

CENTRO PAULA SOUZA
FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Mecânica Automobilística

Allannys Rodrigues Dias de Oliveira

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO, CONSUMO E EMISSÕES DE
MISTURAS DIESEL-BIODIESEL EM MOTORES CICLO DIESEL**

Santo André

2026

Allannys Rodrigues Dias de Oliveira

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO, CONSUMO E EMISSÕES DE
MISTURAS DIESEL-BIODIESEL EM MOTORES CICLO DIESEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Tecnologia em Mecânica
Automobilística pelo Prof. Dr. Eliel
Wellington Marcelino como requisito parcial
para obtenção do título de Tecnólogo em
Mecânica Automobilística.

Santo André

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

O482a

Oliveira, Allannys Rodrigues Dias de
Avaliação do desempenho, consumo e emissões de misturas diesel-biodiesel em motores ciclo diesel / Allannys Rodrigues Dias de Oliveira - Santo André, 2026. – 69f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística, 2026.

Orientador: Prof. Eliel Wellington Marcelino

1. Mecânica. 2. Veículos. 3. Motores ciclo diesel. 4. Tecnologia. 5. Biodiesel. 6. Mistura. 7. Consumo. 8. Desempenho. I. Avaliação do desempenho, consumo e emissões de misturas diesel-biodiesel em motores ciclo diesel.

662.6

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 17 de junho de 2026.

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:
“AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO, CONSUMO E EMISSÕES DE
MISTURAS DIESEL-BIODIESEL EM MOTORES DE CICLO
DIESEL” DO ALUNO DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. FERNANDO GARUP DALBO _____

MEMBROS:

PROF. ADRIANO RIBOLLA _____

PROF. PRISCILLA IASTREMSKI _____

ALUNO:

ALLANNYS RODRIGUES DIAS DE OLIVEIRA _____

Dedico o presente trabalho à minha mãe,
irmão e gatos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha mãe, Valdivia, e ao meu irmão, Alison, pelo apoio, por não desistirem de mim e por acreditarem na minha capacidade e potencial em momentos extremamente difíceis. Agradeço aos meus gatos, Atena e Anakin, por terem dado um novo sentido à minha vida. Agradeço à minha psicóloga, Patrícia, por me ouvir e por me acolher. Agradeço, também, à minha amiga Giovanna, pelas risadas no trabalho, e ao meu amigo Jonas, por tornar o dia a dia na faculdade mais leve. Além disso, agradeço a todos os professores da instituição, por edificarem o meu conhecimento.

“Hope is a dangerous thing for a woman
like me to have - but I have it.”

Lana Del Rey

RESUMO

Com este trabalho, buscou-se analisar o impacto resultante da adição de biodiesel ao diesel mineral em um motor ciclo Diesel, verificando, por meio do comportamento das misturas, a viabilidade de uso desse biocombustível. Para isso, realizou-se uma revisão de literatura, na qual dados de seis ensaios experimentais foram comparados entre si, levando em consideração suas características e especificações, bem como as discussões e justificativas apresentadas pelos autores acerca dos resultados obtidos. Complementarmente, aplicou-se a técnica estatística de regressão linear simples em quatro trabalhos com dados quantitativos comparáveis, com o fim de identificar possíveis tendências de comportamento. Os dados priorizados para a realização de ambas as análises foram torque, potência, consumo de combustível e nível de emissão de poluentes de motores diesel abastecidos com diesel mineral (B0), biodiesel puro (B100) e misturas diesel-biodiesel em diferentes proporções (B2, B5, B10, B20, B40, B50, B60, B75). Os resultados revelaram que as propriedades físico-químicas do biodiesel influenciam significativamente a variação dos parâmetros analisados, principalmente o desempenho, que se mostrou mais suscetível às variações decorrentes do motor utilizado, das condições operacionais e diferentes finalidades do ensaio. Em contrapartida, o consumo de combustível e as emissões apresentaram tendências mais definidas de aumento e redução, respectivamente, conforme o aumento da proporção de biodiesel na mistura. A realização do estudo evidenciou a necessidade da determinação do teor de biodiesel mais equilibrado e vantajoso para cada aplicação, visto que, apesar da expressiva redução de poluentes promovida, o biodiesel puro ainda apresenta o pior desempenho. Conclui-se, portanto, que a inclusão do biodiesel no diesel comercializado é segura e factível, desde que respeitados os limites adequados de concentração, a fim de evitar prejuízos à operação do motor e assegurar benefícios ambientais.

Palavras-chave: Motor diesel. Misturas diesel-biodiesel. Desempenho. Consumo de combustível. Emissões.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the impact of adding biodiesel to mineral diesel in a Diesel-cycle engine, verifying, through the behavior of the mixtures, the viability of using this biofuel. To this end, a literature review was conducted, in which data from six experimental trials were compared, considering their characteristics and specifications, as well as the discussions and justifications presented by the authors regarding the results obtained. Additionally, the statistical technique of simple linear regression was applied to four studies with comparable quantitative data, in order to identify possible behavioral trends. The data prioritized for both analyses were torque, power, fuel consumption, and pollutant emission levels of diesel engines fueled with mineral diesel (B0), pure biodiesel (B100), and diesel-biodiesel mixtures in different proportions (B2, B5, B10, B20, B40, B50, B60, B75). The results revealed that the physicochemical properties of biodiesel significantly influence the variation of the analyzed parameters, mainly performance, which proved to be more susceptible to variations resulting from the engine used, the operating conditions, and the different purposes of the test. Conversely, fuel consumption and emissions showed more defined trends of increase and decrease, respectively, according to the increase in the proportion of biodiesel in the mixture. The study highlighted the need to determine the most balanced and advantageous biodiesel content for each application, since, despite the significant reduction in pollutants promoted, pure biodiesel still presents the worst performance. It is concluded, therefore, that the inclusion of biodiesel in commercially sold diesel is safe and feasible, provided that the appropriate concentration limits are respected in order to avoid damage to engine operation and ensure environmental benefits.

Keywords: Diesel engine. Diesel-biodiesel Blends. Performance. Fuel consumption. Emissions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama das Etapas Metodológicas.-----	20
Figura 2 - Variação de potência máxima e torque máximo em função do teor de biodiesel.-----	55
Figura 3 - Variação de potência x torque médios, consumo específico médio e índice de fumaça médio em função do teor de biodiesel.-----	56
Figura 4 - Variação de potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.-----	57
Figura 5 - Variação das emissões de CO ₂ , HC e NO _x em função do teor de biodiesel.-----	58
Figura 6 - Variação de potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.-----	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características dos Estudos Analisados.-----	26
Quadro 2 - Potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.-----	29
Quadro 3 - Potência máxima e torque máximo em função do teor de biodiesel.-----	33
Quadro 4 - Potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.-----	41
Quadro 5 - Emissões de CO ₂ , HC e NO _x em função do teor de biodiesel.-----	41
Quadro 6 - Variação percentual de potência x torque médios em função do teor de biodiesel de soja.-----	43
Quadro 7 - Variação percentual de potência x torque médios em função do teor de biodiesel de mamona.-----	44
Quadro 8 - Variação percentual de potência x torque médios em função do teor de biodiesel de dendê.-----	44
Quadro 9 - Variação percentual do consumo específico de combustível médio em função do teor de biodiesel de soja.-----	45
Quadro 10 - Variação percentual do consumo específico de combustível médio em função do teor de biodiesel de mamona.-----	46
Quadro 11 - Variação percentual do consumo específico de combustível médio em função do teor de biodiesel de dendê.-----	46
Quadro 12 - Variação percentual do índice de fumaça médio em função do teor de biodiesel de soja.-----	47
Quadro 13 - Variação percentual do índice de fumaça médio em função do teor de biodiesel de mamona.-----	47
Quadro 14 - Variação percentual do índice de fumaça médio em função do teor de biodiesel de dendê.-----	48
Quadro 15 - Variação de potência e torque máximos em função do teor de biodiesel.-----	51
Quadro 16 - Variação de potência x torque, consumo específico de combustível e índice de fumaça médios em função do teor de biodiesel.-----	52
Quadro 17 - Variação de potência e torque máximos e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.-----	53
Quadro 19 - Variação de potência e torque máximos e consumo específico mínimo de combustível em função do teor de biodiesel.-----	54
Quadro 20 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) da potência máxima e torque máximo em função do teor de biodiesel.-----	55
Quadro 21 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) da potência x torque médios, consumo específico médio e índice de fumaça médio.-----	56
Quadro 22 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) da potência máxima e torque máximo em função do teor de biodiesel.-----	57
Quadro 23 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) das emissões de CO ₂ , HC e NO _x em função do teor de biodiesel.-----	58
Quadro 24 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) da potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo.-----	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BEN – Balanço Energético Nacional

B0 – Diesel mineral puro

B2 - Mistura diesel-biodiesel (98% diesel, 2% biodiesel)

B5 – Mistura diesel-biodiesel (95% diesel, 5% biodiesel)

B10 – Mistura diesel-biodiesel (90% diesel, 10% biodiesel)

B20 - Mistura diesel-biodiesel (80% diesel, 20% biodiesel)

B40 - Mistura diesel-biodiesel (60% diesel, 40% biodiesel)

B50 – Mistura diesel-biodiesel (50% diesel, 50% biodiesel)

B60 - Mistura diesel-biodiesel (40% diesel, 60% biodiesel)

B75 – Mistura diesel-biodiesel (25% diesel, 75% biodiesel)

B100 – Biodiesel puro

BMEP – Pressão média efetiva do freio

BSFC – Consumo específico de combustível

BTE – Eficiência térmica do freio

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

Conab – Companhia Nacional de Abastecimento

E10 – Mistura diesel-etanol (90% diesel, 10% etanol)

E15 – Mistura diesel-etanol (85% diesel, 15% etanol)

