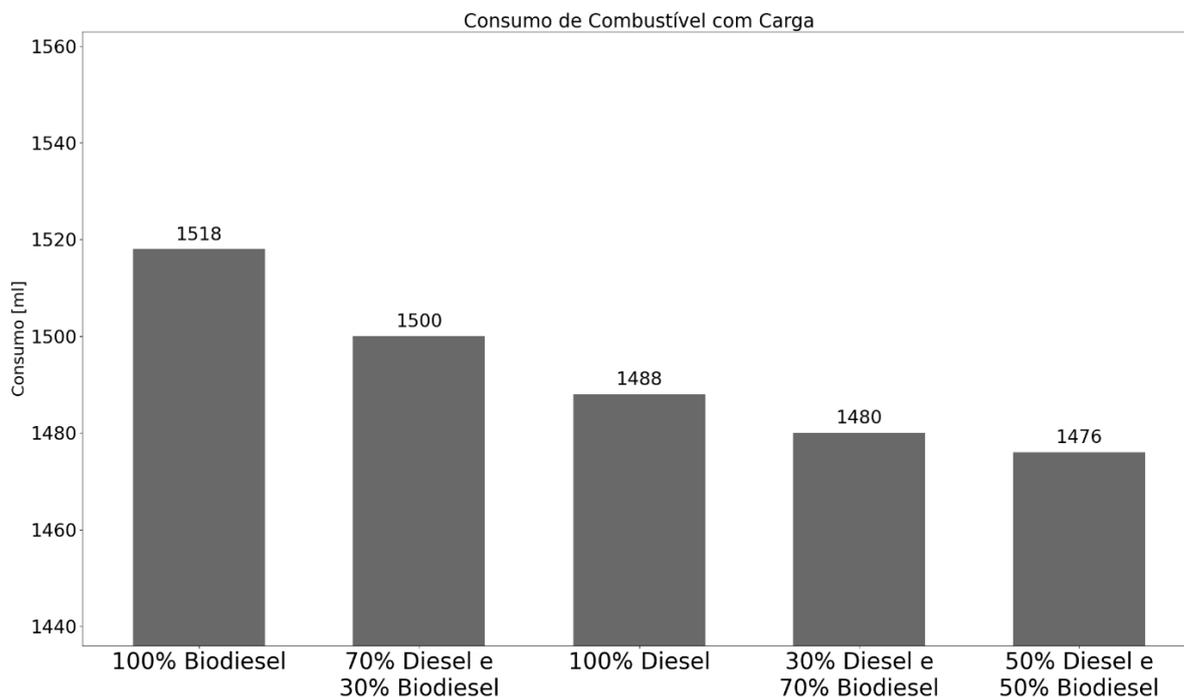


Fonte: O autor, 2024.

5.2.4 Consumo

A análise do consumo de combustível revelou que o 100% Biodiesel apresentou o maior consumo, com 1.518 ml (Figura 25), o que pode indicar uma menor eficiência energética desse combustível em comparação com as outras misturas. Em contrapartida, a mistura de 50% diesel e 50% biodiesel se destacou ao apresentar o menor consumo de combustível, com 1.476 ml, sugerindo uma maior eficiência, especialmente sob carga, mesmo que tenha exibido menores rotações.

A mistura 100% diesel com 1.488 ml e as outras misturas ficaram em posições intermediárias, o que sugere que o desempenho e o consumo são diretamente influenciados pela composição do combustível. Esses dados indicam que o 50% diesel e 50% biodiesel é uma opção interessante para aplicações que visam à economia de combustível, combinando eficiência energética com menor impacto ambiental, sendo ideal para operações onde a eficiência econômica é uma prioridade.

Figura 25. Consumo com carga aplicada

Fonte: O autor, 2024.

5.3 Cálculo da energia gerada no sistema com carga

A energia elétrica gerada pelo sistema motor-gerador operando sob carga foi determinada para cada tipo de combustível. O cálculo baseou-se na equação 1, que considera a tensão de saída, a corrente média medida e um Fator de Potência (FP) de 0,7 com base na informação do quadro 5 para determinar a potência ativa (em kW).

Os valores de energia ativa gerada pelo sistema para cada tipo de combustível são apresentados abaixo, em ordem decrescente:

- 70% Diesel e 30% Biodiesel: 4,17538 kWh
- 100% Diesel: 3,97705 kWh
- 30% Diesel e 70% Biodiesel: 3,95626 kWh
- 100% Biodiesel: 3,800463 kWh
- 50% Diesel e 50% Biodiesel: 3,48084 kWh

5.4 Fluxo de calor produzido pelo combustível

Para calcular o Poder Calorífico Inferior (PCI) das misturas com base nos dados fornecidos, precisamos seguir alguns passos. Inicialmente é necessário considerar a densidade das misturas e, em seguida, calcular a energia gerada em relação ao consumo de combustível.

