DANILO SIMON

ANÁLISE POR SUPERFÍCIES DE RESPOSTA DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE UM MOTOR GERADOR DUAL COM BIODIESEL E BIOGÁS ENRIQUECIDO COM HIDROGÊNIO

> CASCAVEL PARANÁ-BRASIL MARÇO-2025

ANÁLISE POR SUPERFÍCIES DE RESPOSTA DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE UM MOTOR GERADOR DUAL COM BIODIESEL E BIOGÁS ENRIQUECIDO COM HIDROGÊNIO;

> Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para o título de Mestre.

> Professor Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

Professor Coorientador: Dr. Waldir Mariano Machado Junior.

CASCAVEL PARANÁ-BRASIL MARÇO-2025

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

Simon, Danilo Análise por superfícies de resposta do desempenho energético e emissões de um motor gerador dual com biodiesel e biogás enriquecido com hidrogênio / Danilo Simon; orientador Samuel Nelson Melegari de Souza; coorientador Waldir Mariano Machado Junior. -- Cascavel, 2025. 108 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) --Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2025. 1. Hidrogênio. 2. Biogás. 3. Biodiesel. 4. Motor Dual. I. Melegari de Souza, Samuel Nelson, orient. II. Machado Junior, Waldir Mariano, coorient. III. Título.

DANILO SIMON

Análise por superfícies de resposta do desempenho energético e emissões de um motor gerador dual com biodiesel e biogás enriquecido com hidrogênio

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADO pela seguinte banca examinadora:

Orientador - Samuel Nelson Melegari de Souza Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Carlos Eduardo Camargo Nogueira Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Cascavel, 10 de março de 2025

Dedico à minha esposa Ana Carolina Neumann Barbiero por ter salvado quem eu realmente sou...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Ana Carolina por apoiar-me nas decisões mais difíceis que já me deparei, por valorizar a minha presença acima de qualquer "prosperidade" ... sem você nada disso seria possível.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, por toda a disponibilidade, esforço e paciência, mas acima de tudo, por acreditar em mim e me proporcionar tamanha oportunidade.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Waldir Mariano Machado Junior por todas as contribuições e conselhos para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Juliano de Souza por toda estrutura disponibilizada e por ter se tornado tão bom amigo, sua ajuda foi fundamental.

Aos amigos da Biogás Motores, Anderson, Nathan e Ricardo por me ajudarem desde a coleta até a contingência de vazamento de gases.

Agradeço ao Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos e ao LABTES pela disponibilização dos equipamentos e da matéria-prima para a síntese de biodiesel.

Meus sinceros agradecimentos vão também aos colegas da pós-graduação, especialmente a Benhurt, Jean, Rayne e Marcelo, pela colaboração com combustíveis e processos.

Expresso minha gratidão aos professores, Prof. Dr. Reinaldo A. Bariccatti e Profa. Dra. Simone D. Gomes, pela assistência nas análises dos combustíveis.

Ao amigo Juarez, à Oxiguaçu e à Granja Nettson pelos gases fornecidos.

Sou grato a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura pelo conhecimento transmitido.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Por fim, agradeço a Deus por ter colocado todos vocês em meu caminho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Diferentes gerações e matérias primas para produção de biodiesel	6
Figura 2: Reação de transesterificação para produção de biodiesel	8
Figura 3: Estágios da digestão anaeróbia1	0
Figura 4: Biodigestor tipo Lagoa Coberta1	2
Figura 5: Métodos de produção de hidrogênio1	5
Figura 6: Quatro tempos de funcionamento do motor de ignição por compressão1	8
Figura 7: Mistura entre ar biogás e hidrogênio por sistema Venturi2	20
Figura 8: Quatro tempos de funcionamento do motor de ignição por compressã	io
operando em modo dual com biodiesel e biogás enriquecido com hidrogênio2	21
Figura 9: Processo de produção de Biodiesel de soja por transesterificação2	24
Figura 10: Blendas de Biodiesel/Diesel2	25
Figura 11: Bomba calorimétrica DDA modelo E2K2	25
Figura 12: Picnômetro de 10ml2	26
Figura 13: Balança analítica Shimadzu modelo ATY2242	27
Figura 14: Granja Nettson, biodigestor tipo lagoa coberta e captação de resíduos2	28
Figura 15: Sistema de coleta e análise de composição de biogás2	28
Figura 16: Coleta e compressão de biogás na Granja Nettson2	29
Figura 17: Monitor de Extração de Gases LANDTEC GEM5000 e resultados obtido	s
da análise do biogás	60
Figura 18: Motor Gerador Branco BD 6500	3
Figura 19: Carburador Huayi GX390/188F, flanges e filtro de ar	\$4
Figura 20: Quadro de cargas resistivas	5
Figura 21: Rotâmetro LZT M-6	6
Figura 22: Proveta graduada em polipropileno	57
Figura 23: Multímetro para aquisição de tensão e corrente gerada Fluke F302+3	57
Figura 24: Analisador de emissões Infralyt ELD	8
Figura 25: Flange de admissão de ar do motor gerador sem filtro de ar4	4
Figura 26: Medidas do adaptador Motor-Gerador/Carburador4	4
Figura 27: Motor-Gerador com carburador adaptado para operação em modo dual 4	-5
Figura 28: Configuração de sistema para enriquecimento de biogás com hidrogên	io
4	6

Figura 29: Cromatógrafo Gasoso Shimadzu GC-201447
Figura 30: Sistema experimental com operação em modo dual utilizando biogás
enriquecido com hidrogênio48
Figura 31: Sistema experimental49
Figura 32: Sistema experimental com operação em modo dual utilizando biogás
enriquecido com hidrogênio50
Figura 33: Diagrama de análise de dados e respostas de desempenho53
Figura 34: Diagrama de análise de dados e respostas de emissão
Figura 35: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de potência
gerada (kW)60
Figura 36: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de potência gerada (kW) para
curva linear com termos quadráticos61
Figura 37: Superfície de resposta de potência gerada (kW) sem a presença de
hidrogênio no combustível gasoso62
Figura 38: Superfície de resposta de potência gerada (kW) com a presença de
hidrogênio no combustível gasoso62
Figura 39: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de consumo
específico de combustível líquido (g kWh ⁻¹)64
Figura 40: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de consumo específico de
combustível líquido (g kWh ⁻¹) para curva linear com termos quadráticos65
Figura 41: Superfície de resposta de consumo específico de combustível líquido (g
kWh ⁻¹) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso66
Figura 42: Superfície de resposta de consumo específico de combustível líquido (g
kWh ⁻¹) com a presença de hidrogênio no combustível gasoso67
Figura 43: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de eficiência (%)
Figura 44: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de eficiência (%) para curva
linear com termos quadráticos69
Figura 45: Superfície de resposta de eficiência (%) sem a presença de hidrogênio no
combustível gasoso70
Figura 46: Superfície de resposta de eficiência (%) com a presença de hidrogênio no
combustível gasoso71

Figura 47: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de emissão de monóxido de carbono (CO)73 Figura 48: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de emissão de monóxido de carbono (CO) para curva quadrática completa.....73 Figura 49: Superfície de resposta de emissão de monóxido de carbono (CO) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso74 Figura 50: Superfície de resposta de emissão de monóxido de carbono (CO) com a presença de hidrogênio no combustível gasoso75 Figura 51: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de emissão de dióxido de carbono (CO₂).....77 Figura 52: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de emissão de dióxido de carbono (CO₂) para curva linear com termos quadráticos......78 Figura 53: Superfície de resposta de emissão de dióxido de carbono (CO₂) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso79 Figura 54: Superfície de resposta de emissão de dióxido de carbono (CO₂) com a presença de hidrogênio no combustível gasoso79 Figura 55: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC)......81 Figura 56: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC) para curva linear com termos quadráticos82 Figura 57: Superfície de resposta de emissão de hidrocarbonetos (HC) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso83 Figura 58: Superfície de resposta de emissão de hidrocarbonetos (HC) com a presença de hidrogênio no combustível gasoso84 Figura 59: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x)86 Figura 60: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de emissão de óxidos de Figura 61: Superfície de resposta de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso88 Figura 62: Superfície de resposta de emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso89 Figura 63: Otimização de configurações de combustíveis no motogerador90

Figura 64: Consumo específico de combustível líquido em função da carga aplicada
para diferentes configurações de combustível líquido e gasoso
Figura 65: Eficiência em função da carga aplicada para diferentes configurações de
combustível líquido e gasoso93
Figura 66: Concentração de CO em função da carga aplicada para diferentes
configurações de combustível líquido e gasoso94
Figura 67: Concentração de CO2 em função da carga aplicada para diferentes
configurações de combustível líquido e gasoso95
Figura 68: Concentração de HC em função da carga aplicada para diferentes
configurações de combustível líquido e gasoso96
Figura 69: Concentração de NOx em função da carga aplicada para diferentes
configurações de combustível líquido e gasoso97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens de categorias de matérias primas e gerações d	е
biodiesel	7
Tabela 2: Intervalos de concentração de gases para diferentes fontes de materia	al
orgânico1	2
Tabela 3: Comparação entre tecnologias a combustão de hidrogênio e célula d	е
combustível1	7
Tabela 4: Tendências de poder calorífico e emissões de biodiesel, biogás e hidrogêni	0
quando utilizados em modo dual2	2
Tabela 5: Concentração de Diesel e Biodiesel nas blendas preparadas2	4
Tabela 6: Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) das blendas ensaiadas2	6
Tabela 7: Densidade das blendas ensaiadas2	7
Tabela 8: Especificações das faixas de medição e precisão do Monitor de Extração d	е
Gases Landtec GEM5000	0
Tabela 9: Composição e concentração do biogás coletado 3	0
Tabela 10: Composição e concentração do hidrogênio comprimido fornecido pel	а
empresa Oxiguaçu do fabricante Messer FISPQ Número: 188	1
Tabela 11: Propriedades físico-químicas do hidrogênio comprimido 3	2
Tabela 12: Dados técnicos do motor3	3
Tabela 13: Dados técnicos do Gerador3	4
Tabela 14: Dados técnicos do Carburador3	5
Tabela 15: Especificações técnicas do regulador de pressão Vortech VT133	6
Tabela 16: Especificações técnicas do sensor de corrente gerada3	8
Tabela 17: Especificações técnicas do sensor de tensão	8
Tabela 18: Especificações técnicas do analisador de emissões	9
Tabela 19: Projeto experimental (parâmetros de entrada e codificação)4	0
Tabela 20: Matriz experimental (Entradas)4	1
Tabela 21: Tabela de ensaios comparativos4	2
Tabela 22: Matriz experimental dados de entradas e respostas5	5
Tabela 23: Tabela de incertezas percentuais e precisão de parâmetros de entrad	а
medidos5	8

Tabela 24: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de emissão de
potência gerada (kW)59
Tabela 25: Teste ANOVA referente ao modelo de potência gerada (kW)59
Tabela 26: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de consumo
específico de combustível líquido (g kWh ⁻¹)63
Tabela 27: Teste ANOVA referente ao modelo de consumo específico de combustível
líquido (g kWh ⁻¹)63
Tabela 28: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de eficiência (%)
Tabela 29: Teste ANOVA referente ao modelo de eficiência (%)68
Tabela 30: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de emissão de
monóxido de carbono (CO)72
Tabela 31: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de monóxido de carbono
(CO)
Tabela 32: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de emissão de
dióxido de carbono (CO ₂)76
Tabela 33: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de dióxido de carbono (CO2)
Tabela 34: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de emissão de
hidrocarbonetos (HC)
$T_{\rm r}$ = 0.5. $T_{\rm r}$ = 4. (10) / 0. $T_{\rm r}$ = 4. $T_{\rm r}$
Tabela 35: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC)
Tabela 35: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC)
Tabela 35: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC)
Tabela 35: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC)
Tabela 35: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC)
Tabela 35: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC)

RESUMO

SIMON, Danilo. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro de 2025. Análise por superfícies de resposta do desempenho energético e emissões de um motor gerador dual com biodiesel e biogás enriquecido com hidrogênio. Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

Este estudo compreende a análise da operação em modo dual de motores a ignição por compressão, empregando biodiesel e biogás enriquecido com hidrogênio como combustíveis, com o intuito de melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões. Os resultados experimentais indicaram que a substituição parcial do diesel pelo combustível gasoso promoveu reduções significativas no consumo específico, com valores máximos 21% em comparação ao uso exclusivo do diesel. A incorporação de hidrogênio (12,5% do fluxo total) ao biogás resultou em um aumento médio de 0,76% na eficiência, compensando o baixo poder calorífico e a eficiência volumétrica reduzida do biogás, enguanto a variação na concentração de biodiesel revelou um efeito não linear, com acréscimos médios de 0,4% na eficiência. Quanto às emissões, observou-se redução média de 66,4% nos níveis de monóxido de carbono com o aumento da carga e uma diminuição adicional de aproximadamente 5% nas emissões de CO com a adição de hidrogênio. Entretanto, a operação dual apresentou emissões de hidrocarbonetos não queimados superiores às do diesel puro, embora o enriquecimento com hidrogênio tenha mitigado esse efeito, reduzindo-os em 4,1%. As emissões de NOx aumentaram em média 26,6% com a adição de hidrogênio, mas a operação dual reduziu esses poluentes em 11,5% (modo enriquecido) e 33,3% (modo exclusivo de biogás) em relação ao diesel puro. Por fim, a metodologia de superfície de resposta mostrou-se robusta e confiável, conforme evidenciado pela validação experimental apresentando erros entre 0,55% e 8,66% e uma incerteza total de 4,84%, garantindo confiabilidade dos dados e reforçando o potencial da operação dual para otimizar o desempenho de motores e mitigar suas emissões.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás; Hidrogênio; Biodiesel; Combustível Dual; Superfície de Resposta.

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

ABSTRACT

SIMON, Danilo. Western Paraná State University, February 2025. **Response Surface Analysis of the Energy Performance and Emissions of a Dual-Mode Generator Engine Using Biodiesel and Hydrogen-Enriched Biogas.** Advisor: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

This study analyzes the dual-mode operation of compression ignition engines using biodiesel and biogas enriched with hydrogen as fuels, with the aim of enhancing energy efficiency and reducing emissions. Experimental results indicated that the partial replacement of diesel with the gaseous fuel yielded significant reductions in specific fuel consumption, reaching maximum values 21% compared to the exclusive use of diesel. The incorporation of hydrogen (12.5% of the total flow) into the biogas resulted in an average efficiency increase of 0.76%, compensating for the biogas's low calorific value and reduced volumetric efficiency, while variations in biodiesel concentration exhibited a non-linear effect, with average efficiency increments of 0.4%. Regarding emissions, an average reduction of 66.4% in carbon monoxide levels was observed with increasing load, along with an additional decrease of approximately 5% in CO emissions upon the addition of hydrogen. However, the dual-mode operation produced higher unburned hydrocarbon emissions compared to pure diesel, although hydrogen enrichment mitigated this effect by reducing them by 4.1%. Nitrogen oxide (NO_x) emissions increased on average by 26.6% with hydrogen addition, but the dual-mode operation reduced these pollutants by 11.5% (enriched mode) and 33.3% (biogasexclusive mode) relative to pure diesel. Finally, the response surface methodology proved to be robust and reliable, as evidenced by experimental validation showing errors between 0.55% and 8.66% and a total uncertainty of 4.84%, thereby ensuring data reliability and reinforcing the potential of dual-mode operation to optimize compression ignition engines performance and mitigate emissions.

KEYWORDS: Biogas; Hydrogen; Biodiesel; Dual Fuel; Response Surface Methodology.

SUMÁRIO

[&]quot;This study was carried out with the support of the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brazil (CAPES) - Funding Code 001."

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivo Geral	3
1.2.	Objetivos Específicos	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	Combustíveis renováveis	4
2.2.	Biodiesel	4
2.2.1.	Produção de biodiesel	5
2.2.2.	Utilização de biodiesel	8
2.3.	Biogás	9
2.3.1.	Produção de biogás	10
2.3.2.	Utilização de biogás	13
2.4.	Hidrogênio	14
2.4.1.	Produção de hidrogênio	15
2.4.2.	Utilização de hidrogênio	
2.5.	Motores de ignicão por compressão	
2.6.	Motor Dual	
3.	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1.	Classificação da Pesquisa	23
3.2.	Material	
3.2.1.	Biodiesel	
3.2.2.	Biogás	
3.2.3.	Hidrogênio	
3.2.4.	Conjunto motor gerador	
3.2.5.	Carburador	
3.2.6.	Cargas de acionamento	
3.2.7.	Sistema de aquisição de dados	
3.3.	Metodologia	
3.3.1.	Metodologia experimental	
3.3.2.	Metodologia para análise de incertezas	
3.3.3.	Metodologia de conversão do moto gerador em modo dual	
3.3.4.	Metodologia de enriquecimento de biogás com hidrogênio	45
3.3.5.	Metodologia para análise de desempenho e coleta de dados	
3.3.6.	Metodologia para análise de emissões e coleta de dados	
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	
4.1.	Matriz de dados experimentais	
4.2.	Cálculo de incertezas experimentais	58
4.3.	Potência gerada	59
4.4.	Consumo específico de combustível líquido	63
4.5.	Eficiência	67
4.6.	Emissão de monóxido de carbono (CO)	71
4.7.	Emissão de dióxido de carbono (CO ₂)	76
4.8.	Emissão de hidrocarbonetos (HC)	80
4.9.	Emissão de óxidos de nitrogênio (NO _x)	84
4.10.	Validação e otimização	
4.11.	Comparação entre modos de operação	
5.	CONCLUSÕES	
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa na produção e utilização de bioenergia e fontes renováveis, tem atraído a atenção mundial não somente devido à redução de emissões, mas também de modo a compor uma matriz energética diversa aumentando também o nível de segurança energética onde se aplica (Jonek-Kowalska, 2022).

Dentre as fontes bioenergéticas a biomassa se destaca como um recurso renovável de altíssima versatilidade, em que seus múltiplos produtos podem ser convertidos por uma ampla gama de processos em biocombustíveis, entre eles o biodiesel (Axon; Darton, 2024).

Em uma análise local, Tiburcio, Macêdo e Neto (2023) ressaltam o Brasil como segundo maior produtor de biodiesel do mundo com cerca de 13,2% da produção global, sustentado pela implementação de políticas públicas realizadas no país, dentre elas o programa RenovaBio de 2017 que tem por objetivo a redução de emissão de gases de efeito estufa e a viabilização de uma economia baseada em baixos índices de carbono.

Dentre os biocombustíveis líquidos o biodiesel é reconhecido como alternativa aos combustíveis fósseis principalmente voltada ao setor de transportes devido a sua origem biodegradável, renovável e que favorece a segurança energética por apresentar grande versatilidade de fontes de produção (Bombo et al., 2021).

Na gama dos biocombustíveis gasosos o biogás, produto da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos realizadas pelo metabolismo de microrganismos (Kougias; Angelidaki, 2018), emerge como uma fonte de notável importância para uma sociedade sustentável (Alayande et al., 2024), sendo promotora do aproveitamento de resíduos orgânicos, eventualmente reduzindo as emissões de gases de efeito estufa gerados quando utilizado na forma de combustível (Vasan et al., 2024).

Os benefícios ambientais e energéticos da utilização do biogás como combustível de motores a combustão interna são vastos, uma vez que este gás apresenta fatores como alta octanagem e temperatura de ignição aumentando o desempenho do motor aliado ainda a sua sustentabilidade gerada por se tratar de um biocombustível (Gupta; Kurien; Mittal, 2023), entretanto é fato a necessidade do aumento de estudos e domínio técnico para esta utilização em motores de combustão interna, tanto na melhoria do combustível como na resposta dos motores ao seu uso (Vasan et al., 2024).

No contexto de utilização de biocombustíveis visando eficiência e geração de energia de forma sustentável, o biodiesel e o biogás emergem como escolhas promissoras individualmente, mas que despertam grande interesse de pesquisa ao poderem ser empregadas em modo dual para um motor a combustão interna de ciclo diesel com âmbito de melhorar os resultados de desempenho e emissões (Oishi et al., 2019).

A utilização de Biogás e Biodiesel com operação em modo Dual tem o potencial de substituição de combustíveis fósseis oferecendo de forma sustentável uma alternativa com redução do consumo de combustível líquido (Imamoto; Kawahara; Tomita, 2022) e a possibilidade de utilização de um ou dois biocombustíveis com estabilidade de combustão (Oishi et al., 2019), porém o aumento da proporção de biogás na câmara de combustão reduz a eficiência volumétrica, ao mesmo tempo que o baixo valor calorífico do biogás gera um leve aumento das emissões de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) quando em comparação com motores naturalmente aspirados (Nguyen et al., 2024).