E15B – Mistura diesel-etanol-biodiesel (80% diesel, 5% biodiesel e 15% etanol)

HC – Hidrocarbonetos

ISO – Organização Internacional de Normalização

NO_x – Óxido(s) de nitrogênio

PNPB – Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

S10 – Diesel com 10 ppm de enxofre

SO₂ – Dióxido de enxofre

THC – Hidrocarbonetos totais

TIR – Taxa interna de retorno

LISTA DE SÍMBOLOS

β_0 – Intercepto da reta (regressão linear)

β_1 – Coeficiente angular da reta

CV – Coeficiente de variação

ε – Erro aleatório

F – Estatística F (ANOVA/regressão)

g/kWh – Grama por quilowatt-hora

k – Fator ar-combustível

kg/h – Quilograma por hora

kW – Quilowatt

n – Tamanho amostral

Nm – Newton-metro

ppm – Partes por milhão

r – Coeficiente de correlação de Pearson

R^2 – Coeficiente de determinação

rpm – Rotações por minuto

s – Desvio padrão

s^2 – Variância

t – Estatística t do teste t de Student

x – Variável independente

$\bar{X}$ – Média aritmética

y – Variável dependente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Conceitualização e características do biodiesel	15
1.2 Justificativa	16
1.3 Objetivo	17
1.4 Estrutura	18
2. METODOLOGIA	18
2.1 Procedimentos metodológicos	19
2.1.1 Descrição das etapas da metodologia	20
2.1.2 Técnicas de análise estatística	21
2.1.2.1 Estatística descritiva	21
2.1.2.2 Teste t de Student	22
2.1.2.3 Análise de Variância (ANOVA)	22
2.1.2.4 Correlação de Pearson	23
2.1.2.5 Regressão Linear Simples	24
3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS ESTUDOS REVISADOS	25
3.1 Estudos sobre o desempenho de motores diesel com misturas diesel-biodiesel	27
3.2 Estudo sobre a eficiência térmica, combustão e emissões	33
3.3 Estudo sobre a viabilidade econômica e aplicações práticas do biodiesel	38
3.4 Estudo com revisão integrada e análise comparativa de desempenho, consumo e emissões	41
4. APLICAÇÃO DA REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	49
4.1 Organização dos dados	50
4.1.1 Estudo de Aguiar et al. (2016)	51
4.1.2 Estudo de Brunelli (2009)	52
4.1.3 Estudo de Castellaneli (2015)	52
4.1.4 Estudo de Castellaneli et al. (2008)	53
4.2 Resultados	54
4.3 Discussão da análise estatística	60
5. DISCUSSÃO INTEGRADA	62
6. CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

A fim de facilitar a compreensão do documento, a seção destina-se não só à explanação da estrutura, como também à especificação do objetivo do trabalho, bem como a motivação que conduziu a sua realização, oferecendo a devida contextualização prévia do uso de biocombustíveis no Brasil, juntamente da conceitualização do biodiesel, com descrições relacionadas a algumas de suas principais características.

1.1 Conceitualização e características do biodiesel

Uma vez que o trabalho destina-se à avaliação da aplicabilidade de misturas diesel-biodiesel em motores ciclo Diesel, faz-se necessária a exposição de algumas informações relevantes sobre o biodiesel. Dito isto, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025) o define como um combustível renovável, resultante de um processo químico denominado transesterificação, no qual triglicerídeos (óleos vegetais ou gordura animal) e álcool (etanol ou metanol), na presença de um catalisador, são reagidos. Como resultado, obtêm-se ésteres (biodiesel) e glicerol, sendo o último um subproduto da reação química.

Segundo destaca Barbosa et al. (2008), o biodiesel possui reduzido teor de enxofre e compostos aromáticos em sua composição. Além disso, também apresenta alto número de cetano. A combinação destes fatores o torna, comparativamente a combustíveis fósseis como o diesel mineral, ambientalmente mais limpo e menos prejudicial à saúde.

Agora, no tocante ao efeito exercido pelo biodiesel na performance de motores ciclo Diesel, estudos como os desenvolvidos por Castellanelli (2015) e Castellanelli et al. (2008) evidenciam que o comportamento do torque e da potência tende a ser não linear, sendo influenciado por diferentes fatores, tais como a rotação do motor e fenômenos físico-químicos associados ao processo de combustão.

As limitações de uso do biodiesel relacionam-se principalmente a características como alta viscosidade e baixo poder calorífico, os quais podem afetar o desempenho do motor negativamente, ao passo em que provocam aumento no consumo de combustível. Como exemplo, cita-se o ensaio experimental conduzido por Castellanelli et al. (2008), cujos resultados evidenciaram um aumento de 14,75% de consumo específico de combustível ao empregar o biodiesel puro, tomando o óleo diesel como referência. Ademais, em todas as

faixas de rotação, a literatura consultada evidencia que, em comparação ao óleo diesel, o biodiesel puro apresenta os piores valores de torque e potência.

1.2 Justificativa

Nas últimas décadas, ocorreu uma significativa expansão da frota veicular, devido ao aumento da necessidade de deslocamento das pessoas, principalmente em grandes centros urbanos. Paralelamente, diante da iminente escassez de fontes fósseis e da crescente preocupação com a poluição gerada em decorrência do uso de combustíveis não renováveis, a busca por novas alternativas energéticas se intensificou. Nesse contexto, os biocombustíveis vêm sendo cada vez mais explorados, em virtude dos benefícios proporcionados aos âmbitos ambiental, social e econômico.

Considerando isso, cresceu a demanda global por oleaginosas tais como a soja, por ser essa uma das matérias-primas mais utilizadas na produção de biocombustíveis. Nesse cenário, o Brasil ocupa posição de destaque, mantendo-se, segundo levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) em 2025, como um dos maiores produtores mundiais de soja.

Contudo, a soja não é a única matéria-prima que pode ser utilizada no beneficiamento de biocombustíveis como o biodiesel. Nesse sentido, o Brasil mais uma vez ocupa posição favorável, devido à abundância e diversidade de seu território, visto que, para além da soja, há ainda diversos recursos vegetais disponíveis que podem ser processados, tais como milho, girassol, amendoim, algodão, canola, mamona, babaçu, palma (dendê) e macaúba. Além disso, a gordura animal também pode ser aproveitada. De acordo com Honório (2024), os biocombustíveis apresentam um enorme potencial de desenvolvimento, uma vez que podem ser produzidos a partir de recursos de menor custo, como o óleo de fritura. Além disso, pesquisas voltadas ao processamento de biomassa extraída de algas e microalgas também vêm se expandindo.

Portanto, em virtude da ampla disponibilidade de terras agricultáveis, clima favorável e, historicamente, grande capacidade e experiência na produção de combustíveis renováveis, o Brasil mantém-se como referência global em termos de energia renovável, posição que é sustentada por diversas políticas.

Para corroborar a afirmação, faz-se necessária a exposição de alguns dados. Primeiramente, tem-se que a matriz elétrica brasileira obteve, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2025, uma significativa participação de 88,2% de fontes

renováveis. Isso é apoiado por medidas adotadas pelo governo federal, dentre elas a criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), responsável por regularizar legalmente a produção e comercialização do biodiesel. Ademais, a política de mistura obrigatória de biodiesel ao diesel mineral vem sendo progressivamente ampliada no país. Em agosto de 2025, entrou em vigor em todo o território nacional a mistura B15, correspondente à adição de 15% de biodiesel ao diesel fóssil, reforçando o compromisso brasileiro com a transição energética e a ampliação do uso de combustíveis renováveis (BRASIL, 2025).

Em razão da ampliação do uso de biodiesel, faz-se necessária a análise de seu impacto em motores ciclo Diesel, considerando os parâmetros de desempenho, consumo de combustível e comportamento das emissões, os quais tendem a variar conforme o teor da mistura e as condições de operação. Afinal, para que o biodiesel seja aplicável, tem de se considerar não só a redução de emissões de poluentes proporcionadas pelo biocombustível, mas também seus efeitos sobre o funcionamento do motor. Logo, torna-se relevante investigar as particularidades do biodiesel em distintos contextos, bem como o comportamento de diferentes proporções de mistura no motor, para que se chegue a uma conclusão acerca da viabilidade de uso deste biocombustível e da proporção mais adequada à aplicação desejada.

1.3 Objetivo

O estudo tem como objetivo organizar, analisar e comparar dados experimentais obtidos em ensaios e descritos em literaturas técnicas, artigos e dissertações, selecionados segundo critérios pré-estabelecidos, tendo como foco a análise de parâmetros referentes ao consumo de combustível, desempenho e emissões de um motor ciclo Diesel, tomando o diesel mineral como combustível de referência.

Procura-se, através disso, entender de que forma o funcionamento do motor é afetado, em função da porcentagem de biodiesel adicionado ao óleo diesel convencional. Para isso, são consideradas as propriedades e características físico-químicas do biodiesel e a análise estatística de estudos com dados quantitativos comparáveis, com o fim de identificar possíveis tendências de comportamento.

1.4 Estrutura

A seguir, encontram-se as diferentes seções que compõem o trabalho, juntamente de suas respectivas descrições, visando a melhor organização das informações que serão expostas e discutidas adiante. O trabalho é construído da seguinte forma:

1. Metodologia, na qual são descritas as ferramentas utilizadas para elaborar o trabalho;
2. Análise Comparativa dos Estudos Revisados, contendo a síntese dos estudos selecionados, com a exposição de dados relevantes, incluindo diferentes interpretações e justificativas acerca dos resultados obtidos pelos autores em seus ensaios;
3. Aplicação da Regressão Linear Simples, onde são gerados gráficos de dispersão com linhas de tendência, equações da reta e coeficientes de determinação, a partir das variações percentuais dos parâmetros de potência, torque, consumo de combustível e emissões em relação ao diesel;
4. Discussão Integrada, na qual a análise qualitativa entre estudos alia-se à análise estatística, a fim de quantificar o grau de influência do teor de biodiesel sobre os parâmetros considerados, com o devido embasamento interpretativo;
5. Conclusão, em que os principais resultados e pontos discutidos ao longo do trabalho são sintetizados, evidenciando a viabilidade e particularidades da utilização do biodiesel em motores ciclo Diesel.