5.4.1 Densidade das Misturas

Usaremos as seguintes densidades para o cálculo das misturas:

- Diesel (100%): 0,84 kg/L
- Biodiesel (100%): 0,88 kg/L

As densidades das misturas podem ser calculadas da seguinte forma:

- 70% diesel / 30% Biodiesel:

$$Densidade = (0,70 \times 0,84) + (0,30 \times 0,88) = 0,852kg/L$$

- 50% diesel / 50% Biodiesel:

$$Densidade = (0,50 \times 0,84) + (0,50 \times 0,88) = 0,86kg/L$$

- 30% diesel / 70% Biodiesel:

$$Densidade = (0,30 \times 0,84) + (0,70 \times 0,88) = 0,868kg/L$$

5.4.2 Cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI)

O cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) será realizado por meio da equação (3), e os resultados para cada combustível e mistura estão detalhados e apresentados no quadro 11 onde:

$$PCI = \frac{\text{Energia Gerada (kWh)}}{\text{Massa de Combustível (kg)}} \quad (03)$$

- Energia Gerada (kWh) será obtida pela multiplicação da potência (em kW) pelo tempo.
- Massa de combustível (kg) será obtida pela conversão do volume consumido (em litros) multiplicado pela densidade.

Quadro 11. Valores do Poder Calorífico Inferior (PCI)

COMBUSTÍVEL	ENERGIA GERADA (kWh)	CONSUMO (L)	DENSIDADE (kg/L)	MASSA (kg)	PCI (kWh/kg)	PCI (kJ/kg)
100% Diesel	3,97705	1,488	0,84	1,25	3,1816	11453,9
50% Diesel e 50% Biodiesel	3,48084	1,476	0,86	1,269	2,743	9874,72
100% Biodiesel	3,800463	1,518	0,88	1,336	2,8447	10240,77
70% Diesel e 30% Biodiesel	4,17538	1,5	0,852	1,278	3,2671	11761,63
30% Diesel e 70% Biodiesel	3,95626	1,48	0,868	1,285	3,0788	11083,68

Fonte: O autor, 2024.

Esses valores são calculados com base nos dados de energia gerada e consumo de combustível fornecidos do sistema com a carga aplicada. Eles oferecem uma visão comparativa do poder calorífico das diferentes misturas de combustíveis utilizados no experimento.

5.4.3 Cálculo da Vazão Mássica dos Gases de Escape

A determinação da vazão mássica dos gases de escape é um passo importante para análises subsequentes do balanço de energia do sistema, como o cálculo do calor perdido através da exaustão e é dada pela equação 2.

$$\dot{m}_{gases} = \rho_{gases} \times A_{escape} \times v_{gases} \quad (2)$$

Onde:

$$\rho_{gases} = 0,9kg/m^3 \text{ (estimado para gases a alta temperatura)}$$

$$A_{escape} = 0,0012566m^2 \text{ (para o diâmetro de 40mm do escapamento)}$$

$$v_{gases} = 17,02m/s \text{ (média da velocidade dos gases de escape)}$$

$$\dot{m}_{gases} = 0,9kg/m^3 \times 0,0012566m^2 \times 17,02m/s = 0,01926kg/s$$

Convertendo para kg/h:

$$\dot{m}_{gases} = 0,01926kg/s \times 3600s/h = 69,335kg/h$$

5.4.4 Cálculo do Calor Fornecido pelos Gases na Exaustão

Uma parcela significativa da energia liberada pela combustão do combustível não é convertida em trabalho útil, sendo perdida para o ambiente. Uma das principais vias de perda de calor em motores de combustão interna é através dos gases de escape quentes. O cálculo do calor fornecido pelos gases de escape (Q_{gases}), através da equação 5, permite quantificar essa perda e é essencial para a análise do balanço energético do motor.

$$Q_{gases} = \dot{m}_{gases} \times cp \times (T_{escape} - T_{ar}) \quad (05)$$

Onde:

cp é a Calor específico dos gases de escape, aproximadamente $1.005kJ/kg^{\circ}C$.

T_{escape} é a temperatura de saída dos gases no escapamento.