O enriquecimento de hidrogênio ao biogás utilizado como combustível primário em um moto-gerador diesel operado em modo dual, que emprega uma mistura de diesel e biodiesel como combustível líquido primário apresenta o potencial de melhorar o desempenho energético e reduzir as emissões de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO). Entretanto, esse processo resulta em um aumento da temperatura da câmara de combustão refletindo em um aumento das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) (Vasan et al., 2024), o que demanda estratégias para equilibrar os benefícios e os desafios associados.

Diante desse cenário, propõe-se investigar a hipótese de que, utilizando a metodologia de superfície de resposta aplicada a operação em modo dual de um motor-gerador, seja possível avaliar as consequências da concentração de biodiesel no combustível líquido, em contraste com os efeitos gerados pelo combustível gasoso composto de biogás enriquecido com hidrogênio, visando identificar suas contribuições para a eficiência energética do sistema e emissões dos gases poluentes gerados no processo de combustão.

1.1. Objetivo Geral

Analisar as superfícies de resposta do desempenho energético e das emissões de um moto gerador diesel operado em modo dual, empregando biogás enriquecido com hidrogênio como combustível gasoso e misturas de diferentes concentrações de diesel e biodiesel como combustível líquido.

1.2. Objetivos Específicos

- Conversão do motor gerador diesel para operar no modo dual;
- Obter os parâmetros de desempenho do motor gerador diesel/biodiesel operando no modo dual com biogás enriquecido com hidrogênio;
- Avaliar as emissões gasosas do motor gerador operando no modo dual com biogás enriquecido com hidrogênio;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Combustíveis renováveis

A matriz energética global é marcada pela utilização de combustíveis fósseis e não renováveis que trazem como consequência uma enorme sobrecarga ambiental, circunstância agravada pela geração de resíduos que tende a uma escala cada vez maior (Hasan et al., 2023). Neste cenário, a produção de combustíveis renováveis apresenta-se como alternativa não só para redução de emissões, mas também para destinação sustentável de tais resíduos visando o menor impacto ambiental possível, além de auxiliar na diversificação e segurança energética (Dhanya et al., 2020) (Callegari et al., 2020).

Dentre as fontes energéticas renováveis, a biomassa destaca-se por sua abundância e pelo menor impacto ambiental, podendo ser obtida a partir de diversas culturas e resíduos, oferecendo ainda grande versatilidade tecnológica para sua conversão em combustíveis, por meio de processos biológicos, termoquímicos, físicos, bioquímicos e híbridos (Hasan et al., 2023) (Tshikovhi; Motaung, 2023).

As tecnologias empregadas na conversão de biomassa em combustíveis renováveis possuem características específicas, bem como graus de eficiência variados baseados em seu produto e matéria prima. Destacam-se combustíveis como o biogás e o biodiesel obtidos por processos de conversão biológicos (digestão anaeróbia) e bioquímicos (transesterificação) apresentando alta viabilidade econômica e ambiental (Tshikovhi; Motaung, 2023).

Destaca-se também o hidrogênio como combustível de grande potencial produtivo e calorífico, podendo ser convertido por meio de processos biológicos ainda com eficiência limitada e em desenvolvimento, e termoquímicos, de maior eficiência e consolidação (Rey et al., 2024).

2.2. Biodiesel

A crescente necessidade de substituir combustíveis fósseis, especialmente em motores de combustão interna no setor de transportes, com foco na substituição do diesel tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de biocombustíveis (Ormond et al., 2024), entre os quais o biodiesel se destaca como principal opção, por suas características renováveis, biodegradáveis, de baixa emissão e não tóxico (Srikumar et al., 2024).

Segundo a ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2023) trata-se de biodiesel todo combustível proveniente de matérias graxas de origem animal ou vegetal, que por um processo de transesterificação ou esterificação assumem a composição de alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa. Bombo et al. (2021) corroboram com esta definição ao afirmar como biodiesel o combustível oriundo de matérias primas orgânicas como óleos de culturas vegetais comestíveis e não comestíveis, algas, resíduos orgânicos e gordura animal.

A produção mundial de biodiesel tem crescido e se diversificado, contribuindo significativamente para a redução das emissões provenientes de combustíveis fósseis, tornando-se uma parcela renovável relevante na mistura de combustíveis utilizados (Wan Osman et al., 2024).

No contexto nacional, o Brasil, impulsionado por políticas de incentivo aos biocombustíveis, vem aumentando a proporção de biodiesel misturado ao diesel, alcançando atualmente uma participação de 12% em sua composição (Tiburcio; Macêdo; Neto, 2023) contribuindo para a produção de aproximadamente 7,53 milhões de metros cúbicos de biodiesel no ando de 2023 segundo dados da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2024).

2.2.1. Produção de biodiesel

O biodiesel pode ser obtido por meio de diferentes processos e matérias primas, sendo estas, para um enfoque econômico, parte representante cerca de 75% dos custos de produção do biocombustível (Ruatpuia et al., 2024), portanto essenciais a sua viabilidade bem como a sua disponibilidade, seja esta obtida por rejeitos, processos ou agricultura (Bombo et al., 2021) (De Souza et al., 2022).

O avanço da diversidade de matérias primas constituintes do biodiesel (suas gerações) se deu devido a fatores limitantes de disponibilidade, rendimento energético e economia (Singh et al., 2019), além do impacto causado pela produção de combustível em outros setores como o alimentício gerando uma concorrência não só de matérias primas, mas também de áreas produzidas com potencial de elevar os

preços dos alimentos (Camilo et al., 2024), consequentemente podendo impactar na segurança alimentar da população (Ruatpuia et al., 2024).

Com os avanços de pesquisas em diferentes culturas e processos para a diversificação das fontes de biodiesel, alcançou-se meios alternativos viáveis para sua produção, subdivididos, como expresso na Figura 1, por sua origem em quatro grupos ou gerações:

Primeira geração, óleos comestíveis provenientes principalmente da agricultura (Camilo et al., 2024). Segunda geração, marcada por óleos não comestíveis de resíduos, biomassa ou de culturas não voltadas ao consumo humano (Pardo Cuervo; Rosas; Romanelli, 2024). Terceira geração tendo como base óleos advindos de algas e quarta geração ainda em estágio inicial de pesquisa com matéria prima biológica sintetizada artificialmente. (Bombo et al., 2021).



Figura 1 : Diferentes gerações e matérias primas para produção de biodiesel

Adaptado de (Camilo et al., 2024)

Cada uma das gerações de biodiesel apresenta vantagens e desvantagens (Singh et al., 2023), devendo levar em consideração a realidade de cada situação ou país, principalmente em relação a mercado, capacidade de produção ou importação, além de incentivos e políticas que servem como catalizadores para implementação de novas fontes na matriz energética (De Souza et al., 2022). Para tanto a Tabela 1

apresenta vantagens e desvantagens das categorias de óleos para produção de biodiesel ressaltando custos e aspectos voltados a segurança alimentar pela competição com culturas alimentícias.

T I I 4	11 1	1 1		1 17 1		~
Labela 1	Vantadens e	desvantagens	de catedorias	de materias	primas e	deracoes
	vantagono o	acovantagono	ao oatogoniao	do matoriao	printide e	goraçooo

de biodiesel

Geração	Matéria prima	Vantagens	Desvantagens
1ª Geração	Óleo Vegetal Comestível	Biodegradável, baixo teor de enxofre, alto teor de óleo, baixo custo;	Alta viscosidade, concorrência alimentar, desmatamento;
2ª Geração	Óleo vegetal não comestível	Concorrência alimentar mínima;	Não é comumente produzido, não está prontamente disponível;
	Gorduras animais	Baixo custo, redução de resíduos, concorrência alimentar mínima;	Solidificação em temperatura ambiente;
	Óleo residual de frituras	Redução de poluição, redução de resíduos, concorrência alimentar mínima;	A disponibilidade varia de acordo com a região, necessita de infraestrutura de coleta desenvolvida;
3ª Geração	Microalgas	Crescimento rápido, alto teor de óleo, concorrência alimentar mínima, adaptação ambiental ampla.	Alta necessidade de energia, necessidade de tecnologia avançada, alto custo de produção.

Adaptado de (Wan Osman et al., 2024)

Além da matéria prima os processos de síntese e purificação do biodiesel são fundamentais para a produção eficiente do combustível (Wan Osman et al., 2024), sendo a síntese por transesterificação da matéria prima mais comumente adotado devido a sua baixa complexidade e custo reduzido, além da capacidade de gerar biocombustíveis com maior eficiência de combustão e menores índices de emissões (Camilo et al., 2024).

A transesterificação consiste na reação entre triglicerídeos, provenientes do óleo utilizado como matéria prima, com álcoois, usualmente metanol ou etanol (Devale; Mahajan, 2024). Esta reação (Figura 2) ocorre em três etapas, convertendo inicialmente triglicerídeos em diglicerídeos, seguidos pela formação de monoglicerídeos e, finalmente, glicerol, produzindo em cada etapa um éster alquílico denominado biodiesel (Athar; Zaidi, 2020).



Figura 2: Reação de transesterificação para produção de biodiesel

Adaptado de (Athar; Zaidi, 2020)

O processo de produção de biodiesel por transesterificação normalmente conta com um catalisador de caráter básico devido a sua eficiência, porém, podem também ser utilizados ácidos ou mesmo enzimas (Mohiddin et al., 2021). Ainda no aspecto operacional, por se tratar de uma reação reversível utiliza-se uma quantidade excedente de álcool garantindo a totalidade da conversão de biodiesel (Farouk et al., 2024), destes álcoois o mais utilizado é o metanol por seu baixo custo e por induzir no biodiesel pontos de névoa e fluidez mais altos além viscosidades mais baixas, características estas desejáveis na utilização do biodiesel (Athar; Zaidi, 2020).

Após a síntese o processo de purificação se faz fundamental para a produção de biodiesel determinando sua qualidade final, podendo ser com características úmidas por lavagem à água mais simples e com menor investimento ou lavagens a seco como separação por membrana, adsorção e destilação mais complexos e de maior custo (Wan Osman et al., 2024).

2.2.2. Utilização de biodiesel

O biodiesel desempenha um papel crucial na descarbonização dos setores de transporte terrestre e marítimo, atuando como substituto do diesel (Ormond et al., 2024). Em misturas de até 30% com diesel, suas propriedades permanecem muito

próximas às do diesel puro, possibilitando seu uso sem grandes modificações nos motores (Hasan; Rahman, 2017).

No Brasil, a adição de biodiesel ao diesel começou em 2004 de forma experimental, e em 2008 tornou-se obrigatória com uma proporção inicial de 2%, conforme a Lei nº 11.097/2005. Desde então, a concentração foi gradualmente aumentada, alcançando 13% atualmente (2024), com previsão de aumento para 14% em 2025 e de chegar a 15% em abril de 2026 (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024).

Em uma comparação direta, levando em conta emissões, características energéticas e de combustão, têm-se para a blenda de biodiesel, uma redução significativa de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO), porém com um ligeiro aumento consumo de combustível e de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) (Arya; Kumar Rout; Samanta, 2022).

O uso combinado do biodiesel a outros combustíveis ou aditivado por compostos que auxiliem na combustão podem aumentar a estabilidade de oxidação e reduzir as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) apontando um campo a ser pesquisado e explorado como forma de otimizar sua utilização (Palani et al., 2022).

2.3. Biogás

Biogás é a denominação dada ao composto combustível gasoso gerado pela decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos, cuja composição, que apesar de variável sob condições físicas e químicas, é baseada fundamentalmente em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) além de outros gases em menor quantidade (Garcilasso; Ferraz Junior, 2018).

Em um panorama mundial o biogás vem se difundindo como uma alternativa energética confiável sustentada principalmente pela disponibilidade de recursos e posteriormente por incentivos governamentais que visam a redução das emissões de gases de efeito estufa, o que fez com que a exploração do biogás crescesse a uma taxa de 100% nos últimos dez anos, concentrando sua produção em países de maior desenvolvimento como China, Estados Unidos e países da europeus (Gupta; Kurien; Mittal, 2023).

Na América Latina a produção de biogás é liderada pelo México (Vega et al., 2024), seguido pelo Brasil que gera aproximadamente 1,83 GNm³ anualmente, mas

que apresenta o maior potencial produtivo de biogás do mundo o equivalente a 42,7 BNm³/ano (Costa et al., 2024), implicando, portanto, em um potencial inexplorado de cerca de 96% de sua capacidade de produção.

2.3.1. Produção de biogás

A produção de biogás, ilustrada na Figura 3, ocorre por meio de um processo de biodigestão anaeróbia (sem a presença de oxigênio). Nesse processo, compostos orgânicos complexos, como carboidratos, lipídios e proteínas, são inicialmente submetidos à hidrólise, gerando compostos mais simples (monômeros). Estes monômeros são degradados em outra etapa realizada por bactérias fermentativas denominada acidogênese. Os produtos dessa ação bacteriana permitem a ocorrência da acetogênese, que envolve a oxidação desses compostos para formar ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, componentes essenciais para a etapa final de metanogênese, realizada por bactérias metanogênicas, que culmina na geração de biogás rico em metano (Garcilasso; Ferraz Junior, 2018) (Wadi; Khalifa, 2024).





Adaptado de (Zheng; Li, 2024)

Para que o processo de geração do biogás aconteça de forma com que este possa ser explorado, lança-se mão de tecnologias denominadas biodigestores que consistem basicamente em um reator anaeróbico fechado, que podem ser caracterizados principalmente por seu regime, forma e composição de alimentação (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

O regime de alimentação dos biodigestores pode ser caracterizado como contínuo, semi contínuo e por batelada, sendo os biodigestores contínuos os mais utilizados na agroindústria com um enfoque voltado ao tratamento diário de resíduos, fornecendo um fluxo constante de biogás (De La Fuente Garcia Pena et al., 2022).

Destaca-se dentre sistemas de biodigestores os modelos Indiano, Chinês, Lagoa Coberta e UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) sendo o modelo Lagoa Coberta o mais utilizado para o tratamento de resíduos em áreas rurais, pois trata-se de um biodigestor de construção simples e capaz de tratar resíduos com altas cargas orgânicas (Garcilasso; Ferraz Junior, 2018).

Os biodigestores do tipo lagoa coberta (Figura 4) possuem características construtivas e operacionais simplificadas, consistindo em uma lagoa ou mais lagoas impermeabilizadas de formato tronco piramidal invertida, recoberta por um material sintético flexível e de baixa permeabilidade com âmbito de acumular os gases provenientes da digestão anaeróbia (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Sua operação é baseada na entrada de substrato que é armazenado na lagoa onde se dão as reações biológicas anaeróbias em condições de temperatura naturais, isto é, com aquecimento solar natural, após as reações o biogás é contido no reservatório e por processo contínuo há a saída do material biodigerido (digestato) (De Paula Sousa et al., 2022) (Maradini et al., 2023).



Figura 4: Biodigestor tipo Lagoa Coberta

Adaptado de (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019)

O biogás gerado nos biodigestores possui, em suas composições, concentrações de gases variáveis afetadas principalmente pela origem do substrato submetido as reações anaeróbias, temperatura, ausência de oxigênio e Ph do meio (Garcilasso; Ferraz Junior, 2018), influenciando diretamente na produção de Metano, gás combustível de principal interesse neste processo.

Calbry-Muzyka et al. (2022) elencam os principais gases que compõem o biogás: Metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂), Nitrogênio (N₂) e Oxigênio (O₂) além de Monóxido de Carbono (CO) e Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) encontrado em quantidades menores, e expõem (Tabela 2) suas variações de concentração de acordo com fontes de material orgânico: Resíduos Agrícolas, Urbanos e de Aterro Sanitário:

Tabela 2: Intervalos de concentração de gases para diferentes fontes de material

Gases	Resíduos Agrícolas	Resíduos Urbanos	Aterro Sanitário
CH_4	49 a 69%	44 a 67%	40 a 70%
CO ₂	29 a 44%	30 a 44%	25 a 40%
N_2	0,6 a 13%	0,1 a 6%	0 a 17%
O ₂	0,2 a 3%	0,1 a 3%	0 a 3%

orgânico

Adaptado de (Calbry-Muzyka et al., 2022)

Alayande et al. (2024) destacam o interesse no metano (CH₄) presente no biogás como combustível, devido ao seu elevado poder calorífico e alta temperatura de autoignição, os demais gases são classificados como impurezas, pois, além de não serem inflamáveis, alguns, como o sulfeto de hidrogênio (H₂S), apresentam características corrosivas devendo ser obrigatoriamente removidos a depender da utilização do biogás.

2.3.2. Utilização de biogás

O biogás por ser uma fonte de energia com base principalmente em resíduos se difunde intensamente em propriedades agrícolas que veem no processo de digestão anaeróbia uma forma de mitigar os impactos ambientais gerados por sua atividade bem como uma fonte de adubo orgânico (Mignogna et al., 2023).

A sua utilização foi inicialmente marcada por uma pequena escala voltada a iluminação e ao fornecimento de energia para o preparo de alimentos, posteriormente devido ao seu custo de produção e infraestrutura mínima houve a difusão do biogás principalmente na geração de energia estacionária, onde devido aos seus benefícios ambientais e potencial produtivo vem avançando a ponto de se estabelecer como tecnologia contribuinte para a segurança energética (Gupta; Kurien; Mittal, 2023).

Oliveira et al., (2023) ressaltam o aumento para o mercado de biogás seja ele na queima direta para utilização como energia térmica, em motores a combustão interna para produção de energia elétrica ou transporte e até mesmo como matéria prima para as biorrefinarias visando a produção de hidrocarbonetos renováveis e hidrogênio molecular utilizado em células de combustível.

Nguyen et al. (2021) corroboram a ideia de utilização do biogás em processos mais elaborados evidenciando a necessidade de tratamento deste gás de modo a eliminar suas impurezas, sendo crucial a etapa de remoção de sulfeto de hidrogênio (H₂S), impureza gasosa que tem alta capacidade de corrosão e consequente redução da vida útil dos equipamentos utilizados no processo de geração de energia (Oliveira et al., 2023).

Com intuito de se elevar o poder calorífico do biogás surgem ainda tecnologias de "*upgrading*", como: separação por membrana, criogenia e processos de PSA (adsorção por oscilação de pressão) (Nguyen et al., 2024) com intuito de remoção de dióxido de carbono (CO₂) podendo proporcionar um gás com concentração de metano

(CH₄) superior a 95% denominado biometano utilizado como combustível veicular, produção de bio-hidrogênio e injeção na rede de gás (Mignogna et al., 2023).

Para tanto o biogás pode ser utilizado em sua forma bruta, com pré-tratamento ou convertido em biometano para diversas aplicações energéticas, Atelge et al. (2021) destacam sua utilização em motores de combustão interna com ótimo aproveitamento para a geração de energia, inserindo ainda a possibilidade da operação destes motores tanto com combustível único quanto em modo dual, combinando o biogás com outros combustíveis.

Com enfoque na utilização do biogás em motores de combustão interna, depara-se com a dificuldade imposta pela variabilidade de composições do biogás principalmente referente a concentração de dióxido de carbono (CO₂) que denota um menor poder calorífico do gás e possível instabilidade de combustão, podendo ser otimizada com a adição de hidrogênio (H₂) ou pela operação em modo dual (biogás/diesel) (Qian et al., 2017). Oportunidade que revela um grande potencial para pesquisas com foco na otimização do processo de geração de energia por biogás aliado a outros combustíveis.

2.4. Hidrogênio

O hidrogênio (H₂) tem se destacado como uma alternativa de combustível renovável com alto poder calorífico e grande potencial para alcançar a neutralidade de carbono, podendo até resultar em emissões negativas em alguns casos (Ishaq; Dincer; Crawford, 2022). Sua conversão oferece uma solução promissora também no armazenamento de energias renováveis, no entanto, deve-se atentar ao fato de que o sistema que possibilita a utilização de energia por hidrogênio se baseia em quatro estágios: produção, armazenamento, segurança e utilização, desta forma para que se alcance a sustentabilidade de toda a cadeia as fontes energéticas de cada uma destas parcelas precisam advir também de fontes de baixa ou nenhuma emissão (Dawood; Anda; Shafiullah, 2020).

A demanda por hidrogênio em escala mundial tem aumentado consideravelmente passando de 70 milhões de toneladas em 2019 para uma estimativa de 120 milhões de toneladas em 2024 (Osman et al., 2022) apesar da produção ainda depender de processos baseados em utilização de combustíveis

fosseis (Rey et al., 2024) os métodos produtivos vêm tendendo a descarbonização para que se alcance todo o potencial sustentável do hidrogênio.