2. METODOLOGIA

O trabalho faz uso de uma abordagem metodológica qualitativo-quantitativa, por não realizar ensaios laboratoriais próprios, baseada na revisão e análise comparativa de dados adquiridos através de ensaios experimentais, e seu posterior tratamento estatístico, quando aplicável. A presente seção destina-se à explanação de como ambas as análises foram realizadas, especificando os procedimentos metodológicos e as ferramentas utilizadas para a obtenção de dados. Há, ainda, a descrição de algumas técnicas estatísticas para que, a partir de suas características, seja justificada a escolha da aplicação da regressão linear simples, utilizada, para os fins deste trabalho, como uma ferramenta indicadora de possíveis tendências de comportamento da mistura.

2.1 Procedimentos metodológicos

O desenvolvimento do trabalho incluiu, primeiramente, a etapa da revisão de literatura, onde foram escolhidos estudos publicados em artigos científicos, relatórios técnicos e dissertações, dando prioridade àqueles que incluíssem dados claros referentes ao desempenho energético e emissões em motores diesel. Os trabalhos pesquisados estão compreendidos entre os anos de 2008 e 2016, e foram produzidos, em sua maioria, no Brasil. Foram incluídos somente aqueles que estivessem nos idiomas português ou inglês.

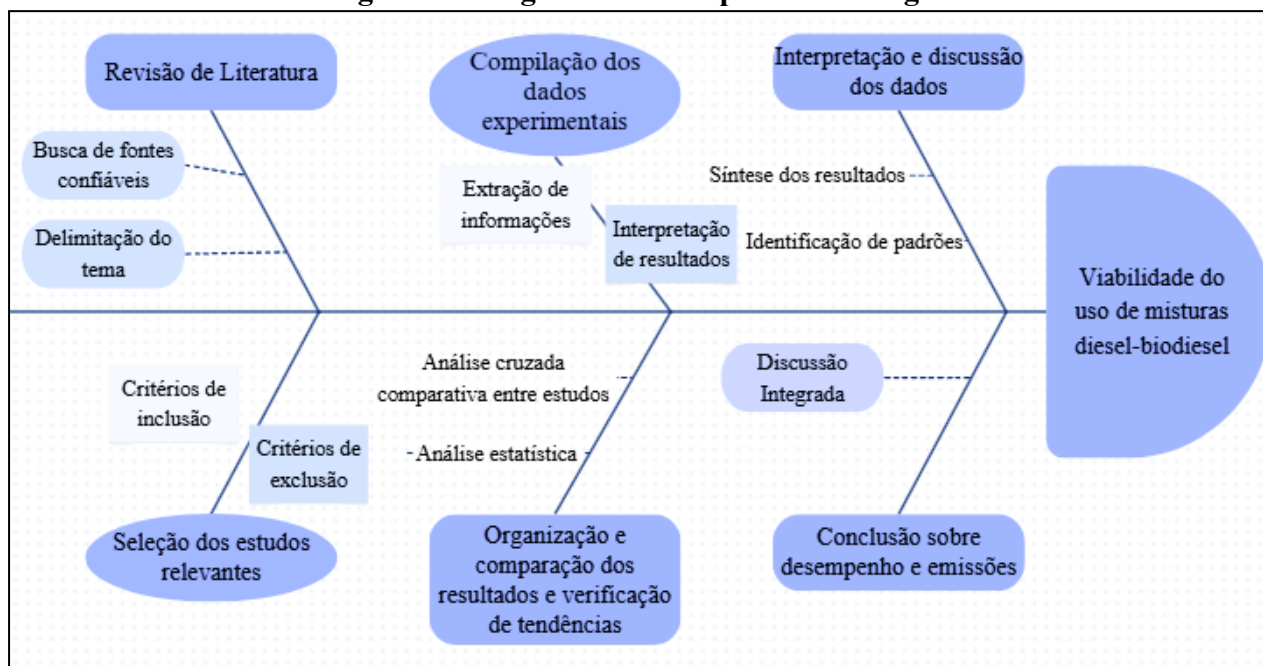
As fontes foram selecionadas em bases acadêmicas como Scielo, Google Acadêmico e periódicos especializados nas áreas de tecnologia automotiva e combustíveis alternativos. As palavras-chave utilizadas foram: “biodiesel”, “misturas diesel-biodiesel”, “desempenho comparativo de um motor ciclo Diesel”, “avaliação das emissões de poluentes em motores ciclo Diesel”. Em inglês, foram utilizados os descritores “*diesel-biodiesel blends*”, “*biodiesel*” e “*comparative performance of a diesel cycle engine*”.

Como critério de seleção, foram escolhidos estudos conduzidos segundo normas técnicas que testassem misturas padronizadas (B2, B5, B10, B20, B50, B60, B75), e diesel e biodiesel puros. Deu-se prioridade àqueles que contivessem dados de torque, potência, consumo de combustível e emissões (CO, CO₂, NO_x, HC e fumaça), com profundidade interpretativa acerca dos resultados obtidos, relacionando-os às propriedades e particularidades do biocombustível em questão. Os dados quantitativos foram extraídos de quadros e textos descritivos, e observou-se, também, gráficos de curva.

2.1.1 Descrição das etapas da metodologia

Visando a clareza e organização das etapas metodológicas do trabalho, a Figura 1 apresenta um diagrama elaborado pela ferramenta de *design* gráfico denominada Canva, conhecido como diagrama de Ishikawa ou diagrama espinha de peixe.

Figura 1 - Diagrama das Etapas Metodológicas.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Primeiramente, a etapa de revisão de literatura consistiu na busca e seleção de fontes confiáveis que dispusessem de dados relacionados ao desempenho, consumo e emissões de motores ciclo Diesel, fazendo uso de misturas diesel-biodiesel. Além disso, também foram consultados relatórios da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e publicações governamentais sobre a matriz energética brasileira, a fim de conceitualizar o biodiesel. Em suma, o objetivo dessa etapa inicial foi reunir os dados relevantes, necessários para a posterior análise comparativa e estatística.

Após a seleção dos estudos, realizou-se um resumo de cada trabalho, priorizando os resultados obtidos pelos diferentes autores e pontos de discussão. Procurou-se, através disso, comparar os diferentes estudos.

Para realizar a análise estatística, alguns critérios de exclusão foram adotados, e efetuou-se a padronização dos dados, convertendo-os em variações percentuais, tomando o diesel mineral como combustível de referência. A técnica de regressão linear simples

possibilitou a geração de gráficos de dispersão, linhas de tendência, equações da reta e coeficiente de determinação (R^2), e sua aplicação permitiu quantificar o grau de influência da proporção de biodiesel exercido nas variáveis consideradas, destacando as possíveis divergências entre resultados e limitações do modelo linear.

Por fim, foi realizada a discussão integrada, aliando a análise cruzada entre estudos à estatística, para que os resultados obtidos pudessem ser interpretados de forma adequada.

2.1.2 Técnicas de análise estatística

De acordo com Bussab e Morettin (2017), a estatística pode ser compreendida como um conjunto de métodos para interpretar e processar dados, com a finalidade de produzir informações relevantes, que possibilitem a orientação da tomada de decisões. Por isso, a análise estatística é empregada em pesquisas que envolvam dados quantitativos, uma vez que possibilita a realização de conclusões assertivas com base nos resultados adquiridos.

Para os fins deste trabalho, devido à heterogeneidade entre os ensaios e o número reduzido de dados, a análise estatística efetuada tem como objetivo a verificação de tendências gerais, e não a realização de uma meta-análise propriamente dita, o que não invalida o estudo realizado, visto que a análise estatística servirá como apoio à análise comparativa cruzada efetuada entre os estudos revisados. Portanto, através da combinação de ambas, foi possível obter não só resultados quantitativos, como também informações pertinentes aos procedimentos metodológicos e às características de cada ensaio, juntamente das discussões, convergências e pontos de discordância entre os autores consultados acerca da resposta do motor, quando abastecido por misturas em diferentes condições e proporções.

A seguir, são descritas cinco técnicas estatísticas comumente aplicadas em estudos experimentais ou comparativos, com a finalidade de, a partir da descrição das técnicas, justificar a escolha da regressão linear simples, com base em suas principais características.

2.1.2.1 Estatística descritiva

Silva e Samá (2021) explicam que a estatística descritiva envolve a coleta, organização e apresentação de dados. Dessa forma, pode-se entender que é uma abordagem focada em descrever e resumir informações relevantes com o auxílio de, muitas vezes, gráficos e tabelas expositivas.

Os dados numéricos são organizados através de medidas de tendência central e dispersão. Bussab e Morettin (2017) indicam que as principais medidas são: média ($\bar{x}$), que é o valor médio dos dados; mediana, sendo este o ponto que divide a amostra em duas partes iguais; desvio padrão (s), indicativo da dispersão de dados em relação à média; variância (s^2), que é o quadrado do desvio padrão; e, finalmente, coeficiente de variação (CV), que corresponde à razão entre o desvio padrão e a média, expressa em porcentagem, sendo empregado para comparar dispersões em diferentes escalas.

2.1.2.2 Teste t de Student

Segundo Moreno e Morcillo (2019), o teste t de Student é uma das ferramentas mais utilizadas na comparação das médias de duas amostras (grupos) independentes, com o objetivo de avaliar se são oriundas de populações com médias iguais ou não. O teste t de Student é utilizado, fundamentalmente, para avaliar hipóteses sobre médias, especialmente nos casos em que a variância populacional é desconhecida quando o tamanho amostral (n) é reduzido.