Agora, utilizando a fórmula para Q_{gases} e os dados experimentais de temperatura, os resultados são apresentados no Quadro 12:

Quadro 12. Calor fornecido pelos gases na exaustão

COMBUSTÍVEL	T_{Escape} (°C)	T_{Ar} (°C)	\dot{m}_{Gases} (kg/h)	\dot{Q}_{Gases} (kJ/h)
100% diesel	266	27.77	69.335	16,594.1
50% diesel e 50% Biodiesel	264.29	28.73	69.335	16,327.1
100% Biodiesel	269.31	26.95	69.335	16,845.2
70% diesel e 30% Biodiesel	265.14	29.74	69.335	16,403.3
30% diesel e 70% Biodiesel	264.29	28.37	69.335	16,308.1

Fonte: O autor, 2024.

5.4.5 Energia Química Total Disponível no Combustível

Nesta seção, estima-se a energia química total teoricamente disponível na massa de combustível consumida, com base nos valores de Poder Calorífico Inferior (PCI) termoquímicos reportados na literatura. Essa estimativa representa o montante máximo de energia térmica que poderia ser liberado pela combustão completa do combustível, considerando que a água formada permanece no estado de vapor. Usando o PCI teórico de 42500kJ/kg para o Diesel e 37500kJ/kg para o biodiesel e usando a média ponderada para as misturas e aplicando na equação 06, temos no quadro 13 os seguintes resultados:

$$Q_{Combustão\ teórica} = \dot{m}_{combustível} \times PCI_{teórico} \quad (06)$$

Quadro 13. Energia Química Total Disponível no Combustível (Teórica)

COMBUSTÍVEL	MASSA (kg)	PCI Termoquímico Estimado (kJ/kg)	$Q_{\text{Combustão teórica}}$ (kJ)
100% Diesel	1,25	42500	53125
50% Diesel e 50% Biodiesel	1,269	40000	50760
100% Biodiesel	1,336	37500	50100
70% Diesel e 30% Biodiesel	1,278	41000	52398
30% Diesel e 70% Biodiesel	1,285	39000	50115

Fonte: O autor, 2024.

5.4.6 Eficiência Global Experimental do Sistema Motor-Gerador

A energia elétrica efetivamente gerada pelo sistema motor-gerador, conforme determinado na Seção 5.3, corresponde à fração útil da energia química originalmente contida no combustível. A eficiência global do sistema η_{global} expressa a razão entre a energia elétrica obtida e a energia química total teoricamente disponível, indicando o percentual de conversão da energia do combustível em energia elétrica utilizável.

Desta forma, a eficiência global de conversão do sistema motor-gerador para cada condição de combustível é determinada pela Equação (07)

$$\eta_{global} = \frac{E_{\text{elétrica medida}}}{Q_{\text{combustão teórica}}} * 100\% \quad (07)$$

Os valores calculados para a eficiência global de conversão do sistema, sob diferentes regimes de combustível, são compilados no quadro 13.

Quadro 14. Valores estimados da energia gerada

COMBUSTÍVEL	$E_{elétrica\ medida}$ (kJ)	$Q_{combustão\ teórica}$ (kJ)	Eficiência Global η_{global} (%)
100% Diesel	14317,38	53125	26,95%
50% Diesel e 50% Biodiesel	12531,02	50760	24,69%
100% Biodiesel	13681,67	50100	27,31%
70% Diesel e 30% Biodiesel	15031,37	52398	28,69%
30% Diesel e 70% Biodiesel	14242,54	50115	28,42%

Fonte: O autor, 2024.

Os valores de eficiência global de conversão do sistema motor-gerador, detalhados anteriormente, variaram entre 24,69% e 28,69% para os diferentes combustíveis e misturas ensaiadas. Para contextualizar esses resultados, Heywood (1988) indica que o rendimento térmico efetivo para motores a diesel situa-se tipicamente na faixa de 25% a 40%, variando em função de fatores como o porte do motor, seu projeto construtivo e as condições específicas de operação.

É importante ressaltar que a eficiência global η_{global} , aqui determinada experimentalmente, é o produto da eficiência do motor η_{Motor} pela eficiência do gerador elétrico $\eta_{Gerador}$, ou seja,

$$\eta_{global} = \eta_{Motor} \times \eta_{Gerador} \quad (08)$$

Considerando que a eficiência de geradores elétricos comumente se encontra na faixa de 85% a 95% (Martinewski, 2017), os valores de eficiência global obtidos neste estudo são consistentes com o desempenho esperado para um conjunto motor-gerador. Por exemplo, um motor operando com 30% de eficiência de freio (Heywood, 1988) acoplado a um gerador com 90% de eficiência resultaria em uma eficiência global do sistema de 27% ($0,30 \times 0,90 = 0,27$), valor este que se alinha com as eficiências experimentais encontradas, como a de 26,95% para o diesel puro e 28,69% para a mistura B30.