2.4.1. Produção de hidrogênio

A produção de hidrogênio a exemplo dos demais biocombustíveis depende principalmente do tipo de processo empregado e da matéria prima utilizada (Dawood; Anda; Shafiullah, 2020), porém a alta demanda por energia empregada no processo afeta diretamente sua sustentabilidade, sendo as características de sua fonte, fator preponderante no balanço de emissões do combustível (Zhang et al., 2024).

Partindo da perspectiva da energia utilizada no processo de produção de hidrogênio, este pode ser classificado em três categorias principais representado por cores: Verde, na qual a fonte de energia do processo é de origem renovável, Roxa, obtida por meio de energia nuclear e Azul tendo como base o gás natural com o processo de captura e armazenamento de carbono (Ishaq; Dincer; Crawford, 2022).

Além da categorização do hidrogênio por sua origem existe uma diversificada gama de tecnologias de geração, abrangendo fenômenos físicos, químicos e biológicos sendo estes: métodos termoquímicos, eletroquímicos, biológicos e fotocatalíticos, Figura 5, com destaque para os métodos termoquímicos, por serem os mais estabelecidos, porém com maiores taxas de emissão, e os eletroquímicos com menores emissões, mas com necessidade de melhorias em sua relação custo-benefício (Zhang et al., 2024).



Figura 5: Métodos de produção de hidrogênio

Adaptado de (Ishaq; Dincer; Crawford, 2022) (Dawood; Anda; Shafiullah, 2020)

A seleção da matéria prima renovável, limpa e abundante, bem como o a fonte energética do processo de produção do hidrogênio assim como o próprio processo renovável e livre de emissões é fundamental para sua sustentabilidade proporcionando um gás com alto poder calorífico de grande versatilidade energética (Li et al., 2024).

2.4.2. Utilização de hidrogênio

A versatilidade de processos e fontes de produção do hidrogênio também se aplica em sua utilização, resultando em uma diversificada gama de processos que têm como base a energia acumulada no hidrogênio ou mesmo sua utilização como matéria prima e até como meio de reserva de energia (Zhang et al., 2024) (Ratnakar et al., 2021).

A utilização do hidrogênio é marcada principalmente pela não emissão de quaisquer gases de efeito estufa (Dawood; Anda; Shafiullah, 2020), contribuindo para um balanço energético limpo e sustentável por meio de tecnologias de utilização como combustível limpo, meio de armazenamento energético, e na produção de energia elétrica por células de combustível (Muhammed et al., 2023).

As células de combustível são uma aclamada forma de utilização do hidrogênio pela sua altíssima eficiência na conversão de energia química em energia elétrica podendo atingir cerca de 60% em sua operação (Fan; Tu; Chan, 2021), também por suas taxas de emissões nulas onde o único produto gerado em sua operação de conversão de energia é a água (H₂O) (Amin et al., 2022), bem como a diversidade de processos que pode ser empregada. Porém estas células carecem de avanços principalmente relacionados a sua viabilidade financeira para serem incorporadas em larga escala (Yang et al., 2022).

Como combustível o hidrogênio pode ser tido como uma fonte energética de menor emissão de gases e alto poder calorífico, porém por sua eficiência, apesar de alta quando comparada a outros combustíveis e métodos de combustão interna, é menor que a eficiência das células de combustível, como pode ser visualizado na Tabela 3. Para tanto a combustão do hidrogênio é tida como tecnologia de transição para processos elétricos baseados em células de combustível (Zhang et al., 2024).

Tecnologia	Eficiência	Redução de Emissões	Vantagens	Desvantagens
Motores de ignição por centelha	moderada	Moderada	Conversão simples de motores a gasolina, resposta rápida	Menor eficiência, emissões de NO _x
Motores de ignição por compressão	Maior do que motores de ignição por centelha	Moderada para baixa	Maior eficiência, economia de combustível, menos emissões do que os motores de ignição por centelha	Menos comum, emissões de NO _x , projeto mais complexo
Turbinas a gás	Moderado a alto	Moderada para baixa	Escalável, alta potência, flexibilidade de combustível, integração de ciclo combinado	Sistemas complexos, emissões de NO _x , alto custo inicial
Célula de combustível	Altíssimo	Não há emissões	Alta eficiência, emissões nulas e grande versatilidade de utilização	Alto custo, alta sensibilidade a impurezas

Tabela 3: Comparação entre tecnologias a combustão de hidrogênio e célula de combustível

Adaptado de (Zhang et al., 2024)

Dentro do contexto de transição para matrizes energéticas de baixo carbono, o hidrogênio pode ser utilizado ainda como aditivo para o enriquecimento de biocombustíveis ou combustíveis de baixa emissão, por apresentar características desejáveis com baixo impacto nas tecnologias existentes (Sinigaglia et al., 2017).

Sua compatibilidade é um ponto-chave, pois pode ser facilmente integrado a outros combustíveis sem exigir grandes avanços tecnológicos. Além disso, oferece flexibilidade no processo permitindo o ajuste gradual em sua concentração de modo a otimizar sua injeção, também auxilia na descarbonização, aumentando o poder calorífico de combustíveis como biogás e gás natural, melhorando a eficiência térmica e, reduzindo a emissão de hidrocarbonetos (HC) e dióxido de carbono (CO₂) (Muhammed et al., 2023).

No entanto, devido ao seu alto poder calorífico, o hidrogênio pode elevar a temperatura da câmara de combustão, resultando em um aumento das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), como mostrado na Tabela 3, por essa razão, seu uso deve

ser feito a luz de estudos de otimização levando em consideração os demais combustíveis utilizados (Hosseini et al., 2023).

2.5. Motores de ignição por compressão

Os motores de ignição por compressão, propostos por Rudolf Diesel em 1890 e por isso chamados de motores de ciclo Diesel, são máquinas térmicas caracterizadas por um processo específico de compressão. Nesse ciclo, apenas o ar é comprimido na câmara de combustão, elevando sua temperatura a níveis superiores à temperatura de autoignição do combustível, em seguida o combustível é injetado a alta pressão, onde ao entrar em contato com o ar quente, se inflama automaticamente, iniciando o processo de combustão (Çengel; Boles, 2013).

O funcionamento do motor diesel conforme explicitado na Figura 6 pode ser dividido em quatro etapas distintas: Admissão, Compressão, Expansão e Exaustão. A Admissão consiste na entrada de ar na câmara de combustão pela abertura da válvula de admissão, posteriormente este ar é comprimido pelo pistão adquirindo alta pressão e temperatura na etapa denominada Compressão.

A Expansão é realizada então, pelo processo de combustão entre o ar e o combustível injetado, caracterizado por sua autoignição, posteriormente os produtos da combustão são expulsos pelo movimento do pistão e abertura da válvula de escape na etapa denominada Exaustão (Djamari et al., 2022).

Figura 6: Quatro tempos de funcionamento do motor de ignição por compressão



Adaptado de (Djamari et al., 2022)

O mecanismo de injeção, característica fundamental do ciclo diesel, consiste em um bico injetor, que por pequenos orifícios insere combustível por um ou mais jatos a alta pressão e velocidade na câmara de combustão quando o êmbolo está próximo do ponto morto superior (final de seu curso), fazendo com que o combustível introduzido seja vaporizado e misturado ao ar dentro da câmara, iniciando alguns instantes depois a combustão (Brunetti, 2017).

Os motores diesel por efetuarem apenas a compressão do comburente não possuem risco de autoignição até que o combustível seja injetado, o que lhes permite operar em taxas de compressão muito mais alta geralmente entre 12 e 24 (Çengel; Boles, 2013) conferindo-lhes maior eficiência frente aos motores de ignição por centelha que operam a taxas de compressão menores limitadas ao ponto de autoignição da mistura ar combustível utilizada (Borgnakke; Sonntag, 2009).

Devido a sua eficiência elevada, estabilidade e flexibilidade operacional o motor diesel conquistou espaço nos mais diferentes setores, de transportes a geração de energia dominando principalmente as atividades de alto torque e potência (Mirhashemi; Sadrnia, 2020), porém as emissões de gases advindas destes motores têm se tornado um desafio enfrentado por seus correspondentes setores, principalmente se tratando de dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (Olabi; Maizak; Wilberforce, 2020).

2.6. Motor Dual

Conforme elucidado na seção 2.2 o biodiesel surge como uma das principais opções renováveis para a substituição do diesel podendo ser utilizado em motores de ignição por compressão, porém por apresentar maior teor de oxigênio, maior viscosidade e densidade o biodiesel tende a um aumento das emissões de óxido de nitrogênio (NO_x) (Palani et al., 2022) (Arya; Kumar Rout; Samanta, 2022).

A seção 2.3 destaca o uso do biogás especialmente como aditivo do biodiesel em sistemas de combustível duplo, ajudando a reduzir as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) (Mirhashemi; Sadrnia, 2020). Porém para um maior rendimento operacional, devido ao seu baixo poder calorífico e à variabilidade em sua composição, o biogás requer purificação ou enriquecimento com hidrogênio (H₂) (Qian et al., 2017) descrito na seção 2.4. Esse enriquecimento aumenta o poder calorífico e a estabilidade da combustão (Atelge et al., 2021), mas pode também elevar as emissões de NOx quando o hidrogênio (H₂) é usado em conjunto com o biodiesel (Mirhashemi; Sadrnia, 2020), exigindo um estudo de motores em modo de operação dual e otimização cuidadosa do processo.

Motores que operam com dois tipos de combustível são chamados de motores duais ou bicombustíveis, e podem funcionar tanto no ciclo Otto, onde os dois combustíveis misturados ao ar tem sua ignição por faísca na câmara de combustão, ou por ciclo Diesel, com ignição por compressão (NGUYEN et al., 2024).

Nos motores de ignição por compressão com operação em modo dual, o combustível gasoso é pré-misturado com o ar, geralmente por um sistema Venturi. Este sistema consiste na redução do duto por onde flui o ar formando uma região de menor pressão e maior velocidade na região afunilada do dispositivo Venturi, onde o diferencial de pressão tende a realizar a sucção do combustível e misturá-lo ao ar, a mistura por sua vez segue para a câmara de combustão (Hosseini et al., 2023), como mostra o desenho representativo na Figura 7.



Figura 7: Mistura entre ar biogás e hidrogênio por sistema Venturi

Adaptado de (Hosseini et al., 2023)

O ar após ser misturado ao combustível gasoso, adentra na câmara de combustão durante a etapa de admissão, então é comprimido de forma a elevar sua pressão e temperatura, quando um segundo combustível, como diesel ou biodiesel, é injetado, inflamando-se ao entrar em contato com a mistura gasosa comprimida iniciando a combustão, caracterizando desta forma a etapa de expansão. Finalmente, os gases resultantes da combustão são expelidos na fase de exaustão, completando o ciclo de operação em modo dual de quatro etapas ou tempos como representado na Figura 8 (Sahoo; Sahoo; Saha, 2009).

Figura 8: Quatro tempos de funcionamento do motor de ignição por compressão operando em modo dual com biodiesel e biogás enriquecido com hidrogênio



Adaptado de (Djamari et al., 2022)

Deve-se notar a necessidade da escolha de combustível gasoso com alta temperatura de ignição para que durante a compressão não ocorra sua combustão espontânea causando o fenômeno conhecido com batida de motor, que consiste na explosão precoce da mistura gerando uma força contrária ao movimento do pistão (Sahoo; Sahoo; Saha, 2009) (Nguyen et al., 2024).

Quando utilizado na operação dual de motores à ignição por compressão, o biogás tende a reduzir a emissão de óxido de nitrogênio (NO_x) e particulados, porém tende a reduzir sua eficiência provocado pelo seu baixo valor calorífico além de gerar o aumento de níveis de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) na composição de suas emissões (Deheri et al., 2020).
Uma alternativa para se melhorar o desempenho do motor em modo dual com biogás como combustível é o seu enriquecimento com hidrogênio, ação que não requer grandes modificações no motor e que tende a aumentar o valor calorífico da mistura culminando em uma melhora de desempenho, porém com aumento das emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) uma vez que a temperatura da câmara de combustão se eleva com sua utilização (Hosseini et al., 2023).

A utilização de hidrogênio e biogás em modo dual nos motores a ignição por compressão tem grande potencial de otimização, uma vez que os combustíveis gasosos possuem características contrárias como exposto na Tabela 4 e tendem a um balanço quando utilizados de forma balanceada (Hosseini et al., 2023).

Combustível	Poder calorífico	Hidrocarbonetos (HC)	Monóxido de carbono (CO)	Óxidos de nitrogênio (NO _x)
Biodiesel	Tendência a redução (Mirhashemi; Sadrnia, 2020)	Tendência a redução (Singh et al., 2021)	Tendência a redução (Singh et al., 2021)	Tendência a aumento (Ruatpuia et al., 2024)
Biogás	Tendência a redução (Deheri et al., 2020)	Tendência a aumento (Nguyen et al., 2024)	Tendência a aumento (Nguyen et al., 2024)	Tendência a redução (Nguyen et al., 2024)
Hidrogênio	Tendência a aumento (Deheri et al., 2020)	Tendência a redução (Nguyen et al., 2024)	Tendência a redução (Nguyen et al., 2024)	Tendência a aumento (Nguyen et al., 2024)

Tabela 4: Tendências de poder calorífico e emissões de biodiesel, biogás e

hidrogênio	opuerin	utilizados	еm	modo dua	al
niurogenio	quanuo	utilizauus	CIII	mouo uue	11

Portanto, o estudo e a otimização das concentrações de combustíveis considerando misturas de combustível gasoso e combustível líquido, em motores operando em modo dual são preponderantes para reduzir emissões e maximizar o rendimento (Deheri et al., 2020) (Kasih Telaumbanua et al., 2023) garantindo a viabilidade econômica desse sistema (Nguyen et al., 2024) com foco na redução de emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (Ahmad; Yadav; Singh, 2024). Desta forma a operação em modo dual oferece uma opção energética promissora para motores a combustão interna utilizados em grupos geradores, promovendo uma energia mais limpa e sustentável (Mohite et al., 2024).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Classificação da Pesquisa

A presente pesquisa segundo Gil (2023), pertence a área das engenharias e classifica-se por sua finalidade como pesquisa aplicada, uma vez que envolve uma situação específica de dados provenientes do comportamento de um motor gerador alimentado em modo dual por combustíveis previamente determinados. Seus propósitos gerais caracterizam-se como explicativos visando determinar a influência das concentrações dos combustíveis na eficiência e emissões do moto gerador de forma experimental em cunho quantitativo.

3.2. Material

3.2.1. Biodiesel

Para o combustível piloto do experimento se utilizará blendas compostas de diesel S10 puro obtido comercialmente pela Estrada Distribuidora de Derivados de Petróleo LTDA, empresa está situada na BR 277, km 579, na cidade de Cascavel/PR além de biodiesel produzido a partir de Óleo de Soja submetido a transesterificação por Metanol e Hidróxido de Potássio (KOH) como catalisador, realizado no Laboratório Multiusuário de Tecnologias Sustentáveis (LABTES) pertencente a UNIOESTE Campus Cascavel/PR, latitude 24° 59' 21" Sul longitude 53° 26' 58" Oeste.

A produção do biodiesel se deu na proporção: 4,8 litros de Óleo de Soja comercial, 1,44 litros de álcool metílico e 96 gramas de Hidróxido de Potássio (KOH), onde o Óleo do Soja fora fracionado em 3 partes de 1,6 litros (devido a capacidade da vidraria disponível no laboratório), posteriormente aquecido a 65°C e misturados mecanicamente a uma solução de Metanol e Hidróxido de Potássio (KOH), o processo de agitação mecânica e aquecimento se manteve até que a mistura apresentasse características translúcidas, etapa em que as soluções foram transferidas a 3 funis de decantação para a separação dos ésteres e do glicerol conforme exposto na Figura 9.



Figura 9: Processo de produção de Biodiesel de soja por transesterificação

Após a separação do biodiesel iniciou-se o processo de lavagem do mesmo, com adição e mistura de 0,48 litros de água destilada em cada recipiente que posteriormente é decantada durante 24 horas, utilizou-se no processo 3 lavagens e posteriormente o biodiesel foi levado a estufa a 105°C para a secagem do combustível, obteve-se um volume de aproximadamente 2,3 litros de biodiesel, posteriormente misturados em diferentes blendas biodiesel/diesel conforme exposto na Tabela 5 e fracionados em frascos de 500ml devidamente rotulados (Figura 10) de modo a facilitar os ensaios de combustão.

Blenda	Concentração de Biodiesel	Concentração de Diesel
B10	10,0 %	90,0 %
B15	15,0 %	85,0 %
B22	22,5 %	77,5 %
B30	30,0 %	70,0 %
B35	35,0 %	65,0 %



Figura 10: Blendas de Biodiesel/Diesel

As diferentes blendas serão ensaiadas no Laboratório de Biocombustíveis da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em uma bomba calorimétrica DDA modelo E2K (Figura 11) de forma a determinar seu Poder Calorífico Superior (PCS).

Figura 11: Bomba calorimétrica DDA modelo E2K



Baseado no poder calorífico superior (PCS) das blendas ensaiadas pode-se determinar seu poder calorífico inferior (PCI) por meio da equação descrita por (SILVA VOLPATO et al., 2009):

$$PCI_{blenda} = PCS_{blenda} - 3052 \tag{1}$$

Na qual:

*PCS*_{blenda} : Poder Calorífico Superior da blenda ensaiada (kJ/kg);

PCI_{blenda} : Poder Calorífico Inferior da blenda ensaiada (kJ/kg);

Para tanto, os poderes caloríficos superior (PCS) e inferior (PCI) obtidos por meio de ensaios laboratoriais e equações respectivamente são expostos na Tabela 6:

Blenda	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)
B0	45407	42355
B10	44517	41465
B15	44450	41398
B22	43485	40433
B30	43093	40041
B35	42757	39705
B100	38862	35810

Tabela 6: Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) das blendas ensaiadas

Para determinar a energia fornecida pelo combustível líquido medido volumetricamente, é imprescindível conhecer a densidade de cada uma das blendas experimentadas, sendo adotado o método de picnometria, que se baseia na determinação precisa da massa de uma amostra líquida contida em um recipiente volumétrico calibrado, o picnômetro (Figura 12), medida com uma balança analítica de alta precisão (Figura 13).







Figura 13: Balança analítica Shimadzu modelo ATY224

Os resultados das densidades obtidas nos ensaios pelo método de picnometria são agrupados e expostos na Tabela 7.

Blenda	Densidade (g/ml)	
B0	0,8282	
B10	0,8315	
B15	0,8362	
B22	0,8390	
B30	0,8440	
B35	0,8485	
B100	0,8800	

Tabela 7: Densidade das blendas ensaiadas

3.2.2. Biogás

O biogás utilizado na pesquisa é proveniente de rejeitos de suinocultura, provido pela Granja Nettson localizada na cidade de Toledo/PR, latitude 24° 45' 34" Sul e longitude 53° 46' 07" Oeste, que conta com 1.650 suínos em fase de terminação gerando aproximadamente 8.000 kg/dia de dejetos que são destinados a um biodigestor do tipo lagoa coberta Figura 14. O biogás produzido na propriedade é destinado a geração de energia elétrica por meio de um moto-gerador a combustão interna de ciclo Otto, com capacidade nominal de geração de 35 kW.



Figura 14: Granja Nettson, biodigestor tipo lagoa coberta e captação de resíduos

O sistema de coleta do biogás é apresentado na Figura 15 e consiste na captação de biogás após seu resfriamento e secagem, pelo resfriador Bioköller, posteriormente comprimido e armazenado a 10Mpa (100 Bar) pelo compressor Tuxing modelo TXEDM041 em 5 cilindros GNV tipo 1.



Figura 15: Sistema de coleta e análise de composição de biogás

A coleta foi realizada na sala de máquinas do gerador a biogás da propriedade, em um ponto da tubulação de fornecimento de biogás pouco antes da admissão do moto-gerador. A operação ocorreu no dia 15/11/2024, no período da

tarde, entre 14:00 e 19:00 horas, em uma temperatura ambiente de aproximadamente 35°C, conforme mostrado na Figura 16.



Figura 16: Coleta e compressão de biogás na Granja Nettson

A composição do biogás foi analisada utilizando o Monitor de Extração de Gases LANDTEC®, modelo GEM5000, conforme ilustrado na Figura 17, que também apresenta os resultados da composição do biogás. As faixas de medição e a precisão do equipamento estão detalhadas na Tabela 8, enquanto os dados obtidos nas medições, juntamente com seus respectivos erros, estão descritos na Tabela 9.