Essa técnica é baseada na distribuição t, a qual depende dos graus de liberdade associados ao tamanho amostral. Em geral, sua aplicação pressupõe amostragem aleatória, independência de observações e distribuição aproximadamente normal dos dados, uma vez que, à medida que o número de observações incrementa, a distribuição t tende a aproximar-se da distribuição normal, ampliando, assim, a possibilidade de se fazer inferências mais confiáveis. (DEVORE, 2014).

Ainda de acordo com Devore (2014), essa técnica pode ser aplicada para realizar o teste de uma média, em que se compara a média amostral com um valor de referência; e também o teste para duas amostras, para verificar diferenças entre médias de grupos independentes ou pareados. Perante o exposto, uma possível aplicação do Teste t de Student neste trabalho seria, por exemplo, comparar o desempenho médio de um motor com dois níveis distintos de biodiesel.

2.1.2.3 Análise de Variância (ANOVA)

Devore (2014) define a análise de variância (ANOVA) como uma extensão do teste t, e a técnica possibilita a comparação das médias de mais de dois grupos ou de dados experimentais nos quais foram aplicados mais de dois tratamentos. Esse corresponde ao caso

mais simples de ANOVA, conhecido como fator único, classificação única ou ANOVA unidirecional. Montgomery e Runger (2012) definem a análise de variância como uma técnica que decompõe a variação total dos dados em componentes atribuíveis a diferentes fontes. Devore (2014) explica que é a partir dessa decomposição que se torna possível o cálculo da estatística F, correspondente à razão entre as variâncias, o que permite avaliar a hipótese nula de igualdade entre as médias obtidas.

A interpretação deste teste depende da compreensão adequada da estatística F, sendo que valores elevados indicam que a variabilidade entre os grupos é maior do que a variabilidade interna, sugerindo que pelo menos uma média difere das demais. Entretanto, cabe observar que a ANOVA não identifica diretamente quais grupos diferem entre si, sendo necessário, quando possível, o uso de testes complementares (DEVORE, 2014).

De modo geral, a aplicação da ANOVA pressupõe algumas condições básicas, como independência das observações, distribuição aproximadamente normal dos dados dentro de cada grupo e homogeneidade das variâncias. Em relação ao tamanho amostral, a técnica trabalha com amostras organizadas por grupos independentes, não estabelecendo um valor mínimo fixo. No entanto, amostras maiores tendem a reduzir a influência de variabilidade aleatória, produzindo resultados mais estáveis (DEVORE, 2014).

Diferentemente do teste t, a ANOVA permite avaliar e comparar simultaneamente múltiplos grupos. Desse modo, a ANOVA poderia ser aplicada em estudos que envolvem várias concentrações de biodiesel, por exemplo, para que se possa comparar as diferenças no desempenho médio do motor resultantes dos variados teores testados. Entretanto, essa técnica possui maior enfoque na comparação entre médias dos grupos analisados, não sendo diretamente direcionada à avaliação do comportamento de diferentes parâmetros em função da variação da concentração de biodiesel na mistura.

2.1.2.4 Correlação de Pearson

A correlação de Pearson assemelha-se à regressão linear simples, uma vez que quantifica a força da relação linear entre variáveis – no caso da correlação, entre duas variáveis, especificamente. Adicionalmente, a técnica também indica a direção da relação. Assim, a técnica poderia ser empregada na verificação da relação entre a porcentagem de biodiesel e o consumo específico de combustível, por exemplo.

De acordo com Devore (2014), o coeficiente de correlação (r) varia de -1 a +1, em que $r = 1$ corresponde a uma correlação positiva perfeita; $r = -1$, à correlação negativa perfeita; e $r = 0$, à ausência de correlação linear.

É importante destacar que valores extremos de r (-1 a 1) dificilmente são encontrados na prática, sendo necessária a interpretação cuidadosa do coeficiente obtido. Filho e Júnior (2009) pontuam que, quanto mais próximo de 1 (independente do sinal), maior é a intensidade da relação linear entre as variáveis, enquanto valores próximos de zero indicam uma relação linear mais fraca.

Salienta-se que a correlação de Pearson é empregada apenas em associações lineares, sendo adequada para variáveis numéricas. A interpretação dessa técnica depende do tamanho amostral, uma vez que, quanto maior a amostra, maior a estabilidade e confiabilidade dos resultados obtidos (DEVORE, 2014).

2.1.2.5 Regressão Linear Simples

Segundo Sell (2005), a regressão linear simples estabelece uma equação matemática linear que descreve a relação entre duas variáveis, uma dependente (y) e outra independente (x), com o objetivo de estimar valores para uma variável, com base nos valores conhecidos de outra.

O modelo de regressão linear simples é dado, segundo Devore (2014), pela Equação 1.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (1)$$

Onde β_0 corresponde ao intercepto da reta com os eixos das ordenadas, é o valor de y quando $x = 0$; β_1 , à inclinação da reta, indicando a variação média de y para cada unidade de variação em x ; e ε corresponde ao erro aleatório, associado às variações não explicadas pelo modelo.

Vale destacar que a inclinação da reta permite identificar o tipo de relação existente: coeficiente positivo indica relação crescente e coeficiente negativo indica relação decrescente. Em outras palavras, o coeficiente angular β_1 , quando $\beta_1 > 0$, indica que, conforme se aumenta a variável dependente, também há um aumento na variável independente. Nos estudos revisados, os quais serão abordados posteriormente, há, por exemplo, uma relação direta entre o incremento de biodiesel na mistura e o aumento do consumo específico de

combustível. Por outro lado, quando $\beta_1 < 0$, indica que quando a variável independente aumenta, a variável dependente diminui. É o que ocorre na emissão de poluentes, que tende a reduzir conforme o aumento do teor de biodiesel na mistura, o que indica uma relação decrescente.

Ademais, um parâmetro fundamental dessa técnica estatística é o coeficiente de determinação (R^2), que expressa a proporção da variabilidade da variável dependente explicada pelo modelo. Relacionando a regressão linear simples com a correlação apresentada no tópico anterior, na regressão linear simples tem-se que $R^2 = r^2$; ou seja, o coeficiente de determinação (R^2) advém da correlação, como pontua Devore (2014). Os valores do R^2 variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior é o ajuste da reta aos dados e, portanto, maior a capacidade explicativa da regressão. Valores reduzidos indicam que a relação linear não descreve a variação observada adequadamente. Ressalta-se que não há um valor mínimo universalmente aceito, uma vez que a interpretação do coeficiente de determinação (R^2) depende, também, do contexto dos dados analisados.

Montgomery, Peck e Vining (2012) apontam que a regressão linear permite não apenas descrever tendências, como também fazer previsões. De forma geral, a regressão linear simples é amplamente empregada em estudos experimentais por possibilitar a quantificação da relação entre variáveis e a realização de inferências (DEVORE, 2014).

Sobre o tamanho amostral, Devore (2014) pontua que, embora não haja um número definido, um conjunto de dados maior tende a reduzir a variabilidade das estimativas realizadas, o que torna a análise mais consistente e confiável.

A regressão linear é adequada para aferir, por exemplo, como o consumo, desempenho e emissões de motores ciclo Diesel variam em função da porcentagem de biodiesel contida na mistura, sendo, portanto, escolhida como a técnica mais aplicável no contexto deste trabalho, por possibilitar a modelagem da relação entre essas variáveis.

3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS ESTUDOS REVISADOS

Objetivando avaliar o desempenho, consumo e emissões de motores ciclo Diesel operando com diferentes misturas – diesel-biodiesel em sua grande maioria, com um caso em particular de etanol-diesel-biodiesel –, a presente seção do trabalho baseia-se na compilação das informações mais relevantes dos trabalhos experimentais, priorizando os dados obtidos e as discussões efetuadas pelos autores.

Destaca-se que a organização dos estudos revisados neste tópico não seguiu uma ordem alfabética ou cronológica, e sim temática, considerando principalmente as variáveis analisadas, os objetivos experimentais e os pontos de convergência observados entre os estudos. Dessa forma, pesquisas com abordagens semelhantes foram agrupadas, a fim de facilitar a comparação entre os resultados, conectando-os às discussões elaboradas pelos autores. O Quadro 1 apresenta os estudos consultados em ordem alfabética, os combustíveis testados, parâmetros analisados, e o tipo de aplicação e estudo.

Quadro 1 - Características dos Estudos Analisados.

Nome do autor (ano)	Misturas	Parâmetros	Aplicação	Tipo de Estudo
Aguiar et al. (2016)	B0, B20, B50, B100	Potência, torque, consumo específico.	Motor diesel agrícola estacionário de 4 tempos, em bancada dinamométrica (ABNT ISO 1585) – avaliação do desempenho e consumo específico.	Experimental
Brunelli (2009)	B0, B25, B50, B75, B100	Potência, torque, consumo específico e emissões de fumaça.	Motor Agrale M93 ID de 4 tempos, instalado e instrumentado em bancada dinamométrica (ABNT NBR 6396, ABNT NBR 1585, ABNT NBR 3046/1) – avaliação do desempenho, consumo específico e emissões de fumaça, testando biodiesel proveniente de diferentes matérias-primas (soja, mamona e dendê).	Experimental
Castellanelli (2015)	B0, B50, B100	Potência, torque, consumo, emissões (CO ₂ , HC, NO _x), viabilidade econômica (TIR, <i>Payback</i>).	3 grupos geradores com motores Cummins 4BTA3.9 de 4 tempos em bancada dinamométrica (metodologia compatível com a ABNT ISO 1585) – avaliação da viabilidade econômica, desempenho, consumo específico e emissões de CO ₂ , HC e NO _x	Experimental e análise econômica.