5.4.7 Calor dissipado por convecção das Superfícies do Motor

A análise do balanço energético de um motor de combustão interna requer a quantificação das diversas parcelas de energia dissipada. Uma componente significativa dessas perdas térmicas ocorre por meio da convecção natural e/ou forçada do calor das superfícies aquecidas do motor para o ambiente circundante. A estimativa desta parcela de calor dissipado, Q_{conv} , pode ser realizada através da Lei de Resfriamento de Newton, conforme expressa na Equação (04):

$$Q_{conv} = h \times A \times (T_{superfície} - T_{ambiente}) \quad (04)$$

Onde:

- Q_{conv} é o calor dissipado por convecção (em kJ/h ou W).
- h é o coeficiente de convecção do ar (em $W/m^2 \cdot ^\circ C$).
- A é a área da superfície através da qual o calor é dissipado (em m^2).
- $T_{superfície}$ é a temperatura da superfície do motor (em $^\circ C$).
- $T_{ambiente}$ é a temperatura ambiente (em $^\circ C$).

Estimativas Necessárias:

Para o cálculo do calor dissipado por convecção, é necessário estimar os valores de algumas variáveis a fim de aproximar com os valores.

- Coeficiente Convectivo do Ar (h): Este valor depende das condições de fluxo de ar e da geometria da superfície. Para fluxos de ar naturais em torno de um motor, o coeficiente de convecção pode variar entre 5 e 25 $W/m^2 \cdot ^\circ C$, Bird *et al.* (2007). Para os presentes cálculos, adotou-se um valor médio representativo de

$$h = 15 W/m^2 \cdot ^\circ C$$

- Área da Superfície do Motor (A): A área superficial externa do motor (Matsuyama 6500, dimensões: 710 mm x 495 mm x 620 mm) foi aproximada pela área de superfície de um paralelepípedo, calculada pela fórmula:

$$A = 2 \times (L \times C + L \times H + C \times H)$$

Onde:

$$L = 710\text{mm} = 0,710\text{m (comprimento)}$$

$$C = 495\text{mm} = 0,495\text{m (largura)}$$

$$H = 620\text{mm} = 0,620\text{m (altura)}$$

Substituindo os valores e aplicando na fórmula, temos:

$$A = 2,2\text{m}^2$$

- Temperatura da Superfície do Motor ($T_{superfície}$): Adotou-se como estimativa a temperatura média do bloco do motor, obtida a partir dos dados experimentais para cada condição de combustível.
- Temperatura Ambiente ($T_{ambiente}$): Utilizou-se a temperatura do ar ambiente registrada durante os ensaios experimentais para cada condição.

Com base nessas estimativas e nos dados experimentais de temperatura, o calor dissipado por convecção foi calculado para cada condição, conforme detalhado no Quadro 15:

Quadro 15. Calor dissipado por convecção

Combustível	TEMPERATURA SUPERFÍCIE (°C)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	CALOR DISSIPADO POR CONVECÇÃO (kW)	CALOR DISSIPADO POR CONVECÇÃO (kJ/h)
100% diesel	120	27,77	3,039	10940,8
50% diesel e 50% Biodiesel	123	28,73	3,108	11189,9
100% Biodiesel	125	26,95	3,232	11635
70% diesel e 30% Biodiesel	128	29,74	3,237	11654,5
30% diesel e 70% Biodiesel	126	28,37	3,219	11588,1

Fonte: O autor, 2024.

A análise do desempenho dos diferentes combustíveis no sistema motor-gerador, com foco na eficiência global de conversão energética (Quadro 13), permite discutir a influência do tipo de combustível. Observou-se que a mistura B30 (70% Diesel e 30% Biodiesel) resultou na maior eficiência global do sistema (28,69%), gerando 11761,63 kJ de energia elétrica por kg de mistura. Este achado pode estar alinhado com as observações de Pulkrabek (2003), que sugere que misturas com teores moderados de biodiesel, como o B30, podem oferecer um compromisso vantajoso entre desempenho e outros fatores, como emissões.

O diesel puro (B0) apresentou uma eficiência global de 26,95% (gerando 11453,90 kJ/kg de energia elétrica), enquanto o biodiesel puro (B100) alcançou uma eficiência de 27,31% (gerando 10240,77 kJ/kg de energia elétrica). Embora o B100 tenha demonstrado uma eficiência de conversão ligeiramente superior à do diesel puro, a menor energia elétrica específica gerada por kg de B100 é consequência direta do seu Poder Calorífico Inferior (PCI) termoquímico ser inerentemente menor que o do diesel (valores típicos da literatura situam o PCI do biodiesel entre 37.000 a 40.000 kJ/kg, enquanto o do diesel varia entre 42.000 a 45.000 kJ/kg). Assim, mesmo convertendo a energia disponível de forma ligeiramente mais eficiente, a menor densidade energética do B100 resulta em menos energia elétrica por unidade de massa.