Figura 17: Monitor de Extração de Gases LANDTEC GEM5000 e resultados obtidos da análise do biogás



Tabela 8: Especificações das faixas de medição e precisão do Monitor de Extração de Gases Landtec GEM5000

Gases Medidos	Faixa de Medição	Precisão
CH ₄	0 a 70%	± 0,5% (vol)
CH ₄	70 a 100%	± 1,5% (vol)
CO ₂	0 a 60%	± 0,5% (vol)
CO ₂	60 a 100%	± 1,5% (vol)
O ₂	0 a 25%	± 1,0% (vol)
CO	0 a 2000 ppm	± 2,0% FS
H ₂ S	0 a 50 ppm	± 1,5% FS
H_2S	0 a 5000 ppm	± 2,0% FS

Tabela 9: Composição e concentração do biogás coletado

Concentração
62,0% ± 0,5%
37,9% ± 0,5%
0,1% ± 1,0%
29 ppm ± 10 ppm
ppm ± 1 ppm

O poder calorífico inferior do biogás ($PCI_{biogás}$) (kJ/m³) pode ser obtido por sua concentração de metano, cujo poder calorífico é de 35,6 MJ/m³ (Perez-Sanz et al.,

2019), visto que os demais compostos químicos que compõem o biogás não são combustíveis:

$$PCI_{biog\acute{a}s} = \frac{C_{metano}}{100} PCI_{metano}$$
(2)

Na qual:

PCI_{biogás}: Poder Calorífico Inferior do Biogás (kJ/m³);
PCI_{metano}: Poder Calorífico Inferior do Metano (CH₄) (kJ/m³);
C_{metano}: Concentração de Metano (CH₄) no Biogás (%);

3.2.3. Hidrogênio

O Hidrogênio utilizado foi adquirido da empresa Oxiguaçu indústria e Comércio de Gases LTDA localizada em Cascavel/PR, trata-se de hidrogênio comprimido a 20 Mpa (200Bar) armazenado em cilindro metálico com capacidade volumétrica para 10 m³ de gás em composição comercial exposta na Tabela 10:

Tabela 10: Composição e concentração do hidrogênio comprimido fornecido pelaempresa Oxiguaçu do fabricante Messer FISPQ Número: 188

Gases	Concentração
H ₂	99,0%
N ₂	-
CH ₄	-

Adaptado de (Messer, 2019)

As principais propriedades físico-químicas do hidrogênio são listadas na Tabela 11 em consonância com a seção 2.4 e 2.6 do capítulo de revisão bibliográfica, que destacam a alta temperatura de Ignição do hidrogênio (560,0 °C) bem como seu poder calorífico (116,49 kJ/g) características fundamentais a sua utilização em motores duais a ignição por compressão.

Propriedade	Concentração
Limite superior de inflamabilidade no Ar	75 %
Limite inferior de inflamabilidade no Ar	4 %
Temperatura de Ignição	560,0 °C
Poder Calorífico Inferior (PCI _{hidrogênio})	116,49 kJ/g
Peso molecular (H ₂)	2,02 g/mol
Densidade relativa vapor	0,067
Adaptado de (Messer, 2019)	

Tabela 11: Propriedades físico-químicas do hidrogênio comprimido

O poder calorífico do hidrogênio comprimido em composição comercial (*PCI_{hid.com.}*) deve levar em consideração a composição dos gases que o compõem visto que não se trata puramente de hidrogênio (H₂), para tanto pode ser obtido pela soma dos poderes caloríficos ponderados por sua concentração conforme a Equação 3:

$$PCI_{hid.ind.} = \frac{C_{hid} \quad \text{ênio}}{100} \ PCI_{hidrog\hat{e}nio} \tag{3}$$

Na qual:

PCI_{hi .ind.}: Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio industrial (kJ/m³);
 PCI_{hidro ênio}: Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio (kJ/m³);
 C_{hidro ênio}: Concentração de Hidrogêno (H₂) no Hidrogênio industrial (%);

3.2.4. Conjunto motor gerador

O motor gerador utilizado como objeto de pesquisa, representado pela Figura 18, possui ciclo de ignição por compressão e utiliza diesel como combustível, sua potência máxima é de 10CV a 3600 RPM conforme elucidado na Tabela 12 de dados técnicos referentes ao motor.



Figura 18: Motor Gerador Branco BD 6500

Tabela 12: Dados técnicos do motor

Descrição	Especificação
Motor	Horizontal, Refrigerado a ar
Potência Máxima do Motor	10 CV – 3600 RPM
Potência Contínua do Motor	9 CV – 3600 RPM
Torque Máximo	2,7 kgf – 2000 RPM
Cilindros	Monocilíndrico
Cilindradas	406 cm ³
Combustível	Diesel
Consumo	2,15 l/h
Sistema de Partida	Manual

Adaptado de Branco (2024)

O gerador monofásico do conjunto possui potência máxima de 4,4 kW e potência nominal de 4,0kW com tensão de saída de 120/240V conforme dados agrupados na Tabela 13:

Características	Especificação
Potência Máxima do Gerador	4,4 kW
Potência Nominal do Gerador	4,0 kW
Fases	Monofásico
Fator de potência	1
Tensão de Saída	120/240V
Sistema de Partida	Manual
Adaptado de Branco (2024)	

Tabela 13: Dados técnicos do Gerador

Adaptado de Branco (2024)

Para permitir que o motor gerador diesel BD 6500 operasse em modo dual, utilizando biodiesel e biogás enriquecido com hidrogênio, foram realizadas modificações, principalmente no sistema de admissão de ar, tais alterações incluíram o uso de um carburador para a injeção do combustível gasoso.

3.2.5. Carburador

O carburador utilizado foi dimensionado de acordo com a potência do motor gerador bem como o volume de ar consumido, para tanto utilizou-se um carburador da marca Huayi modelo GX390/188F, apresentado na Figura 19, já adaptado para injeção de gás.



Figura 19: Carburador Huayi GX390/188F, flanges e filtro de ar

Como a adaptação envolve a injeção de combustível na entrada de ar do motor gerador, o carburador precisou ser superdimensionado para manter o fluxo de ar original do motor. Assim, foi utilizado um carburador com capacidade para alimentar motores de 13,2 CV, suas especificações estão detalhadas na Tabela 14.

Características técnicas	Especificação
Marca	Huayi
Modelo	GX390/188F
Potência de aplicação (motor)	13,2 CV
Potência de aplicação (gerador)	6,8 kW
Diâmetro de entrada	32 mm
Diâmetro de saída	27 mm

Tabela 14: Dados técnicos do Carburador

3.2.6. Cargas de acionamento

Para simular situações de operação no motor gerador com cargas variadas será utilizado um quadro de cargas resistivas (Figura 20) disponível no Laboratório de Gaseificação de Biomassa e Microgeração de Eletricidade, este quadro opera com tensão 240V monofásica em corrente alternada acionando 8 resistências (1 unidade de 250 W, 2 unidades de 500 W, 2 unidades de 1000 W e 3 unidades de 2000 W) de modo a serem combinadas por um quadro de comando e fornecer incrementos de 500W necessários a presente pesquisa.





3.2.7. Sistema de aquisição de dados

O sistema de coleta de dados é baseado em instrumentos analógicos, fornecendo dados para as entradas de fluxo e consumo de combustível líquido e gasoso, mas também digitais voltados a resposta de análise de emissões e potência gerada pelo motor gerador.

Utiliza-se para a coleta de dados de consumo do combustível gasoso um rotâmetro da marca LZT modelo M6 exposto na Figura 21 com dados descritos na Tabela 15.





Tabela 15: Especificações técnicas do regulador de pressão Vortech VT13

Características técnicas	Especificação	
Marca	LZT	
Modelo	M-6	
Pressão máxima de entrada	1 Bar	
Vazão máxima de saída	50 L/min	
Vazão mínima de saída	5 L/min	

Os dados de consumo de combustível se darão por meio de uma proveta graduada marca Nalgon (Figura 22) de capacidade 500ml, escala de 5ml. A proveta é fabricada em polipropileno de forma que possa ser adaptada como tanque de combustível para os ensaios.

Figura 22: Proveta graduada em polipropileno



As respostas digitais de potência gerada são fornecidas por meio de dados de corrente e tensão, obtidas por dois multímetros da marca Fluke modelo F302+ com sensores não invasivos. O multímetro empregado, Figura 23, tem suas especificações técnicas referente a corrente e tensão agrupadas nas Tabelas 16 e 17.

Figura 23: Multímetro para aquisição de tensão e corrente gerada Fluke F302+



Características técnicas	Especificação
Marca	Fluke
Modelo	F302+
Corrente de entrada	0 a 400 A
Resolução	0,1 A
Precisão	1,8% (45 a 65Hz)
Temperatura de trabalho	0 a 40°C

Tabela 16: Especificações técnicas do sensor de corrente gerada

Características técnicas	Especificação			
Marca	Fluke			
Modelo	F302+			
Tensão de entrada	0 a 600 VAC			
Resolução	0,1 V			
Precisão de leitura	1,0%			
Temperatura de trabalho	0 a 40°C			

As respostas de emissões de gases provenientes da combustão do combustível líquido e gasoso no motor gerador são coletadas e medidas em forma de concentração pelo Analisador de emissões Infralyt ELD (Figura 24). Os gases coletados pelo analisador são monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂), hidrocarbonetos (HC) e oxigênio (O₂) cujas faixas de medição e precisão são expostas na Tabela 18.



Figura 24: Analisador de emissões Infralyt ELD

Gases medidos	Faixa de medição	Precisão
СО	0 a 2000 ppm vol	± 10 ppm
CO ₂	0 a 20%	± 0,3%
NO	0 a 5000 ppm	± 5 ppm
NO ₂	0 a 500 ppm	± 5 ppm
HC	0 a 2500 ppm	± 10 ppm
O ₂	0 a 22%	± 0,3%

Tabela 18: Especificações técnicas do analisador de emissões

3.3. Metodologia

3.3.1. Metodologia experimental

A metodologia empregada na presente pesquisa denomina-se Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), trata-se de um método estatístico multivariado utilizado para ajustar dados a uma curva tridimensional, determinada por uma equação polinomial de baixo grau (Simsek; Uslu, 2020) (Veza et al., 2023).

O processo metodológico envolve a elaboração de um projeto experimental que define os ensaios a serem realizados. Os resultados e entradas desses ensaios são então simulados para identificar a melhor equação, e consequentemente, a superfície que os descreve. Isso permite a identificação de pontos e regiões otimizadas do mecanismo ou fenômeno estudado. (Elkelawy et al., 2022).

O projeto experimental por sua vez pode ser caracterizado pela distribuição de seus pontos, sendo ele Full Factorial, Box-Behnken ou Central Composite Desgin que segundo Veza et al., (2023) tem alta efetividade no ajuste de superfícies de primeira e segunda ordem, adequando-se, portanto, aos experimentos expostos no presente trabalho.

Corroborando ainda com a efetividade do método de superfície de resposta Sharma et al., (2019) o destaca como um dos mais relevantes para a descrição e otimização de motores a combustão interna justamente por destacar pontos de maior relevância proporcionados pelas condições de entrada no motor bem como sua otimização no número de ensaios dado pelo projeto experimental.

Partindo da metodologia proposta, elabora-se um planejamento experimental com base na codificação exposta na Tabela 19, utilizando como variáveis de entrada a Concentração de Biodiesel no Combustível Líquido (%), a Carga Aplicada (kW) no gerador com um respectivo intervalo de entradas de 15% a 30%, 2,00kW a 4,00kW,

com pontos centrais estabelecidos em 22,5% de Biodiesel e 3,00kW de carga, bem como a presença ou não de Hidrogênio enriquecendo o Biogás em concentração de 12,5% como combustível gasoso.

Codificação	Concentração de Biodiesel no Combustível Líquido (%)	Carga Aplicada (kW)		
-1	15,00	2,00		
0	22,50	3,00		
1	30,00	4,00		

Tabela 19: Projeto experimental (parâmetros de entrada e codificação)

As respostas analisadas partem do objetivo de comparar a Potência Gerada (kW), Consumo Específico de Combustível Líquido (g/kWh), Eficiência do motor gerador providas pelas variações de concentrações de biodiesel no combustível líquido e enriquecimento com hidrogênio no combustível gasoso no modo de operação Dual. Serão analisadas também as respostas de emissões do motor gerador sob a forma de concentração de Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Óxidos de nitrogênio (NO_x), Hidrocarbonetos (HC) e Opacidade.

Os modelos dos experimentos foram desenvolvidos no software OriginPro 2024b (Learning Edition) com número de série GL3S4-6089-7609064, utilizando seu aplicativo Design of Experiments v1.39, onde se utiliza a Metodologia de Superfície de Resposta baseada em um projeto do tipo *Central Composite* com 2 replicatas e 6 pontos centrais totalizando 40 ensaios, culminando em 5 matrizes experimentais com dados de entrada iguais e respostas distintas para cada um dos fatores analisados como exposto na Tabela 20.

Entradas Planejamento Experimental							
Ensaio	Concentração de Biodiesel (%)	Carga Aplicada (kW)	Enriquecimento de Biogás com Hidrogênio (12,5%)				
1	30	2	0				
2	22,5	3	0				
3	30	2	1				
4	30	4	0				
5	15	2	0				
6	15	4	0				
7	15	4	1				
8	30	4	1				
9	15	2	1				
10	15	2	0				
11	22,5	3	1				
12	30	2	0				
13	15	2	1				
14	15	4	0				
15	22,5	3	0				
16	22,5	3	1				
17	30	4	0				
18	22,5	3	0				
19	22,5	3	1				
20	30	4	1				
21	15	4	1				
22	22,5	3	0				
23	30	2	1				
24	22,5	3	1				
25	10	3	0				
26	22,5	1,5	0				
27	35	3	0				
28	10	3	1				
29	35	3	1				
30	35	3	0				
31	35	3	1				
32	22,5	1,5	1				
33	22,5	4,5	0				
34	22,5	4,5	1				
35	22,5	1,5	0				
36	22,5	4,5	0				
37	22,5	4,5	1				
38	22,5	1,5	1				
39	10	3	0				
40	10	3	1				

Tabela 20: Matriz experimental (Entradas)

Para efeito comparativo tanto de eficiência como de emissões geradas pelo processo de combustão, realiza-se também os ensaios descritos na Tabela 21 utilizando Diesel S10 puro (B0), Biodiesel de Soja puro (B100) e uma blenda biodiesel/diesel otimizada, a ser determinada pela região otimizada da superfície de resposta, para cargas de 1,5kW a 4,5kW.

Ensaio	Concentração de Biodiesel (%)	Enriquecimento de Biogás com Hidrogênio (12,5%)				
1	0	1,5	0			
2	0	2	0			
3	0	3	0			
4	0	4	0			
5	0	4,5	0			
6	22,5	1,5	0			
7	22,5	2	0			
8	22,5	3	0			
9	22,5	4	0			
10	22,5	4,5	0			
11	22,5	1,5	1			
12	22,5	2	1			
13	22,5	3	1			
14	22,5	4	1			
15	22,5	4,5	1			

Tabela 21: Tabela de ensaios comparativos

3.3.2. Metodologia para análise de incertezas

Para avaliação dos instrumentos de medição bem como dos valores obtidos pelos ensaios, assegurando portanto uma avaliação sistemática destes dados experimentais, realiza-se a análise de incertezas baseada nas medições obtidas, onde a partir da média de valores encontrados, assim como sua variância, calcula-se o desvio padrão para cada uma das medições realizadas, de maneira a determinar a incerteza da medição (Equação 7) posteriormente agrupadas culminando na incerteza obtida pelo procedimento experimental conforme Equação 8 (Murugesan et al., 2022).

$$u_{medida} = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{7}$$

Na qual:

u_{medida} : Incerteza da medição;

S : Desvio padrão;

n : Número de medições;

$$u_{experimento} = \sqrt{\frac{u_{cons,L}^{2} + u_{tensão}^{2} + u_{corrente}^{2}}{+u_{conc.nox}^{2} + u_{conc.co}^{2} + u_{conc.co2}^{2} + u_{conc.hc}^{2}}}$$
(8)

Na qual:

 $u_{experimento}$: Incerteza do experimento;

 $u_{cons.L}$: Incerteza de medição consumo de combustível líquido;

*u*_{tensão} : Incerteza de medição tensão;

*u*_{corrente} : Incerteza de medição corrente;

*u*_{conc.nox} : Incerteza de medição concentração NO_X;

*u*_{conc.co2} : Incerteza de medição concentração CO₂;

u_{conc.co} : Incerteza de medição concentração CO;

*u*_{conc.hc} : Incerteza de medição concentração HC;

3.3.3. Metodologia de conversão do moto gerador em modo dual

A alimentação do motor gerador com combustível gasoso depende principalmente da adaptação de um carburador capaz de efetuar a mistura entre o combustível (biogás enriquecido com hidrogênio) e o ar admitido pelo motor, para tanto, faz-se necessário a utilização de uma peça de união ou adaptador entre as duas partes.

Devido a utilização de pequenos geradores em modo dual ser bastante rara, não se dispõem de tal adaptador no mercado atual, havendo, portanto, a necessidade de se desenvolver um projeto específico para o gerador Branco BD6500 interligandoo ao carburador Huayi GX390/188F.

O projeto teve como base o flange do filtro de ar do motor, conforme exposto na Figura 25, do qual se projetou um segundo flange compatível com a fixação do carburador, os dois flanges são espaçados entre si 50mm, para que não haja interferência física entre as peças, esta interligação se dá por um tubo 1" schedule 10 de diâmetro interno 27,8mm condizente com o diâmetro da saída do carburador como pode-se visualizar no desenho técnico representado na Figura 26.



Figura 25: Flange de admissão de ar do motor gerador sem filtro de ar

Figura 26: Medidas do adaptador Motor-Gerador/Carburador





Figura 27: Motor-Gerador com carburador adaptado para operação em modo dual

Sua fixação se dá por parafusos tipo Allen M6 e vedação por junta líquida de alta temperatura evitando assim a entrada de ar falso ou então a perda de combustível gasoso por fuga nos flanges.

3.3.4. Metodologia de enriquecimento de biogás com hidrogênio

O processo de enriquecimento do biogás com hidrogênio será realizado com base nas pressões parciais de cada gás em um cilindro utilizado como câmara de armazenamento e mistura, tal sistema é exposto na Figura 28, sendo composto pelos cilindros que armazenam os gases a serem misturados (biogás e hidrogênio) cada qual dotado de um regulador de pressão interligado a uma conexão tipo "Y" de modo que possam ser transferidos a um único cilindro de armazenamento e mistura.



Figura 28: Configuração de sistema para enriquecimento de biogás com hidrogênio

O monitoramento das pressões de biogás e hidrogênio no cilindro de mistura será feito por meio dos reguladores de pressão equipados com manômetros e fluxômetros, permitindo definir com precisão a pressão e a quantidade de cada gás inserido, de modo com que se possa efetuar o controle adequado da concentração de hidrogênio no biogás (12,5%) conforme especificado no projeto experimental

Para que se determine a concentração de hidrogênio na mistura conforme especificado, utiliza-se a Lei de Dalton para pressões aditivas que determina que a pressão total da mistura de gases é igual a soma das pressões de cada um dos gases que a compõem, bem como a Lei de Amagat dos volumes aditivos onde o volume total da mistura é igual à soma dos volumes de gases que a compõem, análoga a lei de Dalton descritas pelas equações 9 e 10 respectivamente (Çengel; Boles, 2013).

$$P_m = \sum_{i=1}^k P_i (T_m, V_m)$$
(9)

$$V_m = \sum_{i=1}^k V_i (T_m, P_m)$$
(10)

Nas quais:

 P_m : Pressão da mistura (kPa);

 V_m : Volume da mistura (m³);

 T_m : Temperatura da mistura (K);

 V_i : Volume dos gases que compõe a mistura (m³);

P_i : Pressão dos gases que compõe a mistura (kPa);

Embora as leis de pressões e volumes aditivos sejam aplicáveis a gases ideais, elas não consideram as interações intermoleculares, que se tornam mais expressivas em condições de baixa temperatura e alta pressão, podendo comprometer a precisão no cálculo da concentração da mistura de biogás e hidrogênio.

No entanto, a aplicação da Lei de Dalton das Pressões Parciais continua sendo um método amplamente utilizado para a formulação de misturas combustíveis, como demonstrado por Sagar e Agarwal (2016) que validaram seu uso na preparação de misturas entre hidrogênio e gás natural, demonstrando que apesar das limitações inerentes ao modelo de gases ideais foi possível realizar misturas de composição controlada dinâmica e estaticamente com desempenho satisfatório, viabilizando investigações experimentais robustas sobre combustão, desempenho e emissões.

Após realizado o processo de mistura dos gases a luz da teoria e dos cálculos de pressões e volumes aditivos realiza-se a experimentação de uma amostra da mistura em um cromatógrafo gasoso da marca Shimadzu modelo GC-2014 (Figura 29) a fim de se determinar a concentração do hidrogênio na mistura de, proporcionando maior confiabilidade ao experimento.