Castellanelli et al. (2008)	B0, B2, B5, B10, B20, B50, B75, B100	Potência, torque, consumo específico.	Motor Cummins 4BTA 3.9 acoplado ao dinamômetro (ABNT NBR ISO 1585) – análise de desempenho em diferentes misturas.	Experimental
Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014)	E5, E10, E15, E15B	BMEP, BSFC, BTE, emissões (NOx, CO, HC, THC, CO ₂ , SO ₂ , fumaça).	Motor D-243 de 4 tempos em bancada dinamométrica (metodologia experimental própria) – avaliação comparativa do desempenho e emissões com misturas etanol-diesel e etanol-diesel-biodiesel.	Experimental
Souza, Guarieiro e Santos (2016)	B0, B5, B10, B20, B40, B60, B100	Potência, torque, consumo específico.	Motores D229-6 de 4 tempos em bancada dinamométrica (ABNT NBR ISO 1585) – avaliação do desempenho e consumo específico com diesel marítimo de alto teor de enxofre (5000 ppm) e misturas.	Experimental

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.1 Estudos sobre o desempenho de motores diesel com misturas diesel-biodiesel

Castellanelli et al. (2008) analisaram o desempenho de um motor ciclo Diesel Cummins 4BTA 3.9 de 4 cilindros com injeção direta e turbina removida, sem adaptações. Os autores acoplaram o motor a um dinamômetro e sistemas de aquisição de dados computadorizados, a fim de coletar dados referentes à potência, torque e consumo específico de combustível em diferentes faixas de rotação, compreendidas entre 1400 a 2600 rpm. O motor foi alimentado com diesel (B0), biodiesel de soja (B100), e misturas nas seguintes proporções: B2 (2% de biodiesel), B5 (5% de biodiesel), B10 (10% de biodiesel), B20 (20% de biodiesel), B50 (50% de biodiesel) e B75 (75% de biodiesel). Para a realização do ensaio, os autores adotaram a metodologia descrita na norma ABNT NBR ISO 1585 e para cada teste realizado, aplicaram fatores de correção específicos com base nas condições atmosféricas.

Os valores de torque e potência foram determinados somente em condição de máxima aceleração. Os resultados do ensaio mostraram que o diesel mineral (B0) atingiu valores de

potência superiores ao biodiesel puro (B100) em todos os regimes de operação. Contudo, ainda assim a maior potência desenvolvida (47,3 kW) foi atingida por B20, operando a 2333 rpm. Além disso, foi observado que misturas com baixos teores de biodiesel, como B2, B5 e B10, apresentaram valores próximos entre si, e comportamento semelhante ao diesel mineral.

De maneira análoga ao parâmetro de potência, Castellani et al. (2008) também verificaram que o diesel puro obteve valores de torque superiores ao biodiesel puro em todas as faixas de rotação analisadas, sendo o maior torque 206,4 Nm, atingido pelo diesel mineral a 1800 rpm. É interessante pontuar que a mistura B20 atingiu valores de torque próximos ao diesel mineral, especialmente em rotações mais elevadas, enquanto B50, também em faixas mais altas de rotação, compreendidas entre 2067 e 2600 rpm, desenvolveu torque superior tanto à mistura B20, quanto ao diesel puro.

Referente ao consumo específico, observou-se que o motor abastecido com B100 foi o menos econômico em todo o regime de operação, variando de 368,7 g/kWh a 1.400 rpm até 395,3 g/kWh a 2.600 rpm, enquanto o óleo diesel (B0) apresentou valores inferiores ao biodiesel puro ao longo de todo o ensaio, variando de 289,7 g/kWh a 379,7 g/kWh. Castellani et al. (2008) atribuíram esse comportamento principalmente ao menor poder calorífico do biodiesel em relação ao diesel mineral. É importante pontuar, no entanto, que misturas com menores teores de biodiesel, como B2, B5 e B10, apresentaram resultados muito próximos em várias rotações, sem um aumento totalmente uniforme. Comparativamente ao diesel puro, a mistura B20 apresentou os menores valores de consumo específico em toda a faixa de rotação analisada.

Castellani et al. (2008) observaram uma aproximação dos valores de potência, torque e consumo específico em faixas de alta rotação. Foi verificado um maior distanciamento entre os valores obtidos para o diesel mineral e o B100. Por outro lado, através da análise dos gráficos de curva elaborados pelos autores, é possível notar, de forma clara, uma atenuação desse distanciamento entre o diesel e a mistura B20. Dessa forma, Castellani et al. (2008) concluíram que o menor poder calorífico do biodiesel não é o único fator responsável pelas diferenças observadas em relação ao diesel puro, devendo-se considerar, também, possíveis limitações no processo de atomização causadas por características inerentes ao biodiesel, como maior viscosidade e tensão superficial, as quais poderiam prejudicar a pulverização e a queima do combustível favorecendo, assim, a ocorrência de combustão incompleta em determinados regimes de operação do motor.

A partir do estudo experimental desenvolvido por Castellani et al. (2008), foi possível verificar que o comportamento das variáveis dos parâmetros analisados é fortemente

dependente da rotação de operação. Ademais, os autores também destacaram que o desempenho do motor associa-se a características construtivas particulares do próprio motor ensaiado, uma vez que a turbulência ideal para garantir a atomização mais eficaz da mistura não será idêntica a outro motor com características distintas.

A partir dos resultados adquiridos através do ensaio experimental, Castellaneli et al. (2008) determinaram que o uso do biodiesel puro apresenta bom desempenho apenas em faixas de rotação mais elevadas, por apresentar comportamento mais similar ao óleo diesel neste caso. Também pontuaram que a mistura B20 é a alternativa mais viável tecnicamente, por ter desenvolvido potência superior, torque semelhante e menor consumo específico ao óleo diesel, de maneira geral. Além disso, o ensaio revelou que a adição de 50% e 75% de biodiesel ao diesel mineral resultou uma queda gradual dos parâmetros de desempenho.

Adiante, será realizado um tratamento dos dados quantitativos deste estudo, convertendo os parâmetros de potência e torque máximo e consumo específico mínimo de combustível em variações percentuais. Observa-se, no Quadro 2, que a potência máxima foi atingida por B20; o torque máximo, por B0; e o consumo específico mínimo, por B2. Nota-se variação no padrão de comportamento das misturas, pois não há uma consistente e progressiva tendência crescente ou decrescente dos valores obtidos por Castellaneli et al. (2008). O Quadro 2 apresenta os resultados do ensaio conduzido por Castellaneli et al. (2008). Todos os dados foram fornecidos diretamente pelos autores do estudo em questão.

Quadro 2 - Potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.

Teor de Biodiesel (%)	Potência Máxima (kW)	Torque Máximo (Nm)	Consumo Específico Mínimo (g/kWh)
B0	45,8	206,4	280
B2	46,0	200,5	270
B5	46,3	201,9	273,3
B10	45,7	200,1	275,7
B20	47,3	205,1	275,7
B50	46,7	205,3	288,7
B75	45,9	202,2	295,8
B100	44,1	190,5	321,3

Fonte: Castellaneli et al. (2008).

Resultados semelhantes foram observados por Souza, Guarieiro e Santos (2016), especialmente no que se refere à influência das propriedades do biodiesel sobre o desempenho do motor. Os autores objetivaram avaliar, utilizando um dinamômetro, a potência, o torque e o consumo específico de combustível de dois motores diesel MWM - International, modelo 229-6 de 6 cilindros sem adaptações, sendo um deles abastecido com diesel marítimo com elevado teor de enxofre (5000 ppm), e o outro com misturas B5, B10, B20, B40 (40% de biodiesel), B60 (60% de biodiesel) e biodiesel puro. Os autores realizaram o ensaio nas rotações compreendidas entre 1200 e 2600 rpm. Souza, Guarieiro e Santos (2016) adotaram a metodologia especificada pela norma ABNT NBR 1585, e aplicaram os fatores de correção especificados por ela.

No tocante ao desempenho, Souza, Guarieiro e Santos (2016) explicaram que o aumento do teor de biodiesel modifica as propriedades do combustível, como densidade e viscosidade, o que interfere no processo de injeção. Segundo os autores, o aumento da densidade pode alterar a dinâmica da injeção, mudando a forma como o combustível é introduzido na câmara e a penetração do jato. Essas alterações acabam influenciando o processo de combustão e, conseqüentemente, o desempenho do motor.

Souza, Guarieiro e Santos (2016) notaram um aumento nas médias de potência do diesel, biodiesel e misturas conforme o incremento da rotação. No entanto, a partir de 1800 rpm, a mistura B5 desenvolveu uma potência superior, chegando à potência média máxima de 93 kW a 2500 rpm, contra 85 kW do diesel marítimo, diferindo-se de Castellanelli et al. (2008). A justificativa dada pelos autores foi o maior número de cetano do biodiesel, sendo essa uma característica que favorece a ignição do combustível e reduz o atraso de combustão.

Para além disso, Van Gerpen (apud SOUZA; GUARIEIRO; SANTOS, 2016) indica que a maior viscosidade do biodiesel possui a capacidade de reduzir possíveis perdas no sistema de injeção, permitindo com que uma maior quantidade de combustível seja injetada na câmara de combustão, o que poderia explicar o melhor comportamento da mistura B5 no parâmetro de potência. Entretanto, os autores ressaltaram que viscosidades mais elevadas também poderiam prejudicar a pulverização do combustível, dificultando o processo de combustão no interior da câmara. Isso justificaria os resultados das misturas B75 e B100 de potência máxima do estudo de Castellanelli et al. (2008) que, comparativamente ao diesel, apresentaram valores menores e queda gradual.

Embora os valores de torque máximo tenham sido semelhantes entre B5 e B0 em faixas de rotação menores, a partir de 1800 rpm notou-se um certo distanciamento entre os valores. O menor torque máximo foi obtido pelo biodiesel puro, o qual alcançou 358,4 Nm, e

o maior, pela mistura B10, que atingiu 373,9 Nm. Todos os valores máximos de torque foram testados na faixa de rotação compreendida entre 1500 e 1600 rpm. De maneira geral, misturas com menores teores de biodiesel apresentaram comportamento mais próximo ao combustível de referência, resultado semelhante ao observado por Castellanelli et al. (2008).