Por outro lado, a mistura B50 (50% Diesel e 50% Biodiesel) apresentou a menor eficiência global (24,69%). Este desempenho inferior com uma maior proporção de biodiesel (comparado ao B30 e ao B70, que teve 28,42% de eficiência) pode ser influenciado por diversos fatores, incluindo as propriedades físico-químicas do biodiesel de algodão utilizado, como viscosidade e número de cetano, que afetam a qualidade da combustão. Adicionalmente, conforme destacado por Heywood (1988), a suscetibilidade do biodiesel à degradação oxidativa durante o armazenamento ou uso pode levar à formação de compostos que impactam negativamente o sistema de injeção e a combustão, resultando em perdas de desempenho e eficiência. Embora a degradação não tenha sido objeto de análise direta neste estudo, a sua ocorrência potencial é um fator crítico que deve ser cuidadosamente gerido na utilização de biodiesel para evitar prejuízos à eficiência e à durabilidade dos motores.

Desta forma, a utilização do biodiesel de algodão, especialmente em misturas otimizadas como a B30, demonstra potencial para uma conversão energética eficiente no sistema estudado. Contudo, os resultados também sugerem que o aumento da proporção de biodiesel pode requerer atenção a fatores como suas propriedades intrínsecas e estabilidade para manter ou otimizar o desempenho energético e mitigar desafios associados à sua degradação (Heywood, 1988; Pulkrabek, 2003).

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho descreveu a metodologia experimental empregada e analisou os dados coletados durante ensaios com um motor-gerador operando em ciclo Diesel.

O foco central foi a avaliação do biodiesel derivado do óleo de semente de algodão como um substituinte parcial ou total ao diesel comercial.

Adicionalmente, o estudo investigou os impactos de parâmetros físico-químicos do biodiesel e das variações nas condições de operação e carga sobre o desempenho do conjunto motor-gerador, bem como uma análise preliminar de componentes energéticos associados à exaustão e perdas térmicas. Confirmou-se a viabilidade técnica da utilização de biodiesel em motores de combustão interna, ressaltando-se tanto os potenciais benefícios ambientais quanto os desafios inerentes à sua aplicação em comparação ao diesel convencional.

6.1 Conclusões

A partir da análise dos resultados obtidos, especialmente no que diz respeito à energia elétrica específica gerada e à eficiência global de conversão do sistema motor-gerador, foi possível extrair algumas conclusões relevantes sobre o desempenho do conjunto avaliado:

A escolha da mistura de combustível mais adequada deve levar em conta um equilíbrio cuidadoso entre a eficiência de conversão energética, o desempenho do motor sob carga e, idealmente, aspectos como a durabilidade do equipamento e o consumo de combustível — ainda que estes últimos não tenham sido objeto direto de avaliação ao longo do presente estudo. O biodiesel de algodão se mostrou uma alternativa viável, com diferentes proporções apresentando comportamentos distintos quanto ao desempenho energético.

A mistura B30 (70% Diesel e 30% Biodiesel) destacou-se por apresentar a maior eficiência global de conversão do sistema (28,69%) e a maior energia elétrica específica gerada (11761,63 kJ/kg de mistura) entre todas as configurações testadas.

Este resultado sugere que, para aplicações que demandam maximização da conversão de energia do combustível em eletricidade sob as condições de carga avaliadas, a mistura B30 pode ser a mais indicada, oferecendo um bom equilíbrio entre o uso de fonte renovável e o desempenho energético. Esta observação encontra respaldo parcial na literatura, como em Pulkrabek (2003), que destaca o potencial de misturas com teores intermediários de biodiesel como soluções energeticamente interessantes.

O biodiesel puro (B100) apresentou uma eficiência global de conversão (27,31%) levemente superior à do diesel puro (B0), que atingiu 26,95%. No entanto, a energia elétrica específica gerada com B100 (10240,77 kJ/kg) foi inferior à obtida com B0 (11453,90 kJ/kg), devido ao menor Poder Calorífico Inferior (PCI) do biodiesel em relação ao diesel mineral. Isso mostra que, embora o sistema tenha operado com uma eficiência de conversão ligeiramente melhor com o biodiesel puro, sua menor densidade energética comprometeu a quantidade de energia elétrica gerada por unidade de massa. Observações como a operação em temperaturas mais baixas (especialmente sem carga) com B100 e possíveis implicações na durabilidade do motor são relevantes — desde que sustentadas por dados experimentais adicionais — e estão alinhadas com alertas da literatura, como o de Heywood (1988), sobre a degradação do biodiesel em usos prolongados.