Figura 29: Cromatógrafo Gasoso Shimadzu GC-2014

3.3.5. Metodologia para análise de desempenho e coleta de dados

Em posse da mistura de combustível gasoso e do motor gerador adaptado para a operação dual, o levantamento dos dados experimentais será realizado na sede da empresa Biogás Motores LTDA localizada no município de Toledo/Pr latitude 24°44'16" Sul longitude 53°41'37" Oeste, balizados pelo planejamento experimental descrito na seção 3.3.1 e pelas entradas agrupadas na matriz experimental exposta na Tabela 20.

A montagem do sistema experimental em operação dual segue o diagrama ilustrado pela Figura 30 e é apresentado na Figura 31, em que, a mistura de gases é fornecida ao carburador juntamente com ar ambiente succionado do filtro de ar e admitido no motor gerador, o volume de biogás enriquecido fornecido ao carburador é calculado a partir da medida de um rotâmetro com escala de 0 a 50 litros por minuto (I/min), que se localiza entre o balão de gás e o carburador.

Figura 30: Sistema experimental com operação em modo dual utilizando biogás enriquecido com hidrogênio





Figura 31: Sistema experimental

O procedimento experimental, exposto na Figura 32, inicia-se com o acoplamento do balão contendo a mistura de biogás e hidrogênio ao carburador e o carregamento da proveta com a mistura de biodiesel e diesel, com as concentrações conforme a matriz experimental exposta na Tabela 20. Em seguida, o motor é acionado, ajustando-se a vazão do gás para 20 lpm e aplicando-se a carga definida também em acordo com a matriz experimental. Após 30 segundos para estabilização do sistema, realiza-se o teste por 3 minutos, coletando dados de tensão (V), corrente (A) e emissões de CO, CO₂, NOx e HC (%) a cada 30 segundos, assim como o consumo de combustível líquido (ml) total. Finalizadas as medições, o motor é desligado e resfriado, por fim, se realiza a purga do analisador de emissões para que não ocorram interferências entre ensaios, bem como são removidas as sobras de combustível líquido do tanque e da tubulação possibilitando o início de um novo ensaio.





Partindo da taxa de volume de mistura de biogás enriquecido com hidrogênio admitido no processo de combustão calcula-se a potência fornecida pelo combustível gasoso a partir da Equação (11):

$$Pot_{comb.gas.} = PCI_{biog\acute{a}s} \cdot \dot{V}_{gas} \cdot \frac{c_{biog\acute{a}s}}{100} + PCI_{hid.ind.} \cdot \dot{V}_{gas} \cdot \frac{c_{hid.ind.}}{100}$$
(11)

Na qual:

Pot_{comb.gas.} : Potência fornecida pela mistura de biogás e hidrogênio (kW);

 \dot{V}_{gas} : Fluxo de combustível gasoso (m³/s);

PCI_{biogás} : Poder calorífico inferior do biogás (kJ/m³);

c_{biogás} : Concentração de biogás na mistura de combustível gasoso (%);

*PCI*_{hid.ind.} : Poder calorífico inferior do hidrogênio industrial (kJ/m³);

*c*_{*hid.ind.*} : Concentração de hidrogênio industrial na mistura de combustível gasoso (%);

O combustível líquido, por sua vez é fornecido ao motor gerador pela bomba original que equipa o motor, porém é advindo de uma proveta graduada abastecida com as blendas de diesel/biodiesel seguindo o planejamento experimental, de modo que se possa medir seu consumo em mililitros durante o período de testes, análogo a potência fornecida pelo combustível gasoso a Equação 12 fornece valores referentes ao combustível líquido:

$$Pot_{comb.liq.} = PCI_{comb.liq.} \cdot \frac{m_{comb.liq.}}{t_{ensaio}}$$
(12)

Na qual:

 $Pot_{comb.liq.}$: Potência fornecida pelo combustível líquido diesel/biodiesel (kW); $m_{comb.liq.}$: Massa do combustível líquido consumido (kg); $PCI_{comb.liq.}$: Poder calorífico inferior do combustível líquido (kJ/kg); t_{ensaio} : tempo de ensaio após a estabilização da geração de energia (s);

As cargas aplicadas ao motor gerador para a geração de eletricidade são do tipo resistivas e sua aplicação inicia o ensaio, sendo que o tempo estabelecido para

cada ensaio inclui 30 segundos para a estabilização do sistema após a seleção da carga resistiva e mais 3 minutos de experimentação, período este considerado suficiente para garantir um consumo significativo de combustível líquido e gasoso, além de permitir a coleta adequada de dados sobre a geração de energia elétrica.

Os dados de geração de energia são obtidos por meio dos sensores de corrente e tensão, a partir dos quais, utilizando a lei de Ohm é possível relacionar os dados de corrente e tensão a potência gerada conforme descrito na Equação 13:

 $Pot_a = U.i \tag{13}$

Na qual:

Pot_g : Potência gerada (kW);

U : Tensão do gerador (V);

i : Corrente do gerador (A);

Por intermédio da Equação 9 os dados de corrente e tensão são correlacionados na forma de potência e armazenados para posterior análise em conjunto com os dados provenientes do consumo de combustível gasoso e líquido.

Os dados de rendimento são obtidos de acordo com a relação entre potência gerada e potência consumida em forma de combustível expressa na Equação 14 correlacionando as Equações 11, 12 e 13:

$$\eta = \frac{Pot_g}{Pot_{com.liq} + Pot_{comb.gas.}}$$
(14)

Na qual:

 η : Eficiência do motor gerador;

Pot_g : Potência gerada (kW);

Pot_{comb.liq.}: Potência fornecida pelo combustível líquido diesel/biodiesel (kW);
 Pot_{comb.gas.}: Potência fornecida pela mistura de biogás e hidrogênio (kW);

Os dados de resposta do sistema que descrevem o consumo específico de combustível líquido (g/kWh) podem ser obtidos pela Equação 15 que relaciona dados de consumo com a potência em kWh gerada durante o ensaio conforme:

$$CE_{liq.} = \frac{m_{comb.liq.}}{Pot_g.t_{ensaio}} .3,6$$
(15)

Na qual:

CE_{liq.} : Consumo específico de combustível líquido (g/kWh);

Pot_a : Potência gerada (kW);

 t_{ensaio} : tempo de ensaio após a estabilização da geração de energia (s); $m_{comb.lig.}$: Massa do combustível líquido consumido (kg);

Para tanto baseando-se nos dados obtidos analogicamente e digitalmente dos sensores empregados no experimento, bem como nas equações descritas nesta seção obtém-se as respostas de desempenho do sistema experimental: Consumo Específico de Combustível Líquido, Potência Gerada e Eficiência do Conjunto Motor Gerador expostas no diagrama apresentado na Figura 33:



Figura 33: Diagrama de análise de dados e respostas de desempenho

3.3.6. Metodologia para análise de emissões e coleta de dados

A coleta e análise de dados provenientes das emissões do conjunto motor gerador é efetuada nos mesmos ensaios de desempenho, expostos na seção 3.3.4, por uma sonda localizada no sistema de escapamento do conjunto motor gerador, de modo a efetuar uma leitura e coleta de dados mais precisa, diferentemente dos dados de desempenho os dados de emissão são obtidos de forma direta e apresentados em forma de concentração no formato digital pelo analisador de emissões Infralyt ELD por sua interface, conforme verifica-se no diagrama apresentado pela Figura 34, culminando portanto nas respostas de emissão que serão correlacionadas as variáveis de entrada por meio do método de superfície de resposta.



Figura 34: Diagrama de análise de dados e respostas de emissão

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para facilitar o entendimento e discussão dos resultados, estes foram subdivididos em dez categorias para análise: Matriz de dados experimentais, Cálculo de incertezas experimentais, Potência gerada, Consumo específico de combustível líquido, Eficiência, Emissão de monóxido de carbono (CO), Emissão de dióxido de carbono (CO₂), Emissão de hidrocarbonetos (HC), Emissão de óxidos nitrosos (NO_x), Otimização e Comparação para que se tenha um panorama completo da relação entre os valores otimizados e os modos convencionais de operação.

4.1. Matriz de dados experimentais

A matriz de dados experimentais apresentada na Tabela 22, agrupa de forma sistemática as variáveis de entrada e as respostas obtidas durante os ensaios, integrando os parâmetros operacionais e de medição que fundamentam a análise do desempenho e das emissões do sistema experimental.

Pla	nejamento	Experim	ental			Re	spostas	;		
Ens.	Conc. de Biodiesel (%)	Carga (kW)	Conc. de H ₂ (12,5 %)	Cons. Esp. de Comb. Líquido (g kWh ⁻¹)	Potência Gerada (kW)	Efic. (%)	Conc. CO2 (%)	Conc. CO (ppm)	Conc. NO _x (ppm)	Conc. HC (ppm)
1	30,0	2,0	0	440,15	1,88	13,15	6,76	1245,83	26,83	193,00
2	22,5	3,0	0	385,13	2,18	14,90	7,58	995,33	44,50	166,17
3	30,0	2,0	1	451,54	1,87	13,07	6,91	1172,67	33,00	163,17
4	30,0	4,0	0	347,15	2,48	16,83	7,57	760,67	56,83	138,50
5	15,0	2,0	0	446,14	1,84	12,53	6,57	1309,33	24,17	176,67
6	15,0	4,0	0	343,24	2,44	16,36	7,30	768,83	59,17	156,50
7	15,0	4,0	1	333,64	2,41	16,93	7,36	676,83	75,33	129,33
8	30,0	4,0	1	336,50	2,41	17,38	7,58	811,67	78,33	160,83
9	15,0	2,0	1	422,17	1,90	13,38	6,82	1281,33	32,83	185,33
10	15,0	2,0	0	436,19	1,84	12,75	6,56	1278,50	30,50	185,67
11	22,5	3,0	1	344,46	2,34	16,75	7,09	887,67	50,33	156,67
12	30,0	2,0	0	462,37	1,86	12,64	6,76	1213,50	25,33	177,00
13	15,0	2,0	1	427,17	1,92	13,28	6,82	1288,67	30,17	184,50

Tabela 22: Matriz experimental dados de entradas e respostas

14	15,0	4,0	0	333,83	2,40	16,66	7,19	715,83	58,50	142,50
15	22,5	3,0	0	372,86	2,30	15,46	7,61	965,83	47,17	165,00
16	22,5	3,0	1	353,07	2,33	16,42	7,21	866,83	60,83	161,67
17	30,0	4,0	0	339,40	2,49	17,13	7,55	746,67	56,83	139,00
18	22,5	3,0	0	348,33	2,26	16,23	7,45	965,50	43,83	172,17
19	22,5	3,0	1	371,07	2,26	15,70	7,37	916,00	66,33	178,50
20	30,0	4,0	1	329,98	2,40	17,64	7,50	764,50	77,83	150,83
21	15,0	4,0	1	330,07	2,38	17,03	7,28	645,00	76,17	122,83
22	22,5	3,0	0	367,39	2,24	15,55	7,35	902,17	44,00	160,00
23	30,0	2,0	1	426,25	1,86	13,66	6,82	1125,33	33,67	188,17
24	22,5	3,0	1	359,90	2,28	16,11	7,40	881,00	63,33	164,83
25	10,0	3,0	0	356,75	2,10	15,25	6,68	978,67	40,00	185,33
26	22,5	1,5	0	543,39	1,51	10,51	6,68	1533,00	15,67	213,00
27	35,0	3,0	0	374,63	2,17	15,55	6,75	879,33	43,50	173,17
28	10,0	3,0	1	355,67	2,15	15,62	6,88	832,67	53,17	144,33
29	35,0	3,0	1	355,66	2,34	16,72	7,20	936,17	49,17	166,50
30	35,0	3,0	0	381,58	2,13	15,27	6,67	837,83	44,17	162,00
31	35,0	3,0	1	363,33	2,29	16,37	7,08	892,00	50,33	157,67
32	22,5	1,5	1	502,38	1,50	11,32	6,62	1446,00	23,17	206,17
33	22,5	4,5	0	333,37	2,72	17,51	8,17	764,17	65,83	145,00
34	22,5	4,5	1	319,34	2,68	18,32	8,23	715,17	82,17	132,83
35	22,5	1,5	0	537,87	1,50	10,57	6,61	1608,00	14,17	221,50
36	22,5	4,5	0	338,67	2,68	17,24	8,14	802,83	70,00	152,50
37	22,5	4,5	1	321,51	2,66	18,19	8,29	784,67	87,17	139,00
38	22,5	1,5	1	512,79	1,51	11,14	6,59	1528,17	20,67	208,33
39	10,0	3,0	0	374,06	2,05	14,62	6,55	898,33	40,17	175,17
40	10,0	3,0	1	366,05	2,14	15,25	6,86	879,33	52,83	160,17

Com base nos dados apresentados, foram elaborados modelos de superfícies de resposta para cada categoria de dados medidos, tanto na presença (h1) quanto na ausência de hidrogênio (h0) no combustível gasoso, conforme representado pelas Equações 16 a 29.

$$Pot_gh0 (kW) = -6,69.10^{-14}x^2 - 0,0875y^2 + 0,0335x + 0,8231y + 8,810^{-18}xy + 0,0999$$

$$\begin{aligned} &Pot_gh1\,(kW) = -6,69.\,10^{-14}x^2 - 0,0875y^2 + 0,0335x + 0,8231y + 4,16\,10^{-17}xy + 0,1283 \\ &(17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &CE_{itq.}\,h0\,(g\,kWh^{-1}) = 27,632x^2 + 0,153y^2 - 224,425x - 0,3428y + 7,012\,10^{-17}xy + 793,387 \\ &(18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &CE_{itq.}\,h1(g\,kWh^{-1}) = 27,632x^2 + 0,153y^2 - 224,425x - 0,3428y + 7,012\,10^{-17}xy + 779,390 \\ &(19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\eta\,h0\,(\%) = -0,0026x^2 - 0,7868y^2 + 0,1389x + 7,1846y + 8,699\,10^{-1}\,xy + 2,2426 \\ &(20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\eta\,h1\,(\%) = -0,0026x^2 - 0,7868y^2 + 0,1389x + 7,1846y + 4,.699\,10^{-16}xy + 1,4440 \\ &(21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &CO_2\,h0\,(\%) = -0,0037x^2 - 1,065.10^{-5}y^2 + 0,1743x + 0,4358y + 8,1210\,10^{-17}xy + 3,9459 \\ &(22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &CO_2\,h1\,(\%) = -0,0037x^2 - 1,065.10^{-5}y^2 + 0,1743x + 0,4358y + 8,1210\,10^{-17}xy + 4,0160 \\ &(23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &HC\,h0(ppm) = 4,0775x^2 - 0,0111y^2 - 46,0140x + 0,5601y + 1,25\,10^{-14}xy + 261,4691 \\ &(24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &HC\,h1(ppm) = 4,0775x^2 - 0,2111y^2 - 46,0140x + 0,5601y + 1,25\,10^{-14}xy + 254,5608 \\ &(25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &CO\,h0(ppm) = 97,0578x^2 - 0,2257y^2 - 969,1527x - 9,3791y + 5,6458xy + 2916,2598 \\ &(26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &CO\,h1(ppm) = 97,0578x^2 - 0,2257y^2 - 955,3488x - 5,5547y + 5,6458xy + 2746,8737 \\ &(27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &NO_x\,h0(ppm) = -0,0397x^2 - 2,4373y^2 + 1,8394x + 31,3931y - 0,0042xy - 46,5061 \end{aligned}$$
Nas quais:

h0: Combustível gasoso não enriquecido;

h1: Combustível gasoso enriquecido com 12,5% de hidrogênio;

Pot_g: Potência gerada (kW);

 CE_{lia} : Consumo específico de combustível líquido (g kWh⁻¹);

 η : Eficiência (%);

CO₂: Concentração de dióxido de carbono nas emissões (%);

HC: Concentração de hidrocarbonetos nas emissões (ppm);

CO: Concentração de monóxido de carbono nas emissões (ppm);

NO_x: Concentração de óxidos de nitrogênio nas emissões (ppm);

4.2. Cálculo de incertezas experimentais

A análise de incertezas inerentes do processo experimental exposta na Tabela 23, evidencia que os equipamentos de medição utilizados apresentam níveis de incerteza variados, sendo que os parâmetros físicos e elétricos, como o volume do combustível líquido, tensão e corrente, demonstram boa precisão, com incertezas de 0,17%, 0,35% e 0,04%, respectivamente, ao passo que as medições de emissões, particularmente de CO (3,37%) e NOx (3,44%), apresentam incertezas superiores, refletindo a maior sensibilidade e variabilidade a estes parâmetros, embora tais valores permaneçam dentro de limites aceitáveis.

Propriodados	Procisão (+)	Incortoza (%)
Vol. Comb. Liq. (ml)	± 2,5 ml	0,17
Tensão (V)	± 1,8 %	0,35
Corrente (A)	± 1,0 %	0,04
CO (ppm)	± 10 ppm	3,37
CO ₂ (%)	± 0,3 %	0,02
NOx (ppm)	± 5 ppm	3,44
HC (ppm)	± 10 ppm	0,31

Tabela 23: Tabela de incertezas percentuais e precisão de parâmetros de entrada

medidos.

A incerteza total do experimento, determinada conforme a Equação 8, foi de 4,84%, um valor que se mostra ligeiramente superior aos reportados por Murugesan et al. (2022) (2,36%), Oni et al. (2022) (0,64%), Mohite et al. (2024) (4,47%) e Saridemir, Polat e Ağbulut (2024) (2,3%); contudo, permanecendo abaixo do limite de 5%, esse nível de incerteza é considerado aceitável, garantindo um grau de confiabilidade de 95%.

4.3. Potência gerada

O modelo de potência gerada, caracterizado por uma estrutura linear com termos quadráticos, apresentou um coeficiente de determinação dentro dos limites de significância de 5%, conforme mostrado na Tabela 24, com valores de R² de 0,96 e R²_{aj.} de 0,95 indicando que o modelo é capaz de explicar 95% das variações observadas, enquanto os 5% restantes são atribuídos aos resíduos.

Tabela 24: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de emissão de potência gerada (kW)

Valor
34
0,96
0,95
0,18

O teste ANOVA (Tabela 25) indica falta de ajuste significativa no modelo estatístico utilizado, que consequentemente não representa a variabilidade dos dados experimentais, sugerindo a presença de padrões sistemáticos nos resíduos que não são completamente explicados pelos efeitos lineares e quadráticos de carga, biodiesel e hidrogênio, porém apesar de tais limitações o modelo demonstra utilidade na identificação de tendências gerais e efeitos dominantes na potência gerada.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	Valor de F	Prob>F
Biodiesel	1	0,02	0,02	4,56	0,04
Carga	1	3,90	3,90	723,09	0,00

Tabela 25: Teste ANOVA referente ao modelo de potência gerada (kW)

Hidrogênio	1	0,01	0,01	1,49	0,23
Biodiesel*Biodiesel	1	0,00	0,00	0,22	0,64
Carga*Carga	1	0,14	0,14	25,40	0,00
Erro	34	0,18	0,01		
Falta de Ajuste	12	0,17	0,01	17,67	0,00
Erro Puro	22	0,02	0,00		
Total	39	4,25			

Em conformidade com a falta de ajuste identificada no teste ANOVA, os valores residuais do modelo, ilustrados nos diagramas dispostos na Figura 35, exibem certo grau de agrupamento, sugerindo a presença de um padrão possivelmente relacionado ao gerador utilizado no experimento, no entanto, os resíduos permanecem relativamente próximos à linha de normalidade, indicando que sua distribuição segue, em grande parte, um comportamento normal.





O diagrama de efeitos apresentado na Figura 36 para o modelo de potência gerada indica que a carga aplicada é o fator de maior importância, exercendo um impacto significativo na potência do motor, sua interação quadrática sugere que sua influência na potência não segue uma tendência linear. A concentração de biodiesel tem um efeito de menor intensidade, enquanto a adição de hidrogênio ao biogás não demonstrou impacto relevante, sugerindo que, nas condições do experimento, o hidrogênio não alterou de maneira substancial a potência gerada.

Figura 36: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de potência gerada (kW) para curva linear com termos quadráticos



As superfícies de resposta do modelo de potência gerada sem a presença de hidrogênio (Figura 37) e com a presença de hidrogênio (Figura 38), estão em concordância com os resultados da ANOVA e do diagrama de efeitos, evidenciando que a carga é o principal fator determinante da potência do motogerador. Além disso, os modelos reforçam a ausência de um efeito estatisticamente significativo da adição de hidrogênio ao combustível gasoso, embora haja uma leve tendência de aumento na potência gerada com o enriquecimento, essa variação não se mostrou representativa dentro dos limites estatísticos adotados

A não significância do enriquecimento do combustível gasoso com hidrogênio na potência gerada pode estar associada ao controle de rotação do próprio motogerador, que prioriza a estabilidade operacional e potencialmente resulta em uma melhoria na eficiência do consumo de combustível em vez de um ganho expressivo de potência, como reportado por Colle (2018) na operação de um motogerador utilizando biogás como combustível gasoso.