Em relação ao consumo específico de combustível, os resultados mostraram que B5 apresentou um valor de 258 g/kWh a 2500 rpm, enquanto B100 atingiu 274 g/kWh na mesma condição, sendo o biodiesel puro o combustível menos econômico entre as misturas avaliadas. De maneira geral, observou-se uma tendência mais definida de aumento do consumo específico de combustível conforme o aumento da proporção de biodiesel, diferentemente de Castellanelli et al. (2008) que, embora também tenham constatado que B100 foi o combustível menos econômico, observaram variações de comportamento entre as misturas intermediárias ao longo da faixa de rotação analisada. Segundo Souza, Guarieiro e Santos (2016), a tendência observada pode relacionar-se principalmente ao menor poder calorífico do biodiesel, o que exigiria uma maior quantidade de combustível para gerar a mesma quantidade de energia. Os autores também apontaram que o maior número de cetano do biodiesel e as alterações no processo de injeção e combustão podem ter contribuído para o aumento do consumo específico observado nas misturas com maiores teores de biodiesel.

A partir do estudo experimental elaborado, Souza, Guarieiro e Santos (2016) concluíram que não há diferenças significativas no desempenho do motor ao adicionar 5% de biodiesel ao diesel marítimo. Em relação às outras misturas analisadas, apesar do incremento de biodiesel ter refletido, de maneira geral, em pior desempenho, ainda assim os autores pontuaram que os resultados podem ser considerados estatisticamente semelhantes. Perante o analisado, o estudo concluiu que misturas diesel-biodiesel são eficazes e que seu uso em navios é viável, embora sejam necessários mais estudos para a verificação de uma maior quantidade de parâmetros.

Em concordância com os resultados anteriormente discutidos, Aguiar et al. (2016) também observaram desempenho semelhante entre o diesel e misturas com menores teores de biodiesel. Os autores avaliaram o desempenho de um motor diesel agrícola estacionário de 4 cilindros, abastecido por diesel S10 (10 ppm de enxofre) e biodiesel de soja nas proporções B20, B50 e B100, testadas nas rotações compreendidas entre 1000 a 2300 rpm. Os ensaios realizados ocorreram em conformidade com a norma ABNT ISO 1585.

Os autores, para a realização do ensaio, elevaram gradualmente a rotação e o pedal de aceleração a fim de estabilizar o motor até atingirem a rotação máxima de 2300 rpm e pedal a

100%. Para tomar as curvas de desempenho, adotaram procedimentos segundo a norma, e os desenvolveram em três estágios.

Os resultados obtidos neste estudo revelaram pontos de concordância interessantes entre a literatura revisada, pois a mistura B20 atingiu valores de torque e potência médios similares aos obtidos pelo diesel S10, ao passo em que apresentou aumento no consumo de combustível. Similarmente aos estudos analisados anteriormente, o biodiesel puro apresentou os maiores valores de consumo, e os autores atribuíram o resultado ao menor poder calorífico do biodiesel e às diferenças em propriedades físico-químicas, como viscosidade e densidade, as quais poderiam alterar o processo de injeção e atomização do combustível. Tal comportamento está em concordância com o ensaio conduzido por Souza, Guarieiro e Santos (2016), cujos resultados também indicaram desempenho semelhante entre o diesel e misturas com baixos teores de biodiesel. Em contrapartida, misturas com maiores concentrações de biodiesel tenderam a apresentar aumento do consumo e redução gradual do desempenho do motor.

A partir do ensaio conduzido por Aguiar et al. (2016), é possível constatar, por meio da análise das curvas, que tanto a potência quanto o torque apresentaram comportamento relativamente uniforme entre as misturas analisadas, uma vez que as diferenças observadas ocorreram de maneira gradual, sem variações abruptas. Aguiar et al. (2016), em conformidade com Castellani et al. (2008) e Souza, Guarieiro e Santos (2016), sugeriram que as diferenças físico-químicas entre o biodiesel e o diesel, como densidade e viscosidade, poderiam alterar a injeção de combustível. Os autores também destacaram o elevado número de cetano do biodiesel como uma característica capaz de favorecer a ignição e a combustão do motor.

Aguiar et al. (2016) observaram um aumento na potência média similarmente para todos os combustíveis, à medida em que se aumentava a rotação do motor. No caso da mistura B20, verificou-se um valor de potência máxima bastante próximo ao diesel S10, atingindo 83,67 kW frente a 83,37 kW, na rotação de 2300 rpm. Paralelamente, o consumo médio de combustível cresceu progressivamente com o aumento da rotação. Para o diesel S10 o consumo máximo observado foi de 18,37 kg/h a 2300 rpm, faixa em que o motor também desenvolveu sua potência máxima.

A partir da observação da curva de desempenho do motor, Aguiar et al. (2016), perceberam que, na faixa de rotação compreendida entre 1400-1800 rpm, o torque médio de todos os combustíveis testados tendeu a aumentar. No entanto, a partir de 1800 rpm a 2300 rpm, houve uma queda gradativa do parâmetro em todos os combustíveis testados. Portanto, a

partir do exposto, há uma indicação de que a rotação poderia influenciar o torque desenvolvido pelo motor, o que também foi observado nos estudos conduzidos por Castellaneli et al. (2008) e Souza, Guarieiro e Santos (2016). Além disso, o ensaio indicou que B100 obteve o menor valor de torque, correspondente a 365,33 Nm. Paralelamente, o diesel puro obteve o maior valor (383,66 Nm), seguido por B20 (381,66 Nm).

Ao analisar o rendimento do motor em termos de porcentagem, Aguiar et al. (2016) verificaram que todas as misturas apresentaram valores percentuais negativos de torque em relação ao diesel S10. Apesar disso, a mistura B20 apresentou uma redução percentual pouco expressiva (-0,52%). Ademais, B20 desenvolveu potência superior ao diesel puro, e o mesmo resultado foi observado por Castellaneli et al. (2008).

Portanto, em concordância com Castellaneli et al. (2008), Aguiar et al. (2016) também indicaram a adição de 20% de biodiesel ao diesel puro como sendo a mais adequada, devido à similaridade de seu comportamento em relação ao diesel mineral.

Os dados de potência e torque máximos do estudo de Aguiar et al. (2016) serão utilizados para a posterior análise estatística realizada. Portanto, seus valores encontram-se discriminados no Quadro 3. Destaca-se que as variáveis foram alcançadas em diferentes faixas de rotação. Similarmente ao estudo de Castellaneli et al. (2008), Aguiar et al. (2016) apresentaram resultados de maior potência máxima em B20 e maior torque máximo em B0.

Quadro 3 - Potência máxima e torque máximo em função do teor de biodiesel.

Teor de Biodiesel (%)	Potência Máxima (kW)	Torque Máximo (Nm)
B0	83,37	383,67
B20	83,67	381,67
B50	81,13	371,00
B100	78,77	365,53

Fonte: Aguiar et al. (2016).

3.2 Estudo sobre a eficiência térmica, combustão e emissões

Na pesquisa conduzida por Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014), realizou-se a avaliação comparativa do desempenho de um motor diesel D-243 de 4 tempos, 4 cilindros, aspirado naturalmente e com injeção direta, operando com combustível diesel comercial classe 2; misturas diesel-etanol nas proporções E5 (5% de etanol), E10 (10% de etanol) e

E15 (15% de etanol); e diesel-biodiesel-etanol (E15B), cuja composição é a seguinte: diesel (80%), biodiesel (5%) e etanol (15%). Este é o único estudo revisado que combina diferentes biocombustíveis ao óleo diesel comercial, por incluir, além do biodiesel, o biocombustível etanol. Portanto, o estudo do trabalho conduzido por Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) faz-se necessário, justamente por explorar e expandir o conhecimento acerca de novas combinações e interessantes possibilidades de uso de combustíveis renováveis em motores de combustão interna.

O principal objetivo almejado pelos autores com a realização deste estudo foi examinar a influência que a adição de etanol e biodiesel ao diesel mineral exerce sobre o início da injeção, atraso da autoignição, combustão, taxa máxima de liberação de calor e teor de oxigênio contido na mistura. Para facilitar a compreensão dos parâmetros analisados por Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014), os principais pontos de discussão referentes a grande parte dos resultados coletados serão organizados em tópicos.

Inicialmente, os autores realizaram uma avaliação da eficiência do motor em misturas diesel-biodiesel-etanol, e observaram que a pressão média efetiva do freio (BMEP) tende a cair quando o motor opera em faixas de rotação alta, e uma das justificativas apontadas pelos autores seria o aumento da fricção interna entre os componentes do motor. Além disso, a mistura E15 chegou a ter menos 5,1% de BMEP comparativamente ao diesel, porém a adição de 5% de biodiesel ao E15 melhora a BMEP em até 3,3%, dependendo da rotação.

Antes de adentrar no consumo específico de combustível (BSFC), é necessário explicar previamente que os autores fizeram uso do parâmetro k , correspondente ao fator ar-combustível, para analisar as condições de operação do motor. De maneira simples, pode-se entender que valores mais elevados de k indicam misturas mais pobres, com excesso de oxigênio, enquanto valores menores correspondem a misturas mais ricas, com excesso de combustível.