Por outro lado, a mistura B50 (50% Diesel e 50% Biodiesel) apresentou o pior desempenho energético entre os combustíveis testados, com a menor eficiência global (24,69%) e a menor energia elétrica específica (9874,72 kJ/kg). Esse resultado indica que, para este motor e nas condições de teste adotadas, o aumento da proporção de biodiesel para 50% não foi benéfico ao desempenho do sistema. Fatores como o aumento da viscosidade, a redução do PCI e possíveis alterações no processo de combustão podem ter influenciado negativamente esse desempenho

No que se refere às perdas térmicas e aos parâmetros de transferência de calor, os valores estimados para o coeficiente de convecção (h), o calor dissipado pelas superfícies do motor (Q_{conv}), e o calor evacuado pelos gases de exaustão (Q_{gases}), foram obtidos com base em modelos teóricos e medições experimentais de temperatura. A comparação desses parâmetros com referências bibliográficas — como Incropera e DeWitt (2011), no caso do coeficiente de convecção, e Heywood

(1988), para os gases de escape — deve ser feita com cautela, visto que esses valores variam consideravelmente com as condições operacionais e a geometria dos sistemas analisados. Ainda assim, as ordens de grandeza obtidas nesta pesquisa mostraram-se compatíveis com o esperado para motores de combustão interna de pequeno a médio porte operando em condições similares. Para uma validação mais precisa dessas estimativas, seriam recomendadas medições experimentais mais diretas ou simulações numéricas mais detalhadas.

Como resultado deste trabalho, foram gerados artigos científicos e apresentações em congressos como o CONEM (Congresso Nacional de Engenharia Mecânica) CONIC (Congresso de Iniciação Científica do IFPE). Além disso, a pesquisa integrou um programa de intercâmbio internacional na Escuela de Verano da Universidad de Concepción, Campus Chillán, contribuindo para o compartilhamento e a ampliação dos conhecimentos desenvolvidos. Essas atividades destacam a relevância e a aplicabilidade prática dos resultados obtidos, reforçando o impacto significativo do estudo tanto no âmbito acadêmico quanto profissional.

6.2 Trabalhos futuros

Para garantir que os estudos realizados até agora possam continuar se desenvolvendo, algumas direções futuras foram pensadas. Essas propostas têm o objetivo de aprofundar o entendimento e buscar soluções mais eficientes e sustentáveis para os motores diesel. As principais sugestões são:

- Investigar experimentalmente o impacto da recirculação dos gases de escape (EGR) no desempenho e nas emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) do motor operando com as diferentes misturas de diesel e biodiesel de algodão;
- Aprofundar a análise da eficiência exergética do motor a partir dos dados experimentais coletados, com o objetivo de identificar os principais pontos de destruição de exergia e otimizar o aproveitamento energético global;
- Desenvolver e validar modelos de simulação computacional do ciclo termodinâmico do motor diesel, permitindo analisar a influência de parâmetros como a taxa de compressão, o avanço da injeção, e as características da atomização do

combustível (para diferentes misturas) sobre o desempenho, o consumo e as emissões;

- Realizar uma análise detalhada das emissões gasosas do motor (NO_x, CO, CO₂, hidrocarbonetos não queimados e material particulado) utilizando um analisador de gases calibrado e funcional, como o Testo 350, que é capaz de medir parâmetros relevantes de emissão. Ressalta-se que, neste estudo, o uso desse equipamento foi comprometido por uma falha na célula de CO₂, o que impediu a obtenção de dados precisos para essa variável;

- Projetar, construir e implementar um dinamômetro de freio ou bancada dinamométrica para medições diretas e precisas do torque e da potência mecânica desenvolvida pelo motor, permitindo dissociar a eficiência do motor da eficiência do gerador;

- Desenvolver um sistema de monitoramento contínuo da vibração do motor, utilizando múltiplos acelerômetros e um sistema de aquisição de dados (como um microcontrolador Arduino), para analisar os modos de vibração e correlacioná-los com diferentes condições de operação e tipos de combustível, podendo indicar irregularidades na combustão ou desgaste;

- Conduzir estudos de longa duração para avaliar os efeitos do uso contínuo de biodiesel de algodão e suas misturas sobre o desgaste de componentes críticos do motor (sistema de injeção, anéis de pistão, válvulas), a estabilidade do óleo lubrificante e a evolução da eficiência e das emissões ao longo do tempo;

- Realizar uma análise de viabilidade técnico-econômica mais aprofundada sobre a utilização do biodiesel de algodão, considerando custos de produção, logística, preço de mercado em relação ao diesel e potenciais incentivos fiscais;