Outro fator que deve ser considerado é a baixa concentração de hidrogênio utilizada, que pode ter sido insuficiente para gerar um impacto mensurável, desta forma para que seja possível uma compreensão mais aprofundada desse efeito, recomenda-se a realização de experimentos com diferentes concentrações de hidrogênio, permitindo não apenas avaliar sua influência na potência gerada, mas também entender o comportamento do motor sob diferentes níveis de enriquecimento.



Figura 37: Superfície de resposta de potência gerada (kW) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso

Figura 38: Superfície de resposta de potência gerada (kW) com a presença de hidrogênio no combustível gasoso



4.4. Consumo específico de combustível líquido

Os resultados de consumo específico de combustível líquido foram também formulados com uma abordagem linear contendo termos quadráticos, o modelo demonstrou capacidade preditiva satisfatória, atingindo um coeficiente de determinação (R²) de 0,97 e um coeficiente de determinação ajustado (R²_{aj}.) de 0,96, conforme apresentado na Tabela 26. Os coeficientes, por se situarem dentro do limite de significância de 5%, evidenciam que o modelo é válido e capaz de explicar 96% da variabilidade dos dados experimentais.

Tabela 26: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de consumo específico de combustível líquido (g kWh⁻¹)

Parâmetro	Valor
Graus de Liberdade	34
R^2	0,97
R ² _{aj.}	0,96
Soma dos resíduos quadrados	4713,44

Conforme apresentado na Tabela 27, o modelo não apresenta falta de ajuste significativa, uma vez que o valor obtido foi 6%, excedendo o limite de 5% geralmente adotado para a validação da precisão do modelo, indicando, portanto, que a variação não explicada pelos termos do modelo não compromete sua adequação estatística.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	Valor de F	Prob>F
Biodiesel	1	254,70	254,70	1,84	0,18
Carga	1	116882,48	116882,48	843,12	0,00
Hidrogênio	1	1959,20	1959,20	14,13	0,00
Biodiesel*Biodiesel	1	4285,89	4285,89	30,92	0,00
Carga*Carga	1	16035,59	16035,59	115,67	0,00
Erro	34	4713,44	138,63		
Falta de Ajuste	12	2557,22	213,10	2,17	0,06
Erro Puro	22	2156,22	98,01		
Total	39	144131,31			

Tabela 27: Teste ANOVA referente ao modelo de consumo específico de

combustível líquido (g kWh⁻¹)

As distribuições dos valores preditos e dos resíduos (Figura 39) demonstram, por meio de uma distribuição aleatória, a ausência de padrões sistemáticos, indicando a adequação do modelo ao conjunto de dados. Além disso, a proximidade dos resíduos à linha de normalidade, caracterizam uma distribuição normal reforçando a robustez e a confiabilidade do modelo de previsão para o consumo específico de combustível líquido (g kWh⁻¹), atestando sua aplicabilidade em cenários reais de operação.





A análise de efeitos do teste ANOVA exposto no diagrama de efeitos (Figura 40), evidencia que a carga aplicada ao motor é o fator predominante na variação do consumo específico de combustível líquido, conforme indicado pelos altos valores de F e pela significância estatística do termo linear e quadrático da carga, seguido pelo termo linear referente à adição de hidrogênio no biogás, indicando que o enriquecimento do biogás pode alterar o comportamento da combustão e, consequentemente, a demanda por combustível líquido. Os termos relacionados a concentração de biodiesel no combustível líquido não apresentaram efeitos para o experimento proposto.





A superfície de resposta para o consumo específico de combustível líquido sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso (Figura 41) apresenta uma tendência de variação significativa em função das variáveis de carga em concordância com o diagrama de efeitos. Observa-se que, em condições de baixa carga, os valores de consumo específico são elevados, apresentando redução significativa com o aumento de carga comportamento associado ao melhor aproveitamento energético do combustível em cargas mais elevadas em consonância com os resultados encontrados por Ahmad, Yadav e Singh (2024).



Figura 41: Superfície de resposta de consumo específico de combustível líquido (g kWh⁻¹) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso

Outro efeito relevante identificado pelo modelo é a influência da presença de hidrogênio no combustível gasoso, evidenciada por uma análise comparativa entre as superfícies de resposta apresentadas nas Figuras 41 e 42. Os resultados indicam que o enriquecimento com hidrogênio proporciona uma redução média de 4,2% no consumo específico de combustível líquido no sistema ensaiado seguindo a tendência observada por Bouguessa et al. (2020).

A redução observada, nos experimentos e no modelo, pode estar associada à melhoria da combustão promovida pelo hidrogênio, que acelera a taxa de liberação de energia e potencializa a eficiência térmica do motor, além disso, a diminuição no consumo específico sugere que a adição de hidrogênio pode, não só atuar como substituto do combustível líquido no processo de combustão, como contribuir para um melhor aproveitamento energético do combustível líquido e gasoso, reduzindo perdas associadas à combustão incompleta conforme observado por Ahmad, Yadav e Singh (2024).



Figura 42: Superfície de resposta de consumo específico de combustível líquido (g kWh⁻¹) com a presença de hidrogênio no combustível gasoso

4.5. Eficiência

O modelo de eficiência do sistema a exemplo dos modelos de potência gerada e consumo específico, foi desenvolvido utilizando uma abordagem linear com termos quadráticos, que revelaram uma capacidade preditiva satisfatória, com um coeficiente de determinação (R²) de 0,97 e um coeficiente de determinação ajustado (R²_{aj}) de 0,97, conforme apresentado na Tabela 28. Os coeficientes do modelo, que se situam dentro do limite de significância de 5%, indicam que ele é válido e capaz de explicar 97% da variabilidade observada nos dados experimentais.

Tabela 28: Tabela	de coeficientes	de determinação para o	o modelo de eficiência ((%)
		2 1	•	· /

Parâmetro	Valor
Graus de Liberdade	34
R ²	0,97
R ² aj.	0,97
Soma dos resíduos quadrados	5,19

O teste ANOVA (Tabela 29) foi aplicado para avaliar a adequação do modelo de eficiência, o valor obtido para a falta de ajuste foi de 0,25, superior ao limiar de

significância de 0,05, indicando que a falta de ajuste não é estatisticamente significativa. Este resultado, em conjunto com o coeficiente de determinação (R²) de 0,97, valida a robustez do modelo, confirmando sua adequação estatística para a previsão de dados de eficiência para o presente sistema experimental.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	Valor de F	Prob>F
Biodiesel	1	1,02	1,02	6,65	0,01
Carga	1	206,36	206,36	1350,62	5,89 10 ⁻²⁹
Hidrogênio	1	6,38	6,38	41,74	2,19 10 ⁻⁷
Biodiesel*Biodiesel	1	1,17	1,17	7,66	9,06 10 ⁻³
Carga*Carga	1	13,00	13,00	85,10	8,83 10 ⁻¹¹
Erro	34	5,19	0,15		
Falta de Ajuste	12	2,23	0,19	1,38	0,25
Erro Puro	22	2,97	0,13		
Total	39	233,12			

Tabela 29: Teste ANOVA referente ao modelo de eficiência (%)

Em conformidade com a avaliação do teste ANOVA a distribuição dos valores residuais se mostra aleatória confirmando a ausência de padrões sistêmicos de resíduos e reforçando a adequação do modelo, juntamente com sua distribuição normal indicada pela proximidade dos resíduos a linha de normalidade expressa também na Figura 43.



Figura 43: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de eficiência (%)

Os resultados do teste ANOVA (Tabela 29) e do diagrama de efeitos (Figura 44) destacam a influência predominante da carga aplicada ao experimento, tanto em seus termos lineares quanto quadráticos. Além disso, o enriquecimento do biogás com hidrogênio demonstrou um efeito significativo no modelo assim como as diferentes concentrações de biodiesel apresentaram impacto estatisticamente relevante na eficiência do sistema experimental.





A superfície apresentada na Figura 45 descreve o comportamento da eficiência do sistema operando em modo dual, utilizando biodiesel em diferentes concentrações como combustível líquido e biogás sem adição de hidrogênio como combustível gasoso. Em consonância com os dados do diagrama de efeitos, observase que a carga aplicada exerce a maior influência sobre a eficiência, esse comportamento segue a tendência observada nos modelos de consumo específico de combustível líquido e potência gerada, evidenciando uma melhora significativa com o aumento da carga, conforme relatado por (Ahmad; Yadav; Singh, 2024), que o associam a um melhor aproveitamento energético dos combustíveis devido às temperaturas mais elevadas, que promovem uma combustão mais completa. Do ponto de vista da concentração de biodiesel no combustível líquido, observa-se um leve incremento na eficiência à medida que sua proporção aumenta, tendência essa, que segue um comportamento não linear, conforme evidenciado pelo efeito significativo do termo quadrático da concentração de biodiesel no teste ANOVA.

A melhoria observada, com um acréscimo médio de aproximadamente 0,4% na eficiência, está em conformidade com os resultados encontrados por Oni et al. (2022), que relatam um aumento na eficiência térmica do biodiesel com relação ao diesel, fenômeno atribuído ao maior índice de cetano do biodiesel, que melhora as características de ignição, e à presença de oxigênio em sua estrutura molecular, favorecendo uma combustão mais completa.

Figura 45: Superfície de resposta de eficiência (%) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso



A adição de hidrogênio ao biogás, conforme ilustrado pela superfície de resposta de eficiência na Figura 46, revela uma tendência positiva de melhoria na eficiência, sugerindo uma combustão mais completa do combustível gasoso enriquecido, tal comportamento é consistente com os resultados obtidos por Oni et al. (2022), que observaram um aumento de 7,5% na eficiência a 100% de carga com o enriquecimento de biogás com 60% de hidrogênio a uma vazão de 23,4 LPM. No

entanto, a presente pesquisa limitou-se a concentrações significativamente menores de hidrogênio (12,5%), assim como a fluxos reduzidos de combustível gasoso de 10 LPM, resultando em uma variação média de eficiência de 0,76%.

A melhoria significativa da eficiência, demonstrada pelo modelo, como também é sustentado por Bouguessa et al. (2020), está associada ao enriquecimento com hidrogênio, que aprimora a qualidade da mistura ar-combustível, promovendo uma ignição mais eficiente e uma queima mais homogênea e estável, devido a elevada reatividade e a alta velocidade de propagação da chama, impostas pelo hidrogênio.

Figura 46: Superfície de resposta de eficiência (%) com a presença de hidrogênio no combustível gasoso



4.6. Emissão de monóxido de carbono (CO)

A adotou-se o modelo quadrático completo para representação dos dados de emissão de monóxido de carbono (CO), devido ao seu coeficiente de determinação satisfazer o índice de significância proposto de 5% apresentando, portanto, valores para R² de 0,98 e R²_{aj.} de 0,98, expostos na Tabela 30.

Parâmetro	Valor
Graus de Liberdade	31
R ²	0,98
R ² aj.	0,98
Soma dos resíduos quadrados	47050,84

Tabela 30: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de emissão de monóxido de carbono (CO)

Conforme expresso no teste ANOVA (Tabela 31) não há evidências de falta de ajuste no modelo proposto uma vez que seu valor 0,11 foi superior a 0,05, que em conjunto com os coeficientes de determinação, apontam para um modelo de superfície de resposta representativo e satisfatório estatisticamente.

Tabela 31: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de monóxido de

		carbono (CO)			
Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	Valor de F	Prob>F
Biodiesel	1	1007,92	1007,92	0,66	0,42
Carga	1	2174113,89	2174113,89	1432,44	0,00
Hidrogênio	1	17577,06	17577,06	11,58	0,00
Biodiesel*Biodiesel	1	109428,26	109428,26	72,10	0,00
Carga*Carga	1	197840,47	197840,47	130,35	0,00
Biodiesel*Carga	1	28687,89	28687,89	18,90	0,00
Biodiesel*Hidrogênio	1	7861,57	7861,57	5,18	0,03
Carga*Hidrogênio	1	1619,66	1619,66	1,07	0,31
Erro	31	47050,84	1517,77		
Falta de Ajuste	9	20373,87	2263,76	1,87	0,11
Erro Puro	22	26676,97	1212,59		
Total	39	2585187,55			

A análise dos resíduos gerados pelo modelo proposto tende a validá-lo, devido à ausência de tendência de erro refletida pela distribuição aleatória de valores, bem como uma distribuição normal apontada pelo acompanhamento da reta de normalidade pelos valores de resíduos em função de sua probabilidade expressos na Figura 47.



Figura 47: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de emissão de monóxido de carbono (CO)

O diagrama de efeitos exposto na Figura 48 assim como os Valores de F expostos na Tabela 31 denotam os termos lineares e quadráticos de carga como efeitos principais do modelo proposto gerando maiores variações de concentração de CO, seguidos pelo efeito entre a interação da carga com a concentração de biodiesel, pelo termo linear da presença de hidrogênio no combustível gasoso e pela interação entre a concentração de biodiesel e o hidrogênio, demonstrando portanto variações significativas dos combustíveis gasoso e líquido na emissão de CO.



Verifica-se nas tendências apresentadas pela superfície de resposta (Figura 49) a redução substancial da concentração de CO com o aumento da carga aplicada, com uma variação média de 66,4% para uma variação de 2 a 4kW de carga aplicada, indicando uma combustão mais completa e mais eficiente em cargas elevadas para as condições de mistura pobres empregues, semelhante ao descrito por Bouguessa et al (2020) e Muhssen, Zöldy e Bereczky (2024) que atribui este comportamento principalmente a queima incompleta dos combustíveis e as baixas temperaturas de combustão geradas por cargas mais baixas.

Segundo Goga et al. (2021) o aumento da concentração de biodiesel tende a redução da concentração de CO, conforme verificado no presente trabalho por uma redução média de 1,1%, efeito do aumento da concentração de biodiesel no combustível líquido.

O modelo apresentou ainda efeito de interação da concentração de biodiesel com a carga, gerando resultados de redução dos índices de CO mais significativos em cargas menores, ao passo de que em cargas mais próximas da nominal apresentaram variação menos significativa, comportamento análogo ao descrito por Orben (2024) que ao testar diferentes concentrações de biodiesel de soja e canola não verificou significância de variações na concentração de monóxido de carbono em altas cargas.





Percebe-se pela superfície de resposta de emissões de CO com o combustível gasoso enriquecido com hidrogênio (Figura 50), em comparação à superfície sem hidrogênio (Figura 49), a redução da concentração de CO, especialmente em cargas mais baixas, representada pelo encolhimento da superfície.

A presença do hidrogênio no combustível gasoso em concentração de 12,5% apresentou efeito significativo de redução média de 5% dos índices de CO, corroborando paralelamente com a conclusão obtida por Muhssen, Zöldy e Bereczky (2024) que detalha em sua revisão bibliográfica a redução da concentração de CO nas emissões de motores alimentados com gás natural enriquecido por hidrogênio e biodiesel devido a otimização da combustão, temperatura e velocidade de chama causada pelo hidrogênio.

Oni et al. (2022) e Nguyen et al. (2024) relatam também reduções significativas dos índices de monóxido de carbono encontrados, porém deve-se notar que estes variam em valor absoluto conforme a as concentrações de hidrogênio empregadas no enriquecimento do biogás, vazão do combustível gasoso e características de mistura na câmara de combustão, podendo atingir níveis de decréscimos de 25% a 30% da concentração de CO como encontrado por Bouguessa et al. (2020).





4.7. Emissão de dióxido de carbono (CO₂)

O coeficiente de determinação relacionado ao modelo de emissão de dióxido de carbono (CO₂), do tipo linear com termos quadráticos, não atingiu os limites de significância desejados de 5% conforme expressado na Tabela 32 pelos valores de R² 0,89 e R²_{aj.} 0,87, indicando que o modelo explica 87% das variações, sendo seu restante (13%) atribuído a resíduos.

Tabela 32: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de emissão de dióxido de carbono (CO₂)

Parâmetro	Valor
Graus de Liberdade	34
R ²	0,89
R ² _{aj.}	0,87
Soma dos resíduos quadrados	1,04

O teste ANOVA exposto na Tabela 33 consolida a falta de representatividade do modelo para as emissões de CO₂ ao demonstrar índice de falta de ajusta significativo de aproximadamente 0,00, visto que este deveria ser superior a 0,05 para que o ajuste da superfície em questão fosse considerado satisfatório, para tanto o modelo de emissões de dióxido de carbono apresentado se presta a análise de tendências e efeitos das variáveis que o compõem.

Tabela 33: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de dióxido de carbono

		(002)			
Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	Valor de F	Prob>F
Biodiesel	1	0,20	0,20	6,40	0,02
Carga	1	6,45	6,45	211,62	0,00
Hidrogênio	1	0,05	0,05	1,61	0,21
Biodiesel*Biodiesel	1	1,75	1,75	57,30	0,00
Carga*Carga	1	0,00	0,00	0,00	1,00
Erro	34	1,04	0,03		
Falta de Ajuste	12	0,89	0,07	10,98	0,00
Erro Puro	22	0,15	0,01		
Total	39	9,48			

Apesar da falta de ajuste do modelo este seguiu uma distribuição aleatória entre os valores residuais e preditos, assim como um comportamento normal destes demonstrado pela disposição dos pontos próximos a reta de normalidade no diagrama exibido pela Figura 51.

Figura 51: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de emissão de dióxido de carbono (CO₂)



O diagrama de efeitos (Figura 52) expõem os resultados constatados no teste ANOVA de que o maior efeito sob o modelo é proveniente da variação de carga aplicada, seguido então pelos termos quadráticos e lineares da concentração de biodiesel no combustível líquido, além de evidenciar a ausência de efeito do hidrogênio no presente experimento.

Figura 52: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de emissão de dióxido de carbono (CO₂) para curva linear com termos quadráticos



A semelhança entre as superfícies de resposta ilustradas nas Figuras 53 e 54 corrobora com a ausência de efeito do hidrogênio nas emissões de dióxido de carbono do presente experimento diferente do que apresentam Muhssen, Zöldy e Bereczky (2024) em sua pesquisa denotando o efeito de redução dos índices de CO₂ causados pelo hidrogênio na combustão em motores operados em modo dual, atrelando a redução de CO₂ ao fato da parcela de hidrogênio utilizada como combustível gerar apenas emissões de vapor de água.

Atribui-se a diferença de resultados a quantidade e a proporção de hidrogênio empregada no presente experimento, uma vez que esse compõe apenas 12,5% do combustível gasoso que é injetado em quantidade baixa de 10 lpm, tornando os índices de redução de CO₂ atribuídos a queima do hidrogênio não significativos quando comparados àqueles emitidos pelos demais combustíveis utilizados como biodiesel e biogás.

Nguyen et al. (2024) descrevem os efeitos da influência da carga, em motores operados em modo dual, com o aumento da concentração de CO₂ nas emissões devido ao processo de queima ser mais completo e efetivo, aliado ainda a presença de CO₂ no biogás utilizado que eleva seus valores nas emissões quando comparadas com a operação normal utilizando somente biodiesel.



Figura 53: Superfície de resposta de emissão de dióxido de carbono (CO₂) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso

Figura 54: Superfície de resposta de emissão de dióxido de carbono (CO₂) com a presença de hidrogênio no combustível gasoso



A concentração de biodiesel no combustível líquido, devido ao seu termo quadrático, acarretou uma tendência parabólica na emissão de CO₂ elevando seus índices de emissão para concentrações de biodiesel de 15 a 22,5% e reduzindo-os até 30%, tal tendência não foi afetada pela presença de hidrogênio se mantendo em ambas as superfícies de resposta.

4.8. Emissão de hidrocarbonetos (HC)

O modelo que melhor se adaptou aos dados de resposta de emissão de hidrocarbonetos (HC) foi do tipo linear com termos quadráticos, apesar de apresentar coeficiente de determinação abaixo do esperado para significância de 5% valores de $R^2 e R^2_{aj.} em 0,81 e 0,78$ respectivamente conforme a Tabela 34, atribuindo, portanto, 22% dos dados a resíduos.