Dito isto, os resultados adquiridos por Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) acerca do consumo de combustível mostraram que:

- Em misturas pobres ($k = 5,5$), verificou-se que a adição de 10 % de etanol ao combustível favorece a combustão em determinadas regiões da mistura devido ao maior teor de oxigênio. Assim, o BSFC tende a diminuir, pois menos combustível é gasto no processo de combustão.
- Em misturas moderadas ($k = 3$), observou-se que para a mistura E15B foi necessário mais combustível por ciclo, uma vez que o etanol possui menor poder calorífico. Dessa forma, os autores constataram um aumento progressivo no BSFC com o

aumento da rotação do motor, pois mais combustível precisou ser injetado por ciclo, para fornecer a mesma quantidade de energia ao motor, devido ao menor poder calorífico do etanol. No caso da mistura E5, os autores notaram uma melhora no BSFC, que reduziu 0,8% a 1400 rpm.

- Em misturas ricas ($k = 1,5$), o BSFC aumentou de maneira geral, mas o efeito foi menos expressivo em altas rotações.

Resumidamente, os autores justificaram que o aumento no consumo específico de combustível em misturas ricas seria causado pela combinação de dois fatores: (1) menor poder calorífico do etanol, que resulta na necessidade de se injetar mais combustível; (2) combustão incompleta, gerando zonas ricas, em que há maior teor de combustível do que de oxigênio no cilindro. Nesse caso, o oxigênio do etanol ajuda apenas parcialmente na combustão.

Outro parâmetro avaliado por Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) foi a eficiência térmica do freio (BTE). Resumidamente, o estudo revelou que:

- Em misturas pobres, houve uma melhora moderada da BTE em baixas rotações com etanol, tendo a mistura E10 um aumento da BTE de 13,3% a 1400 rpm e 12,4% a 1800 rpm. Paralelamente, os dados apontaram para uma queda de 8,4% da BTE em altas rotações (2200 rpm).
- Em misturas ricas, os autores perceberam uma queda da BTE conforme se aumentava o teor de oxigênio do etanol ao diesel, para todas as faixas de rotação testadas. A justificativa dada por Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) para a obtenção desses resultados reside no fato de que, em uma mistura rica, parte da energia é desperdiçada, pois o combustível não é aproveitado em sua totalidade no processo de queima. Além disso, reforçando o que já foi mencionado previamente, o reduzido poder calorífico do etanol gera a necessidade de se injetar mais combustível para gerar a mesma quantidade de energia.
- No caso da mistura E15B, obteve-se a mesma BTE do diesel mineral operando com mistura rica em altas rotações. A explicação dada pelos autores é a seguinte: quando se adiciona biodiesel à mistura, obtém-se uma melhora no índice de cetano e lubricidade, o que faz com que o combustível se inflame mais rapidamente, ajudando a sua queima de forma mais completa mesmo em misturas ricas operando em altas rotações.

Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) também investigaram o impacto que a presença de oxigênio na mistura possui na emissão de óxidos de nitrogênio (NOx). Os

autores destacaram a existência de múltiplos fatores que poderiam influenciar a emissão do NO_x, tais como a rotação e a carga do motor, e o tipo de mistura utilizada e sua proporção, uma vez que as misturas possuem diferentes poderes caloríficos, calores latentes de evaporação e teores de oxigênio. Dito isto, os principais pontos levantados pelo estudo referente à emissão de óxidos de nitrogênio são os seguintes:

- Em misturas pobres operando a baixas rotações, E5 e E10 promoveram, devido ao aumento do teor de oxigênio na mistura e à consequente elevação da temperatura no cilindro, um aumento do NO_x.
- Em misturas ricas de etanol operando em altas rotações, obteve-se uma redução do NO_x devido ao efeito de resfriamento da mistura propiciado pelo etanol, desencadeado pelo seu alto calor latente de evaporação.
- No caso da mistura E15B, devido à adição do biodiesel, conforme destacado anteriormente, tem-se uma melhora no índice de cetano. Em misturas ricas, tanto o etanol (que contribui com mais oxigênio) quanto a adição de biodiesel propiciam uma melhor queima, o que aumenta a temperatura no cilindro, consequentemente elevando o NO_x.

A pesquisa também abordou a influência que o oxigênio presente nas misturas exerceu na produção de monóxido de carbono (CO). Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) perceberam que:

- Em misturas pobres e moderadas de E5, pode haver uma redução na emissão de CO, pois o oxigênio presente no etanol ajuda a queimar parcialmente as regiões ricas em combustível, conforme explicado anteriormente.
- Na mistura rica de E15B, com o motor operando numa faixa de rotação alta, houve um aumento de quase 85,6% na emissão de CO em comparação ao diesel comercial. Os autores atribuíram o resultado ao tempo insuficiente para realizar a combustão completa. Além disso, também destacaram o atraso de autoignição causado pelo baixo índice de cetano do etanol, além do seu efeito de resfriamento. Ambos os fatores resultaram na redução da temperatura do cilindro, o que favoreceu a emissão de CO e hidrocarbonetos (HC).

Para misturas moderadas em faixas de alta rotação, o estudo mostrou um aumento na emissão de CO, e os autores destacaram o menor tempo de combustão e o maior consumo de combustível como fatores determinantes para a obtenção desse resultado. No entanto, a eficiência volumétrica do motor ajudou parcialmente na redução do CO em 1800 rpm. Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) concluíram, a partir disso, que o CO não depende

apenas do teor de oxigênio presente no combustível, mas também da velocidade do motor e da geometria de seu cilindro.

Sequencialmente, o trabalho abordou a dependência da emissão de hidrocarbonetos totais (THC) associada ao número de cetano e teor de oxigênio presente no combustível. Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) afirmaram que as emissões de THC dependem da qualidade da combustão, da carga do motor e de sua rotação, e isso ocorre dentro dos limites impostos pelas propriedades físico-químicas da mistura.

Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) notaram, em seu estudo, que a emissão de hidrocarbonetos tende a aumentar com a redução do número de cetano da mistura, devido à adição do etanol. Além disso, é importante pontuar que a adição de etanol também contribui para o aumento da emissão de HC, devido ao seu efeito de resfriamento. Ambos os fatores fazem com que a combustão demore mais para se iniciar, propiciando uma queima incompleta, a qual favorece a emissão de HC.

De modo geral, o estudo revela que concentrações baixas de etanol-diesel (5 a 10%) reduzem fuligem, mantêm ou reduzem ligeiramente o NO_x sem alteração significativa do CO, e aumentam a emissão de HC, quando comparadas ao diesel puro. Com relação à mistura E15B, a adição de 5% de biodiesel na mistura aumenta o número de cetano, melhora a eficiência do motor, aumenta ligeiramente a emissão de THC e oxigênio residual e reduz a temperatura do escapamento.

Finalmente, no último tópico do trabalho, Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) discorreram sobre a influência que o oxigênio presente na composição do combustível possui na opacidade da fumaça e em outras emissões. Os autores concluíram que:

- Com a mistura pobre de E15B, a opacidade da fumaça ficou abaixo de 4% na faixa de rotação compreendida entre 1400–2200 rpm. Porém, em misturas mais ricas, foi observado um aumento de fumaça, embora não expressivo.
- Houve um aumento de fumaça nas misturas E5 e E10, na faixa de rotação compreendida entre 1800-2200 rpm. Os autores explicam que isso se deve, principalmente, aos vapores de combustível não queimados que são visíveis, como a fumaça branca.

Além disso, Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) destacaram que a presença do biodiesel e do etanol na mistura E15B tendem à, devido ao menor teor de enxofre, reduzir as emissões de dióxido de enxofre (SO₂) e fumaça.

Os autores também salientaram, em seu trabalho, que a eficiência da combustão e das emissões não depende apenas do oxigênio, mas também da estrutura química da substância, a

qual pode ser dividida em dois casos: (1) Etanol ($-\text{OH}$ ligado fortemente): oxidação completa mais difícil, o que aumenta a emissão de THC; (2) biodiesel ($-\text{COOCH}_3$, ligações duplas): oxidação mais fácil, o que reduz a emissão de CO, HC e fumaça.

Portanto, pode-se concluir que, na mistura E15B, embora a adição de etanol resulte em um aumento do consumo específico de combustível e uma leve redução de potência, a presença do biodiesel contribui para o aumento do número de cetano, o que melhora a eficiência térmica do motor e reduz a emissão de determinados poluentes, dependendo das condições de operação do motor. Além disso, a presença de etanol e biodiesel na mistura eleva o teor de oxigênio, influenciando diretamente o processo de combustão e o comportamento das emissões.

Assim sendo, a partir da análise e comparação dos dados obtidos e discutidos na pesquisa, Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) concluíram que a mistura E15B pode ser utilizada de forma eficiente, sem que haja prejuízos no desempenho do motor. Os autores pontuaram, ainda, que a adição simultânea de etanol anidro e biodiesel ao diesel comercial pode ser considerada ambientalmente vantajosa em determinadas condições operacionais, sobretudo pela redução da opacidade da fumaça e modificações observadas em algumas emissões.

3.3 Estudo sobre a viabilidade econômica e aplicações práticas do biodiesel

O presente tópico visa explorar a possibilidade de se obter, além dos benefícios ambientais, ganhos na esfera econômica, ao se fazer uso do biodiesel. O trabalho desenvolvido por Castellaneli (2015) faz isso através da análise de uma situação real, sendo o seu objeto de estudo um supermercado de grande porte o qual emprega, para o seu consumo de energia elétrica, a regra tarifária verde. Conforme explicado por Castellaneli (2015), essa modalidade tarifária estabelece valores distintos a depender do horário do dia e da época do ano. No entanto, uma única tarifa é cobrada para suprir a demanda de potência. O autor destacou que as empresas adotam essa tarifa quando há a necessidade de operarem no horário de ponta e, durante esse período, geralmente fazem uso de grupos geradores diesel, por essa ser uma opção economicamente mais vantajosa.