- Investigar sistematicamente o impacto da oxidação progressiva e da degradação de misturas diesel-biodiesel durante o armazenamento prolongado sobre suas propriedades físico-químicas e energéticas, e como essas alterações afetam o desempenho e as emissões em motores de combustão interna.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 37. Brasília, 28 de agosto de 2015. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacaoanp/resol-anp/2015/agosto&item=ranp-37--2015>. Acesso em: 19 jul. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 50, de 23 de dezembro de 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 10 jun. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Resolução ANP nº 798, de 23 de março de 2023. Dispõe sobre as especificações do óleo diesel de uso rodoviário e não rodoviário comercializado em todo o território nacional. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ALIREZA, Shirneshan; HOSSEINZADEH, Bahram Samani; NEDAYALI, Amin. Artificial neural network model to predict the performance of a diesel power generator fueled with biodiesel. **The Journal of Engine Research**, v. 42, p. 43-50, 2022.

ARMSTRONG, Lloyd Van Horn; PROCTOR, Charles Lafayette. diesel engine. **Encyclopedia Britannica**, 26 Abr. 2023. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>. Acesso em: 19 jul. 2023.

BALAT, Mustafa; BALAT, Havva. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. **Applied Energy**, v. 86, n. 11, p. 2273-2282, 2009.

BIRD, Robert Byron; STEWART, Warren Earl; LIGHTFOOT, Edwin Neal. **Transport phenomena**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CASTELLANELLI, Marcio; DE SOUZA, Samuel Nelson Melegari; SUEDÊMIO, Silva Lima; KAILER, Euro K. Desempenho de motor ciclo diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 145-153, 2008.

CAVALCANTI, Eptácio José da Costa et al. Exergoeconomic and Exergoenvironmental Comparison of diesel-biodiesel Blends in a Direct Injection Engine at Variable Loads. **Energy Conversion and Management**, v. 183, p. 450–461, 2019. Disponível em: <doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.113>.

COSTA, Felipe Ferreira Alves; CERQUEIRA, Gustavo Manfredini; OLIVEIRA, Muriel Ramos de; BOTAN, Maria Claudia Costa de Oliveira. Evolução do biodiesel nos últimos 10 anos: uma revisão de literatura. **Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC) - UNESP Rosana**, São Paulo, 2024.

COSTA NETO, Pedro Roberto; ROSSI, Luiz Fernando Scavarda; ZAGONEL, Gilberto Fernandes; RAMOS, Luiz Pereira. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000.

DA SILVA BARROS, R. W. et al. Experimental Evaluation of the Use of Cottonseed Biodiesel and Mixtures with Commercial diesel Oil in diesel Generator Set. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 2, 2018.

EPE (Brasil). Projeção da demanda de energia elétrica. **Epe.gov.br**, [S. l.], p. 1-95, 5 jan. 2017. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/tópico-61/DEA%2001_2017%20-%20Projeções%20da%20Demanda%20de%20Energia%20Elétrica%202017-2026_VF%5B1%5D.pdf. Acesso em: 27 nov. 2023.

ESTEVES, Rafael Alves; PEREIRA, Roberto Guimarães. Análise sobre a evolução do biodiesel no Brasil. **Revista ESPACIOS**, v. 37, n. 02, 2016.

FLIR. **Câmera termográfica modelo i7**. Disponível em: <https://www.flir.com>. Acesso em: 20 dez. 2023.

GUIMARÃES, Jorge Ricardo Pinto Ferreira. Toxicologia das emissões veiculares de diesel: um problema de saúde ocupacional e pública. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 6, n. 1, p. 82-94, 2004.

HEYWOOD, John Bennett. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hill, 1988.

INCROPERA, Frank Patrick Incropera; DEWITT, David Philip. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. Wiley, 2011.

ICEL. **Alicate amperímetro digital Manaus AD-9900**. Disponível em: <https://www.icelmanaus.com.br>. Acesso em: 20 dez. 2023.

INSTRUTHERM. **Termo-higro-anemômetro digital portátil THAR-185**. Disponível em: <https://www.instrutherm.com.br>. Acesso em: 20 dez. 2023.

INSTRUTHERM. **Medidor de vibração digital e tacômetro óptico e por contato MV-690**. Disponível em: <https://www.instrutherm.com.br>. Acesso em: 20 dez. 2023.

LAURINDO, José Carlos. Combustíveis alternativos no Tecpar e na UFPR. In: **SEMINÁRIO PARANAENSE DE BIODIESEL**, 1., 2003, Londrina. Anais eletrônicos... Disponível em: <http://www.tecpar.br/cerbio/Seminario-palestras.htm>. Acesso em: 23 ago. 2003.