Tabela 34: Tabela de coeficientes de determinação para o modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC)

Parâmetro	Valor
Graus de Liberdade	34
R ²	0,81
$R^2_{aj.}$	0,78
Soma dos resíduos quadrados	3898,26

O teste ANOVA evidenciado na Tabela 35 revelou uma falta de ajuste moderado do modelo com grandeza de 0,01. Apesar disso, o modelo pode ser utilizado para uma análise preliminar de efeitos e tendências, além de permitir uma comparação entre as superfícies de resposta com e sem a presença de hidrogênio, fornecendo principalmente interpretações sobre as diferenças nos comportamentos observados.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	Valor de F	Prob>F
Biodiesel	1	8,22	8,22	0,07	0,79
Carga	1	15788,25	15788,25	137,70	0,00
Hidrogênio	1	477,25	477,25	4,16	0,05
Biodiesel*Biodiesel	1	209,43	209,43	1,83	0,19
Carga*Carga	1	349,17	349,17	3,05	0,09
Erro	34	3898,26	114,65		
Falta de Ajuste	12	2546,58	212,21	3,45	0,01
Erro Puro	22	1351,68	61,44		
Total	39	20730,58			

Tabela 35: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de hidrocarbonetos (HC)

A análise dos resíduos, mesmo com a falta de ajuste, demonstrou que o modelo proposto é válido, já que os valores residuais apresentam uma distribuição aleatória em relação aos valores preditos, bem como tendem a seguir a reta de normalidade quando analisados em função de sua probabilidade, como é confirmado pela disposição dos pontos próximos à reta de normalidade no diagrama exibido na Figura 55, indicando a ausência de tendências de erro sistemático.





Dentre os efeitos, que podem ser evidenciados no teste ANOVA (Tabela 35) e no diagrama de efeitos representado na Figura 56, se sobressaem os efeitos provenientes da carga aplicada ao experimento tanto em seus termos lineares como quadráticos. O efeito do enriquecimento do biogás por hidrogênio também se mostra significante no modelo, diferentemente das concentrações de biodiesel que não obtiveram efeito significativo na emissão de hidrocarbonetos.

Este comportamento também foi descrito por Orben (2024) em sua análise, onde as emissões provenientes das blendas com adição de biodiesel mostraram um efeito significativo em relação as emissões de diesel puro, mas que não obtiveram efeito significativo na emissão de hidrocarbonetos quando comparadas entre si em concentrações de 5% a 40% de biodiesel.





Muhssen, Zöldy e Bereczky (2024) explicam que a concentração de hidrocarbonetos nas emissões de motores a combustão interna corresponde a frações de combustível não queimado, resultantes de um processo de combustão incompleto, intrínseco de baixas cargas tendo como fatores de influência a baixa temperatura de combustão e misturas ar-combustível excessivamente pobres, corroborando com os resultados advindos da superfície de resposta expressa na Figura 57, onde fica clara a tendência de redução da concentração de hidrocarbonetos com o aumento de carga e temperatura.

Oni et al. (2022) também descrevem uma redução dos índices de hidrocarbonetos com o aumento da carga, além do impacto positivo da adição de

hidrogênio ao biogás como componente do combustível gasoso, que em comparação com o uso exclusivo de biogás, promoveu uma redução significativa da concentração de hidrocarbonetos.

Bouguessa et al. (2020) relata em sua análise o efeito do hidrogênio em toda a faixa de carga do motor reduzindo as concentrações de hidrocarbonetos em comparação com as mesmas condições utilizando exclusivamente biogás como combustível gasoso, corroborando com os resultados do presente estudo que demonstram um decréscimo médio de 4,1% dos níveis de hidrocarbonetos em toda a superfície de resposta Figura 58, justificado pelas taxas de reação, temperatura e propagação de chamas proporcionadas pelo hidrogênio.

Figura 57: Superfície de resposta de emissão de hidrocarbonetos (HC) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso





Figura 58: Superfície de resposta de emissão de hidrocarbonetos (HC) com a presença de hidrogênio no combustível gasoso

4.9. Emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x)

Os dados coletados sobre as emissões de óxidos de nitrogênio apresentam valores e distribuição que favorecem a aplicação de um modelo quadrático completo, resultando em coeficientes de determinação R² e R²_{aj.} de 0,98, dispostos na Tabela 36. Esses coeficientes indicam que o modelo ajustado explica 98% da variabilidade dos dados, restando apenas 2% como resíduos, atendendo critério de significância de 5% estabelecido nesta pesquisa, validando, portanto, a modelagem proposta.

Tabela 36: Tabela de coefici	ientes de determinaç	ção para o model	o de emissão de
ć	óxidos de nitrogênio	(NO _x)	

Parâmetro	Valor
Graus de Liberdade	31
R ²	0,98
R ² _{aj.}	0,98
Soma dos resíduos quadrados	261,20

O teste ANOVA (Tabela 37) avalia a adequação do modelo aos valores preditos, indicando uma falta de ajuste de 0,14, maior que 0,05, e, portanto, não significativa. Aliado ainda aos coeficientes de determinação de 0,98, esse resultado confirma que o modelo é estatisticamente válido e representativo para a previsão das variáveis de emissões de óxido de nitrogênio.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	Valor de F	Prob>F
Biodiesel	1	0,32	0,32	0,04	0,85
Carga	1	12416,91	12416,91	1473,65	0,00
Hidrogênio	1	1545,88	1545,88	183,47	0,00
Biodiesel*Biodiesel	1	65,00	65,00	7,71	0,01
Carga*Carga	1	124,74	124,74	14,80	0,00
Biodiesel*Carga	1	0,02	0,02	0,00	0,97
Biodiesel*Hidrogênio	1	1,89	1,89	0,22	0,64
Carga*Hidrogênio	1	201,40	201,40	23,90	0,00
Erro	31	261,20	8,43		
Falta de Ajuste	9	109,22	12,14	1,76	0,14
Erro Puro	22	151,99	6,91		
Total	39	14617,36			

Tabela 37: Teste ANOVA referente ao modelo de emissão de óxidos de nitrogênio

Conforme ilustrado na Figura 59, observa-se uma distribuição aleatória dos resíduos em relação aos valores preditos, além de um comportamento aproximadamente normal, evidenciado pela disposição e proximidade dos pontos ao longo da reta de normalidade, atendendo aos pressupostos de resíduos aleatórios com distribuição normal, reforçando, portanto, a validade do modelo ajustado.

(NO_x)



Figura 59: Distribuição de valores preditos e resíduos para o modelo de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x)

O gráfico de efeitos apresentado na Figura 60, indica que as variações na carga, tanto em seu termo linear quanto quadrático, influenciam significativamente os índices de emissão de NOx, sendo o termo linear desta, o fator predominante, seguido pela presença de hidrogênio no combustível gasoso, com impacto relevante as emissões.

Observa-se uma interação entre a presença de hidrogênio e a carga, sugerindo um efeito combinado na emissão, além, embora com menor influência, o termo quadrático da concentração de biodiesel no combustível líquido também estatisticamente significativo, indicando que variações não lineares na proporção de biodiesel afetam a formação de NO_x.

Figura 60: Diagrama de efeitos das variáveis do modelo de emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) para curva quadrática completa



Muhssen Zöldy e Bereczky (2024) e Oni et al. (2022) destacam a temperatura da câmara de combustão e a concentração de oxigênio como fatores determinantes na formação de NOx, uma vez que, em altas temperaturas, o oxigênio tende a oxidar o nitrogênio atmosférico, resultando predominantemente na formação, principalmente, de monóxido de nitrogênio (NO), que representa entre 90% e 95% do total de NOx emitido por motores a combustão interna.

O aumento da carga, por elevar a temperatura da câmara de combustão, torna-se um fator preponderante para o incremento das emissões de NO_x, em concordância com o efeito observado na Figura 61, comportamento que também pode ser verificado na superfície de resposta apresentada na Figura 62, onde se observa um aumento significativo na emissão de NO_x com a elevação da carga, para todas as concentrações de biodiesel no combustível líquido medidas.

O comportamento médio da emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) em função da concentração de biodiesel apresentou um aumento máximo de 4,5% nas concentrações variando de 10% a 22,5%, seguido de uma redução de 4,0% nas concentrações de 22,5% a 35%, corroborando com os efeitos não lineares da concentração de biodiesel descritos no diagrama de efeitos.



Figura 61: Superfície de resposta de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso

Oni et al. (2022) evidenciam que a utilização de biogás como combustível gasoso reduz significativamente a concentração de NOx nas emissões, devido à presença de CO₂, que diminui a eficiência volumétrica, a velocidade da chama e a temperatura de combustão.

Da mesma forma, Muhssen, Zöldy e Bereczky (2024) sugerem que o metano, principal componente combustível do biogás, promove uma redução nas emissões de NO_x, especialmente em cargas baixas e moderadas, corroborando com os resultados obtidos nos testes em modo dual, nos quais a variação das emissões de NO_x com o uso de biogás (sem enriquecimento com hidrogênio) situou-se entre 25,1 e 60,2 ppm, conforme evidenciado na superfície de resposta apresentada na Figura 62.

Nguyen et al. (2024) Destacam a variação significativa e abrupta nas emissões de NO_x causada pela adição de hidrogênio ao combustível gasoso resultante dos picos de temperatura gerados durante sua combustão cuja influência pode ser verificada também na presente pesquisa pela superfície de resposta expressa na Figura 62 que apresenta a relação entre as emissões de NOx a variação de carga e a concentração de biodiesel na presença de hidrogênio como componente do combustível gasoso.

O efeito significativo do hidrogênio na emissão de NO_x fica evidente na comparação entre as Figuras 61 e 62 com um aumento médio dos índices de NO_x de 26,6%, Muhssen, Zöldy e Bereczky, (2024) descrevem efeitos com variações muito semelhantes entre 20,1 e 27,2% de aumento de NO_x com relação a operações em modo normal com diesel e em modo dual empregando gás natural como combustível gasoso.

Figura 62: Superfície de resposta de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) sem a presença de hidrogênio no combustível gasoso



4.10. Validação e otimização

No presente estudo, seguindo o exemplo de Sharma et al. (2019), procedeuse à otimização dos parâmetros do motogerador com o intuito de determinar sua configuração ideal, maximizando a eficiência e a potência gerada e minimizando o consumo de combustível líquido e as emissões de monóxido e dióxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio.

Conforme descrito na Figura 63, os resultados da região otimizada foram obtidos para uma mistura com 22,5% de biodiesel, operando a 3,0 kW e com a

presença de hidrogênio enriquecendo o combustível gasoso a 10 LPM, parâmetros relativamente próximos dos obtidos por Ahmad, Yadav e Singh (2024) cuja concentração de biodiesel utilizada fora de 20%, para uma carga aplicada de 90% e combustível gasoso com 20% de enriquecimento por hidrogênio aplicado a 25 LPM.

Nota-se, entretanto, que o ponto otimizado selecionado pela presente pesquisa, ainda demonstra potencial para melhorias substanciais no consumo de combustível, na eficiência e na redução das emissões de CO e HC, embora seja acompanhado por um aumento significativo nos índices de NO_x para que isso aconteça, principalmente devido à adição de hidrogênio. Esse comportamento ressalta a necessidade de estudos adicionais com diferentes concentrações de hidrogênio, visando mitigar os efeitos dos óxidos de nitrogênio enquanto se aprimoram as demais características de desempenho do sistema.



Figura 63: Otimização de configurações de combustíveis no motogerador

A validação das superfícies de resposta foi realizada utilizando o ponto experimental otimizado, que consiste, conforme determinado na Figura 63, em uma mistura com 22,5% de biodiesel, carga aplicada de 3,0 kW e presença de hidrogênio

no combustível gasoso em concentração de 12,5%, o que resultou em intervalos de erro entre 0,55% e 8,66% para cada uma das superfícies, conforme exposto na Tabela 38.

Nota-se que o valor de erro relacionado a concentração de NO_x (8,66%) parece discrepante em relação aos demais que não ultrapassaram o valor de 3,15%, apesar desta variação, os valores dos erros encontrados se encontram dentro dos limites aceitáveis de ajuste, conforme descreve Veza et al. (2023) em sua revisão, apontando resultados de validação máximos entre 1,58% a 16,24%. Adicionalmente, os demais erros se alinham aos valores apresentados por Sharma et al. (2019) e Singh et al. (2019), que variaram de 2,4% a 6,7% e de 2,67% a 4,65%, respectivamente, reforçando a robustez dos modelos propostos e a confiabilidade dos dados experimentais.

Respostas	Dados Preditos	Dados Experimentais	Erro
Cons. Esp. de comb. Líq. (g kWh ⁻¹)	355,17	357,12	0,55%
Potência gerada (kW)	2,29	2,30	0,75%
Eficiência (%)	18,5	18,6	1,10%
Concentração CO ₂ (%)	7,39	7,27	1,71%
Concentração CO (ppm)	896,21	887,88	0,94%
Concentração NO _x (ppm)	54,99	60,21	8,66%
Concentração HC (ppm)	160,21	165,42	3,15%

Tabela 38: Validação dos resultados e determinação de erros para concentração de biodiesel de 22,5%, carga aplicada 3,0kW e concentração de hidrogênio 12,5%

4.11. Comparação entre modos de operação

Visando estabelecer um panorama abrangente, os resultados experimentais apresentados nesta seção demonstram de forma simplificada o comportamento da potência gerada, do consumo específico de combustível líquido, da eficiência e das emissões de CO, CO₂, HC e NO_x, destacando os pontos de desempenho na região otimizada para a concentração de 22,5% de biodiesel e permitindo a comparação entre o modo normal e o modo dual, com ou sem enriquecimento do combustível gasoso com hidrogênio, a fim de quantificar as diferenças operacionais e ressaltar sua magnitude.

Conforme descrito na seção 4.3, a potência elétrica gerada não apresentou efeito relacionado ao enriquecimento do combustível gasoso com hidrogênio, porém os resultados de consumo específico de combustível líquido apresentaram efeito com redução praticamente constante de 5% no consumo para todas as cargas ensaiadas, enquanto, em comparação com o diesel puro, a operação em modo dual apresentou uma expressiva diminuição no consumo de combustível líquido, fato atribuído pela substituição do combustível líquido pelo gasoso viabilizado principalmente pelo biogás componente em maior proporção do que o hidrogênio.

Com base nos dados expostos pela Figura 64 a redução de consumo de combustível líquido máxima se deu em baixas cargas (1,5 kW) com redução de praticamente 21% da porção líquida de combustível utilizada, além de uma melhoria também expressiva de 16,3% em altas cargas (4,5kW) com biogás enriquecido por hidrogênio, reforçado pelo resultado de 52% de economia em modo dual encontrado por Nguyen et al. (2024).



Figura 64: Consumo específico de combustível líquido em função da carga aplicada para diferentes configurações de combustível líquido e gasoso

Sob a perspectiva da eficiência do sistema, demonstrada na Figura 65, a operação em modo dual apresentou uma redução média de 2% nos índices de

eficiência para a blenda B22 com biogás puro em comparação ao modo normal com diesel puro, efeito atribuído à lenta propagação de chama e a menor eficiência volumétrica promovida principalmente pelo biogás conforme relatado por Bouguessa et al. (2020).

A adição de hidrogênio ao biogás mitigou parcialmente essa limitação, resultando em um aumento absoluto de 1% na eficiência, embora ainda inferior aos valores observados no modo normal com 100% de diesel, sugerindo que um maior enriquecimento do combustível gasoso com hidrogênio poderia potencializar essa melhoria. Outro fator relevante a melhoria da eficiência, é a remoção do CO₂ do biogás, promovendo seu *upgrading* para biometano, que apresenta maior eficiência volumétrica e maior velocidade de propagação da chama (NGUYEN et al., 2024).





A análise das superfícies de resposta para a emissão de monóxido de carbono (CO) (Seção 4.6) revelou o efeito da presença do hidrogênio no combustível gasoso tendendo a uma redução nas concentrações de CO. A Figura 66 confirma essa tendência na comparação entre os modos duais, evidenciando, entretanto, um
aumento significativo nas emissões de CO em comparação com o modo normal operando com diesel S10 puro.

Nota-se também uma tendência de intensificação do aumento de CO à medida que a carga aplicada ao motogerador se eleva, culminando em aumentos máximos de 182,5% e 170,4% quando comparados diretamente o modo normal e as configurações em modo dual, com e sem enriquecimento por hidrogênio respectivamente.

Esse fenômeno, conforme explicado por Ahmad, Yadav e Hasan (2024), devese à baixa temperatura de combustão imposta pelo biogás e à sua lenta propagação de chama, resultando em uma combustão incompleta causando aumento das emissões de monóxido de carbono, efeito que tende a se estabilizar, enquanto no modo normal, a elevação da temperatura promovida pela maior carga favorece uma combustão mais completa, convertendo CO em CO₂ e reduzindo sua emissão.





A concentração de dióxido de carbono (Figura 67) por sua vez, expõe tendência inversa complementar a apresentada pelo monóxido de carbono,

principalmente devido a conversão de CO em CO₂ efeito de uma combustão mais completa.

Apesar das variações abruptas de valores associadas à carga de 3 kW observa-se, de modo geral, que o modo dual demonstra um aumento gradual na concentração de CO₂ com o aumento da carga. Em cargas baixas, entretanto, os valores elevados de CO₂, apesar de menores que o do diesel puro, de podem ser atribuídos, principalmente, à composição do biogás utilizado, que contém aproximadamente 38% de CO₂, o qual não participa ativamente da reação de combustão.

Figura 67: Concentração de CO₂ em função da carga aplicada para diferentes configurações de combustível líquido e gasoso



Bouguessa et al. (2020) observa em suas conclusões, referentes a emissões de hidrocarbonetos, que a presença do biogás em modo dual tem um efeito significativo na emissão de hidrocarbonetos não queimados em comparação com o modo de operação normal, mas que quando enriquecido com hidrogênio há uma tendência de decréscimo, potencializado pelo aumento de carga, semelhantemente aos resultados obtidos na presente pesquisa e explicitados na Figura 68.

Embora os níveis de HC apresentem uma discrepância significativa entre os modos normal e dual, é fundamental considerar a baixa concentração de hidrogênio

utilizada (12,5%), assim como o reduzido fluxo de combustível gasoso (10 lpm) em comparação com outros estudos.



Figura 68: Concentração de HC em função da carga aplicada para diferentes configurações de combustível líquido e gasoso

As concentrações de NO_x apresentadas na Figura 69 confirmam que a fração de biogás foi substancialmente superior à de hidrogênio a ponto de atenuar seu efeito. Embora o hidrogênio, isoladamente, tende a aumentar significativamente as emissões de NO_x, sua inclusão na mistura com biogás resultou em níveis consideravelmente inferiores em comparação ao diesel puro, sugerindo que a combinação desses combustíveis pode mitigar o impacto adverso do hidrogênio sobre as emissões de NO_x.

As concentrações de NOx no modo dual com combustível gasoso enriquecido com hidrogênio apresentaram uma redução média de aproximadamente 11,5%, enquanto o uso exclusivo de biogás resultou em uma diminuição média de 33,3% nas emissões, valores que se encontram dentro da faixa de redução de 25% a 64% reportada por Oni et al. (2022).



Figura 69: Concentração de NO_x em função da carga aplicada para diferentes configurações de combustível líquido e gasoso

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam que a operação em modo dual se configura como uma estratégia promissora para aprimorar a eficiência energética e reduzir o consumo de diesel, por meio da substituição parcial deste por uma mistura de combustível gasoso (biogás e hidrogênio) que, ao longo deste estudo, demonstrou promover ganhos de eficiência, porém contribuindo para um aumento significativo das emissões de CO e HC, enquanto o equilíbrio entre os combustíveis gasosos empregados revela potencial para atenuar as emissões de NO_x.

A potência elétrica gerada não apresentou em seus resultados efeito estatístico significativo para o enriquecimento do combustível gasoso por hidrogênio, possivelmente devido ao controle de rotação e à baixa concentração empregada.

O modelo de superfície de resposta referente ao consumo específico demonstrou elevada robustez apontando efeitos referentes a carga aplicada e ao enriquecimento do biogás com hidrogênio, demonstrando uma redução média de 4,2% no consumo específico de combustível líquido quando comparado ao modo dual sem adição de hidrogênio. Em comparação com o diesel puro, a operação dual apresenta uma expressiva redução no consumo de combustível líquido, decorrente da substituição parcial deste pelo combustível gasoso, com reduções máximas de 21,0% em baixas cargas e 16,3% em cargas elevadas.

A análise dos modelos de eficiência em modo dual, demonstram que tanto o enriquecimento do biogás com hidrogênio quanto a variação na concentração de biodiesel exercem influência nas respostas do sistema, sendo que a elevação na proporção de biodiesel no combustível líquido promove um aumento não linear na eficiência, com um acréscimo médio de 0,4%, enquanto a adição de hidrogênio no combustível gasoso resulta em uma melhoria média de 0,76%, atribuído principalmente ao seu potencial calorífico.

Ao comparar as operações em modo dual e normal, observa-se que a operação dual sem enriquecimento de hidrogênio apresenta uma redução média de 2% na eficiência para a blenda B22 e biogás, em relação ao modo normal com diesel puro, a incorporação de hidrogênio no combustível gasoso mitiga parcialmente essa limitação, elevando a eficiência em 1%, sugerindo que concentrações mais elevadas

de hidrogênio podem potencializar o desempenho e contribuir para superar as limitações inerentes à combustão do biogás.

As emissões de CO são substancialmente reduzidas pelo aumento de carga aplicada, com uma diminuição média de 66,4%, o incremento na concentração de biodiesel no combustível líquido segue a mesma tendência, porém com uma redução média de 1,1% nos níveis de CO. A adição de hidrogênio ao biogás também apresentou um efeito redutor significativo, alcançando uma diminuição média de 5% nas emissões de CO, entretanto, apesar deste efeito a operação em modo dual demonstrou emissões de CO superiores às observadas no modo normal com diesel S10 puro devido à alta concentração de biogás no combustível gasoso.

A fração de hidrogênio empregada (12,5% do combustível gasoso injetado a 10 lpm) não proporcionou reduções significativas nas emissões de CO₂, quando comparada aos efeitos dos demais combustíveis, como o biodiesel e o biogás. A análise da concentração de biodiesel revelou um comportamento parabólico na emissão de CO₂, tendência que permaneceu inalterada com a adição de hidrogênio, evidenciando que os ajustes na composição do combustível líquido desempenham papel crucial no controle das emissões.

A análise das emissões de hidrocarbonetos revela que a incorporação de hidrogênio ao biogás demonstrou reduzir os níveis de HC em toda a faixa de carga, com uma diminuição média de 4,1% na superfície de resposta quando comparada ao uso exclusivo de biogás como combustível gasoso. Em uma comparação direta com o modo normal de operação a presença do biogás em modo dual demonstrou um efeito de aumento significativo na emissão de hidrocarbonetos não queimados, que pode ser mitigado pelo enriquecido com hidrogênio principalmente em operações com cargas elevadas.

As emissões de NO_x foram fortemente influenciadas pelo aumento da carga e pela elevação da temperatura da câmara de combustão, desta forma a incorporação de hidrogênio ao combustível gasoso resultou em um aumento médio de 26,6% nas emissões de NO_x em comparação ao modo dual sem hidrogênio. Contudo, em relação ao modo normal com diesel puro, a operação dual reduziu as emissões em 11,5% quando o combustível gasoso foi enriquecido com hidrogênio e em 33,3% quando operada exclusivamente com biogás, evidenciando o potencial de redução de emissões de NO_x do biogás. Adicionalmente, a variação na concentração de biodiesel

demonstrou um efeito não linear, com um aumento máximo de 4,5% nas emissões para composições de 22,5% no combustível líquido utilizado em modo dual.

Fica explícito no presente trabalho que o hidrogênio, mesmo em baixas concentrações e fluxos reduzidos, exerce um efeito expressivo sobre as emissões e o desempenho do sistema, indicando a possibilidade de um amplo espectro de concentrações e fluxos passíveis de investigação para otimização de sua aplicação. Consequentemente, investigações futuras devem explorar o emprego do modo dual com variações na concentração de hidrogênio, bem como dos fluxos de injeção do combustível gasoso, além da sua integração com outros combustíveis visando aprimorar o desempenho e reduzir as emissões.

Foram identificadas limitações no decorrer do estudo, destacando-se a dificuldade de produzir misturas gasosas de composição precisa, além de variações inerentes ao sistema experimental, decorrentes do emprego de um gerador para controle de cargas ao invés de um dinamômetro. Além disso, o uso de um carburador impôs restrições ao controle preciso do fluxo dos combustíveis gasosos, levando a crer que a implementação de um sistema de injeção eletrônica poderia proporcionar ao experimento ajustes dinâmicos com maior precisão, contribuindo para a otimização da estabilidade da combustão e a reprodutibilidade dos ensaios.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, A. **Anp - Painel dinâmico Produção de Biodiesel**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiOTIkODYyODctMGJjNS00MGIyLWJmMWIt NGJINDg0ZTg5NjBIIiwidCl6IjQ0OTImNGZmLTI0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2 FkYzkxMyJ9&pageName=ReportSection8aa0cee5b2b8a941e5e0%22>. Acesso em: 18 ago. 2024.

AHMAD, A.; YADAV, A. K.; HASAN, S. Enhanced production of methane enriched biogas through intensified co-digestion process and its effective utilization in a biodiesel/biohydrogen fueled engine with duel injection strategies: ML-RSM based an efficient optimization approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 65, p. 671–686, 2 maio 2024.

AHMAD, A.; YADAV, A. K.; SINGH, A. Process optimization of spirulina microalgae biodiesel synthesis using RSM coupled GA technique: a performance study of a biogas-powered dual-fuel engine. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 1, p. 169–188, 1 jan. 2024.

ALAYANDE, A. B. et al. Membrane and adsorption technologies for efficient hydrogen sulfide removal from biogas: A review focused on the advancement of key components. Process Safety and Environmental ProtectionInstitution of Chemical Engineers, , 1 jun. 2024.

AMIN, M. et al. Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. International Journal of Hydrogen EnergyElsevier Ltd, , 8 set. 2022.

ARYA, M.; KUMAR ROUT, A.; SAMANTA, S. A review on the effect of engine performance and emission characteristics of C.I. Engine using Diesel-Biodiesel-Additives fuel blend. **Materials Today: Proceedings**, v. 51, p. 2224–2232, 1 jan. 2022.

ATELGE, M. R. et al. A critical overview of the state-of-the-art methods for biogas purification and utilization processes. Sustainability (Switzerland)MDPI, , 1 out. 2021.

ATHAR, M.; ZAIDI, S. A review of the feedstocks, catalysts, and intensification techniques for sustainable biodiesel production. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 6, 1 dez. 2020.

AXON, C. J.; DARTON, R. C. A systematic evaluation of risk in bioenergy supply chains. **Sustainable Production and Consumption**, v. 47, p. 128–144, 1 jun. 2024.

BOMBO, K. et al. Review Open Access The Sustainability of Biodiesel Synthesis from Different Feedstocks: A ReviewPetroleum and Coal Pet Coal. [s.l: s.n.].

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo - SP: Blucher, 2009. v. 1

BOUGUESSA, R. et al. Experimental investigation on biogas enrichment with hydrogen for improving the combustion in diesel engine operating under dual fuel mode. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 15, p. 9052–9063, 18 mar. 2020.

BRANCO, M. G. Ficha Técnica Motor BD-6500 Branco Motores., 2024.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. 5 edição ed. São Paulo - SP: Blucher, 2017. v. volume 1

CALBRY-MUZYKA, A. et al. Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. **Renewable Energy**, v. 181, p. 1000–1007, 1 jan. 2022.

CALLEGARI, A. et al. Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 4, p. 384–436, 2020.

CAMILO, G. L. et al. Review of biodiesel production using various feedstocks and its purification through several methodologies, with a specific emphasis on dry washing. Journal of Industrial and Engineering ChemistryKorean Society of Industrial Engineering Chemistry, , 25 ago. 2024.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. sétima ed. Porto Alegre - RS: AMGH EDITORA LTDA, 2013. v. 1

COLLE, D. Avaliação de desempenho energético de um gerador elétrico operando no modo dual, utilizando biogás e blendas de biodiesel de óleo residual de fritura. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2018.

COSTA, J. M. et al. Environmental Aspects and Perspectives of the Brazilian Market for Biogas and Biomethane from Anaerobic Digestion: a Review. Bioenergy ResearchSpringer, , 1 mar. 2024.

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. International Journal of Hydrogen EnergyElsevier Ltd, , 7 fev. 2020.

DE LA FUENTE GARCIA PENA, V. M. et al. **A Review: Biodigesters and their use for the generation of clean energy**. 2022 IEEE International Conference on Engineering Veracruz, ICEV 2022. **Anais**...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022.

DE PAULA SOUSA, I. et al. Study of internal and external temperatures and their influence on covered lagoon digester performance. **Biomass and Bioenergy**, v. 159, 1 abr. 2022.

DE SOUZA, T. A. Z. et al. Biodiesel in South American countries: A review on policies, stages of development and imminent competition with hydrotreated vegetable oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 153, 1 jan. 2022.

DEHERI, C. et al. A review on performance of biogas and hydrogen on diesel engine in dual fuel mode. FuelElsevier Ltd, , 15 jan. 2020.

DEVALE, R. R.; MAHAJAN, Y. S. Transesterification reactions as a means to produce esters: A critical review. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, 2024.

DHANYA, B. S. et al. Development of sustainable approaches for converting the organic waste to bioenergy. **Science of the Total Environment**, v. 723, 25 jun. 2020.

DJAMARI, D. W. et al. **Diesel Spray: Development of Spray in Diesel Engine**. **Sustainability (Switzerland)**MDPI, , 1 dez. 2022.

ELKELAWY, M. et al. A comprehensive review on the effects of diesel/biofuel blends with nanofluid additives on compression ignition engine by response surface methodology. **Energy Conversion and Management: X**, v. 14, 1 maio 2022.

Especificação do biodiesel — Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel). Acesso em: 21 ago. 2024.

FAN, L.; TU, Z.; CHAN, S. H. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. Energy Reports Elsevier Ltd, , 1 nov. 2021.

FAROUK, S. M. et al. Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: a comprehensive review. Environmental Science and Pollution ResearchSpringer, , 1 fev. 2024.

GARCILASSO, V. P.; FERRAZ JUNIOR, A. D. N. Biogás. Em: COELHO, S. T.; IEE INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO; ASSUMPÇÃO, I. (Eds.). **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. 1. ed. São Paulo: Synergia Editora, 2018. v. 1p. 1–79.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. Barueri-SP: Atlas, 2023. v. 1

GOGA, G. et al. Combined impact of varying biogas mass flow rate and rice bran methyl esters blended with diesel on a dual-fuel engine. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 43, n. 1, p. 120–132, 2021.

GUPTA, P.; KURIEN, C.; MITTAL, M. Biogas (a promising bioenergy source): A critical review on the potential of biogas as a sustainable energy source for gaseous fuelled spark ignition engines. International Journal of Hydrogen EnergyElsevier Ltd, , 8 mar. 2023.

HASAN, M. M.; RAHMAN, M. M. Performance and emission characteristics of biodiesel-diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review. Renewable and Sustainable Energy ReviewsElsevier Ltd, , 1 jan. 2017.

HASAN, M. R. et al. Converting biowaste into sustainable bioenergy through various processes. Bioresource Technology Reports Elsevier Ltd, , 1 set. 2023.

HOSSEINI, S. H. et al. Use of hydrogen in dual-fuel diesel engines. Progress in Energy and Combustion ScienceElsevier Ltd, , 1 set. 2023.

IMAMOTO, T.; KAWAHARA, N.; TOMITA, E. PREMIER combustion characteristics of a pilot fuel-ignited dual-fuel biogas engine with consideration of cycle-to-cycle variations. **Fuel**, v. 314, 15 abr. 2022.

ISHAQ, H.; DINCER, I.; CRAWFORD, C. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 62, p. 26238–26264, 22 jul. 2022.

JONEK-KOWALSKA, I. Assessing the energy security of European countries in the resource and economic context. **Oeconomia Copernicana**, v. 13, n. 2, p. 301–334, 2022.

KASIH TELAUMBANUA, I. et al. Determination of the optimum biogas energy ratio in dual-fuel biodiesel used in cooking oil-biogas operation. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 45, n. 4, p. 13001–13020, 2023.

KOUGIAS, P. G.; ANGELIDAKI, I. Biogas and its opportunities—A review. **Frontiers** of Environmental Science and Engineering, v. 12, n. 3, 1 jun. 2018.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 1. ed. Concórdia, SC: Embrapa suínos e aves, 2019. v. 1

LI, F. et al. **Towards a Future Hydrogen Supply Chain: A Review of Technologies and Challenges. Sustainability (Switzerland)** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 mar. 2024.

MARADINI, P. DA S. et al. THERMAL EXCHANGES IN A COVERED LAGOON BIODIGESTER TREATING PIG FARM EFFLUENT HEATED BY SOLAR ENERGY. **Engenharia Agricola**, v. 43, n. Speciallssue, 2023.

MESSER, G. F. L. Ficha de informações de segurança de produtos químicos. [s.l: s.n.].

MIGNOGNA, D. et al. **Production of Biogas and Biomethane as Renewable Energy Sources: A Review**. **Applied Sciences (Switzerland)**Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 set. 2023. MIRHASHEMI, F. S.; SADRNIA, H. **NOX emissions of compression ignition** engines fueled with various biodiesel blends: A review. Journal of the Energy InstituteElsevier B.V., , 1 fev. 2020.

MOHIDDIN, M. N. BIN et al. Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review. Journal of Industrial and Engineering ChemistryKorean Society of Industrial Engineering Chemistry, , 25 jun. 2021.

MOHITE, A. et al. Performance enhancement and emission control through adjustment of operating parameters of a biogas-biodiesel dual fuel diesel engine: An experimental and statistical study with biogas as a hydrogen carrier. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 52, p. 752–764, 2 jan. 2024.

MUHAMMED, N. S. et al. Hydrogen production, transportation, utilization, and storage: Recent advances towards sustainable energy. Journal of Energy StorageElsevier Ltd, , 20 dez. 2023.

MUHSSEN, H. S.; ZÖLDY, M.; BERECZKY, Á. **A Comprehensive Review on the Hydrogen–Natural Gas–Diesel Tri-Fuel Engine Exhaust Emissions**. **Energies**Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 ago. 2024.

MURUGESAN, P. et al. Role of hydrogen in improving performance and emission characteristics of homogeneous charge compression ignition engine fueled with graphite oxide nanoparticle-added microalgae biodiesel/diesel blends. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 88, p. 37617–37634, 30 out. 2022.

NGUYEN, L. N. et al. Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. Science of the Total EnvironmentElsevier B.V., , 15 abr. 2021.

NGUYEN, V. N. et al. **Performance and emission characteristics of diesel** engines running on gaseous fuels in dual-fuel mode. International Journal of Hydrogen EnergyElsevier Ltd, , 2 jan. 2024.

OISHI, Y. et al. Performance, rate of heat release, and combustion stability of dualfuel mode in a small diesel engine. **Energy Science and Engineering**, v. 7, n. 4, p. 1333–1351, 2019.

OLABI, A. G.; MAIZAK, D.; WILBERFORCE, T. Review of the regulations and techniques to eliminate toxic emissions from diesel engine cars. **Science of the Total Environment**, v. 748, 15 dez. 2020.

OLIVEIRA, L. G. et al. **Updates on biogas enrichment and purification methods: A review. Canadian Journal of Chemical Engineering**John Wiley and Sons Inc, , 1 maio 2023.

ONI, B. A. et al. Investigating the emissions and performance of hydrogen enrichedbiogas-Parinari polyandra biodiesel in a direct injection (DI) engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 69, p. 29945–29955, 12 ago. 2022.

ORBEN, J. M. C. **Potencial de geração e emissões em motor gerador utilizando diesel e biodiesel de canola e soja**. Cascavel - PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2024.

ORMOND, N. et al. Production of Sustainable Liquid Fuels. **Energies**, v. 17, n. 14, p. 3506, 17 jul. 2024.

OSMAN, A. I. et al. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. Environmental Chemistry LettersSpringer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 fev. 2022.

PALANI, Y. et al. **Performance and emission characteristics of biodiesel-blend in diesel engine: A review. Environmental Engineering Research**Korean Society of Environmental Engineers, , 1 fev. 2022.

PARDO CUERVO, O. H.; ROSAS, C. A.; ROMANELLI, G. P. Valorization of residual lignocellulosic biomass in South America: a review. Environmental Science and Pollution ResearchSpringer, 1 jul. 2024.

PEREZ-SANZ, F. J. et al. First experimental comparison of calorific value measurements of real biogas with reference and field calorimeters subjected to different standard methods. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 135, p. 72–82, 1 jan. 2019.

QIAN, Y. et al. **Review of the state-of-the-art of biogas combustion mechanisms and applications in internal combustion engines**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**Elsevier Ltd, , 1 mar. 2017.

RATNAKAR, R. R. et al. Hydrogen supply chain and challenges in large-scale LH2 storage and transportation. International Journal of Hydrogen EnergyElsevier Ltd, , 9 jul. 2021.

REY, J. R. C. et al. Renewable Hydrogen from Biomass: Technological Pathways and Economic Perspectives. **Energies**, v. 17, n. 14, p. 3530, 18 jul. 2024.

RUATPUIA, J. V. L. et al. Jatropha curcas oil a potential feedstock for biodiesel production: A critical review. FuelElsevier Ltd, , 15 ago. 2024.

SAGAR, S. M. V.; AGARWAL, A. K. Experimental validation of accuracy of dynamic hydrogen-compressed natural gas mixing system using a single cylinder spark ignition engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 32, p. 14272–14282, 24 ago. 2016.

SAHOO, B. B.; SAHOO, N.; SAHA, U. K. Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines-A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ago. 2009.

SARIDEMIR, S.; POLAT, F.; AĞBULUT, Ü. Improvement of worsened diesel and waste biodiesel fuelled-engine characteristics with hydrogen enrichment: A deep discussion on combustion, performance, and emission analyses. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 184, p. 637–649, 1 abr. 2024.

SHARMA, A. et al. Effect of biogas on the performance and emissions of diesel engine fuelled with biodiesel-ethanol blends through response surface methodology approach. **Renewable Energy**, v. 141, p. 657–668, 1 out. 2019.

SILVA VOLPATO, C. E. et al. **DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL QUATRO TEMPOSALIMENTADO COM BIODIESEL DE ÓLEO DE SOJA (B 100) Performance of four stroke diesel cycle engine supplied with soybean oil biodiesel (B 100)**. [s.l: s.n.].

SIMSEK, S.; USLU, S. Investigation of the effects of biodiesel/2-ethylhexyl nitrate (EHN) fuel blends on diesel engine performance and emissions by response surface methodology (RSM). **Fuel**, v. 275, 1 set. 2020.

SINGH, A. K. et al. Sustainable Utilization of Biowaste Resources for Biogas **Production to Meet Rural Bioenergy Requirements**. Energies Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 jul. 2023.

SINGH, D. et al. A Comprehensive Review on 1st-Generation Biodiesel Feedstock Palm Oil: Production, Engine Performance, and Exhaust Emissions. Bioenergy ResearchSpringer, , 1 mar. 2021.

SINGH, Y. et al. Optimization of diesel engine performance and emission parameters employing cassia tora methyl esters-response surface methodology approach. **Energy**, v. 168, p. 909–918, 1 fev. 2019.

SINIGAGLIA, T. et al. **Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review**. **International Journal of Hydrogen Energy**Elsevier Ltd, , 28 set. 2017.

SRIKUMAR, K. et al. A review on the environmental life cycle assessment of biodiesel production: Selection of catalyst and oil feedstock. Biomass and BioenergyElsevier Ltd, , 1 jun. 2024.

TIBURCIO, R. S.; MACÊDO, T. R. DE; NETO, A. M. P. Brazilian Biofuels Policy (RenovaBio): Overview and generation of decarbonization credits by biodiesel production facilities. **Energy for Sustainable Development**, v. 77, 1 dez. 2023.

TSHIKOVHI, A.; MOTAUNG, T. E. **Technologies and Innovations for Biomass Energy Production**. **Sustainability (Switzerland)**Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 ago. 2023.

VASAN, V. et al. **Biogas production and its utilization in internal combustion engines - A review**. **Process Safety and Environmental Protection**Institution of Chemical Engineers, , 1 jun. 2024. VEGA, L. P. et al. **Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia**. **Energy Reports**Elsevier Ltd, , 1 jun. 2024.

VEZA, I. et al. Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition. Results in EngineeringElsevier B.V., , 1 jun. 2023.

WADI, R. M.; KHALIFA, S. A. A Review of Biogas Production from Small-Scale Anaerobic Digestion Plants. Journal of Engineering and Sustainable DevelopmentMustansiriyah University College of Engineering, , 1 jul. 2024.

WAN OSMAN, W. N. A. et al. Comparative review of biodiesel production and purification. Carbon Capture Science and TechnologyElsevier Ltd, , 1 dez. 2024.

YANG, Z. X. et al. **2022 roadmap on hydrogen energy from production to utilizations**. **Rare Metals**Springer, , 1 out. 2022.

ZHANG, L. et al. A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies. **Fuel**, v. 355, 1 jan. 2024.

ZHENG, X.; LI, R. Critical Review on Two-Stage Anaerobic Digestion with H2 and CH4 Production from Various Wastes. Water (Switzerland)Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 jun. 2024.