MARTINEWSKI, Alexandre. **Máquinas elétricas: motores, geradores e partidas**. São Paulo: Érica, 2017. 160 p. ISBN 978-85-365-2708-6.

MATSUYAMA. **Gerador 6500 - diesel 6500 Monofásico**. Disponível em: <https://www.matsuyama.ind.br/41/gerador-6500--diesel-6500-monofasico>. Acesso em: 9 dez. 2023.

MENDES, L. F.; PEREIRA, A. L. **Combustíveis Derivados de Petróleo: Características e Usos**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2012.

MIRHASHEMI, Fatemeh Sadat; SADRNIA, Hassan. NOX emissions of compression ignition engines fueled with various biodiesel blends: A review. **Journal of the Energy Institute**, v. 93, n. 1, p. 129-151, 2020.

MITTELBACH, Martin; TRITTHART, Peter; JUNEK, Hans. diesel fuel derived from vegetable oils, II: emission tests using rape oil methyl ester. **Energy in Agriculture**, v. 4, p. 207-215, 1985.

MORAN, Michael Joseph.; SHAPIRO, Howard Nelson. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Wiley, 2010.

NAMASIVAYAM, Anand Marimuthu. et al. Biodiesel, emulsified biodiesel and dimethyl ether as pilot fuels for natural gas fuelled engines. **Applied Energy**, v. 87, n. 3, p. 769-778, 2010.

OCHOA, Álvaro Antonio Villa.; DUTRA, José Carlos Costa.; HENRÍQUEZ, Jorge Roberto Gonzáles. Energetic and exergetic study of a 10RT absorption chiller integrated into a microgeneration system. **Energy Conversion and Management**, v. 88, p. 545-553, 2014.

OFICINA EXPERT. Definição de motores. **Oficina Expert**, 2016. Disponível em: <https://oficinaexpert.blogspot.com/2016/01/definicao-de-motores.html?m=0>. Acesso em: 04 set. 2024.

ÓLEO diesel. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/oleo-diesel#:~:text=O%20%C3%B3leo%20diesel%20%C3%A9%20um>. Acesso em: 10 jul. 2023.

PÉREZ-SÁNCHEZ, A. et al. Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diesel-biodiesel. **Ingeniería Investigación y Tecnología**, v. 16, n. 1, p. 83-92, 2015.

PEREIRA, José Claudio. **Motores e Geradores**. Revisão 3. 2006. 121 p. Disponível em: <http://www.mecanica.ufrgs.br/mmotor/apostila.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

PULKRABEK, Willard W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. Prentice Hall, 2003.

POSTOS MENOR PREÇO. **Teste de densidade do diesel**. Disponível em: <https://www.postosmenorpreco.com.br/post/teste-de-densidade-do-diesel>. Acesso em: 22 jan. 2024.

RAMOS, Luiz Pereira et al. Biodiesel. **Revista Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, v. 31, p. 29, 2003.

SANTOS, Ricardo Freitas de Escobar. Análise experimental do desempenho e da combustão de um motor de ignição por compressão alimentada por uma mistura ternária de combustíveis – diesel, biodiesel e etanol. 2005. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANTOS, Tatieli Knöner. Caracterização Físico-Química e Desempenho de Motor Gerador Operando com Blendas de Biodiesel Óleo de Gergelim. 2023. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

SEBAYANG, A. H. et al. Modelling and prediction approach for engine performance and exhaust emission based on artificial intelligence of Sterculia foetida biodiesel. **Energy Reports**, v. 8, p. 8333-8345, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.052>.

SILVA, C. Eletricidade aplicada. Disponível em: <http://www.clubedaeletronica.com.br/p/eletricidade-aplicada.html>. Acesso em: 10 jul. 2023.

SILVA, Marcos José da; DE SOUZA, Silvio Natalino Moreira; SOUZA, Ademir Antônio; MARTINS, Gustavo Inácio; SECCO, Dioni. Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 320–326, 2012.

SILVA, Paulo Sérgio. **Motores a diesel e Emissões de Poluentes**. São Paulo: Editora Técnica, 2015.

SILVEIRA, Vander Fabio. Comparação de desempenho e emissões de um motor gerador operando com diesel e blends de biodiesel monitorado por sistemas de automação. 2021. 107 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

SOUZA, Anderson Breno et al. A Review of Tropical Organic Materials for biodiesel as a Substitute Energy Source in Internal Combustion Engines: A Viable Solution? **Energies**, v. 16, p. 3736, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16093736>.

SUAREZ, Paulo A. Z.; MENEGHETTI, Simoni M. Plentz. 70º aniversário do biodiesel em 2007: evolução histórica e situação atual no Brasil. **Química Nova**, v. 30, n. 8, p. 2068-2071, 2007.