O supermercado em questão utiliza 3 grupos geradores com motores diesel Cummins, modelo 4BTA3.9 de 4 cilindros e, para avaliar a possível redução de custos e emissões de poluentes, Castellaneli (2015) realizou uma análise comparativa do desempenho desses motores, quando alimentados por diesel puro e biodiesel obtido através do processamento do

óleo de fritura, formando misturas nas proporções B50 e B100, testadas na faixa de rotação compreendida entre 1400 a 2200 rpm. O ensaio foi conduzido em bancada dinamométrica, e os parâmetros utilizados como base para a posterior inspeção técnico-econômica realizada foram: torque, potência, consumo específico de combustível e emissão de poluentes (CO₂, HC e NO_x). O autor também considerou, na análise econômica, os custos de implantação do sistema, gastos operacionais e consumo anual estimado de combustível. Embora o autor não tenha explicitado a norma que seguiu para a condução do ensaio, a partir da maneira como ele foi realizado, é possível inferir que apresente similaridades à metodologia descrita na norma ABNT ISO 1585.

Os dados coletados por Castellanelli (2015) mostraram que a mistura B50 apresentou torque e potência similares ao diesel convencional, especialmente em faixas de rotação mais elevadas. Em relação ao consumo específico de combustível, o maior consumidor apontado foi o biodiesel puro, seguido pela mistura B50 e, então, o óleo diesel. Apesar de Castellanelli (2015) não ter se aprofundado nas causas desse comportamento, os resultados mostraram-se coerentes com a literatura analisada até agora. Os autores previamente consultados relacionaram o aumento do consumo específico ao menor poder calorífico do biodiesel e às diferenças físico-químicas do combustível, como elevada viscosidade e possíveis alterações no processo de atomização e combustão.

Os resultados dos testes também evidenciaram reduções percentuais expressivas na emissão de poluentes ao fazer uso das misturas B50 e B100. Outra vantagem ambiental a ser ressaltada é o reaproveitamento do óleo de fritura usado na formulação das misturas, evitando, dessa forma, o descarte inadequado.

A fim de realizar uma análise econômico-financeira, Castellanelli (2015) realizou um levantamento de dados referentes aos investimentos necessários para a construção de sistemas geradores, considerando, também, os custos fixos e variáveis do processo. A partir disso, estabeleceu uma relação entre o consumo específico de combustível, o seu custo unitário e a quantidade necessária por ano, e então projetou o gasto anual esperado. Os resultados revelaram que B0, B50 e B100 teriam um gasto de, respectivamente, R\$352.046,86, R\$288.405,72 e R\$260.298,96. Sendo assim, pode-se concluir que o biodiesel puro, ao se considerar a citada relação, é o mais econômico. Castellanelli (2015) atribuiu o resultado ao baixo custo de beneficiamento do biodiesel, o qual é obtido através do óleo residual de fritura.

Quanto aos gastos referentes à compra de eletricidade da concessionária distribuidora, para o supermercado estudado, a economia anual mais significativa correspondeu à R\$132.291,31, valor este também alcançado por B100.

É importante explicar que, para verificar a viabilidade econômica do emprego da auto suficiência no horário de ponta, Castellanelli (2015) fez uso dos conceitos de Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback* descontado, ambos calculados a partir do fluxo de caixa. O autor observou a partir do cálculo da TIR que o investimento em geração própria é vantajoso tanto no diesel convencional, quanto nas duas misturas testadas. Ele ressaltou, ainda, que mesmo em um tempo médio de retorno superior a 5 anos, que é o caso de B0, o empreendimento ainda assim seria viável, já que o retorno futuro acabaria por compensar as perdas de entrada. Em contrapartida, o menor tempo de *payback* ocorreu com a utilização de B100 (1,1 ano), que também atingiu a maior TIR (88%), o que evidenciou a sua superioridade financeira em relação às demais opções.

Portanto, a partir do exposto e verificado, o autor concluiu que a utilização de misturas diesel-biodiesel em sistemas de auto-suficiência energética é economicamente viável e, adicionalmente, apresenta ganhos expressivos no quesito sustentabilidade, uma vez que a adição do biocombustível resulta em uma menor emissão de poluentes tóxicos. Ademais, no tocante aos parâmetros de potência e torque, o trabalho conduzido por Castellanelli (2015) tornou possível inferir que a adição de 50% de biodiesel ao diesel convencional não causa desvios significativos no funcionamento do motor, uma vez que a mistura obteve valores aproximadamente similares ao diesel convencional. Dessa forma, o estudo desenvolvido por Castellanelli (2015) mostrou que, para além dos benefícios ambientais, há a possibilidade de se utilizar o biocombustível em sistemas de geração própria de energia.

Os dados do trabalho conduzido por Castellanelli (2015) também foram extraídos, a fim de realizar a análise estatística das variáveis de potência e torque máximos, consumo específico de combustível e emissão de poluentes. Todos os parâmetros foram alcançados em faixas de rotação.

Observa-se que a potência máxima foi atingida por B50; o torque máximo, por B0 - o que também foi observado nos estudos de Castellanelli et al. (2008) e Aguiar et al. (2016) -; e o consumo específico mínimo, por B50.

Os dados discutidos obtidos por Castellaneli (2015) encontram-se no Quadro 4. Ressalta-se que todos os dados foram fornecidos diretamente pelo autor do estudo.

Quadro 4 - Potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.

Teor de Biodiesel (%)	Potência Máxima (kW)	Torque Máximo (Nm)	Consumo Específico Mínimo (g/kWh)
B0	45,8	206,4	280
B50	47,3	205,1	275,7
B100	44,1	190,5	321,3

Fonte: Castellaneli (2015).

No tocante às emissões, os valores de redução percentual obtidos por Castellaneli (2015), utilizando o óleo diesel como referência, podem ser vistos no Quadro 5.

Quadro 5 - Emissões de CO₂, HC e NO_x em função do teor de biodiesel.

Teor de Biodiesel (%)	CO₂ (%)	HC (%)	NO_x (%)
B0	0	0	0
B50	-27	-25,4	-13,3
B100	-33,2	-28,9	-17,8

Fonte: Castellaneli (2015).

3.4 Estudo com revisão integrada e análise comparativa de desempenho, consumo e emissões

Por fim, realizou-se a verificação de uma dissertação de mestrado conduzida por Brunelli (2009), a qual foi composta por uma extensa revisão bibliográfica, onde o autor procurou destacar de que forma o biodiesel é inserido no contexto brasileiro, considerando a matriz energética nacional, as tendências tecnológicas globais e as perspectivas futuras do uso de biocombustíveis.

Em sua fundamentação teórica, o autor conceitualizou os motores de combustão interna ciclo Otto e Diesel, seus funcionamentos, e também caracterizou os combustíveis que os alimentam, diferenciando, em especial, o diesel mineral convencional do biodiesel. Procurou, em sua pesquisa, explicar de que forma o desempenho de um motor à combustão pode ser analisado, indicando quais os parâmetros que devem ser levados em consideração e

de que maneira podem ser interpretados. Além disso, assim como Castellaneli (2015), Brunelli (2009) também identificou o potencial ambiental do biodiesel, pois seus dados revelaram uma redução do nível de emissões, à medida que se acrescentava o biodiesel ao diesel convencional.

Visando validar o uso de misturas diesel-biodiesel em motores de combustão interna ciclo diesel, de forma a possibilitar o aproveitamento dos benefícios econômicos, sociais e ecológicos decorrentes de seu emprego, Brunelli (2009) executou um trabalho denominado Projeto Biodiesel, no qual foi avaliado o comportamento e desempenho operacional de um motor de combustão interna Agrale M93 ID monocilíndrico de injeção direta, operando com óleo diesel, misturas diesel-biodiesel e biodiesel puro. As principais aplicações comerciais do motor em questão incluem equipamentos agrícolas e de construção civil. Os parâmetros observados pelo ensaio conduzido por Brunelli incluíram potência, torque, consumo específico de combustível e índice de fumaça.

No motor, foram ensaiados três tipos diferentes de biodiesel: o de soja, mamona e dendê. As proporções das misturas foram B25, B50, B75 e B100, e todo o sistema motriz foi instalado e instrumentado em uma bancada dinamométrica. Os testes foram conduzidos nas faixas de rotação: 1800, 2000, 2200, 2400 e 2600 rpm, e os dados foram posteriormente aplicados em um programa de correção. O desenvolvimento do projeto ocorreu em concordância com os padrões estabelecidos por algumas normas, dentre elas a ABNT NBR 6396, ABNT NBR 1585 e ABNT NBR 3046/1, e os fatores de correção adotados seguiram, em especial, a norma ABNT NBR 1585.

Em sua análise, o autor destacou as características do biodiesel que exerceram maior influência nos resultados obtidos no ensaio conduzido por alterarem o comportamento do motor, sendo elas a viscosidade, o poder calorífico, a densidade e o número de cetano. É interessante pontuar que as citadas características também foram apontadas como fatores influenciadores na alteração do funcionamento do motor nos estudos revisados anteriormente.

Brunelli (2009) destaca que para a realização dos resultados de desempenho, considerou a potência como sendo diretamente proporcional ao torque. Dito isto, no tocante à performance do motor, o ensaio revelou que o biodiesel de soja apresentou reduções moderadas nos parâmetros de potência e torque, especialmente na mistura B50. Na mistura B25, as perdas médias foram de 2,7%, indicando pouca alteração funcional em relação ao diesel mineral. Já nas misturas B50 e B75, as quedas se tornaram mais evidentes, alcançando cerca de 3,5% e 4%, respectivamente, enquanto o uso de biodiesel puro resultou em uma redução de 3,2%. O último resultado não está em conformidade com os estudos revisados até

aqui, porém é importante lembrar que Brunelli (2009) avaliou as médias de potência e torque de forma integrada, diferindo-se, portanto, dos demais autores, os quais analisaram cada parâmetro separadamente. Portanto, ao se referir ao desempenho, optou-se por apresentar esses parâmetros de forma conjunta utilizando a expressão "potência $\times$ torque", a fim de evidenciar que os resultados correspondem a uma análise integrada dessas variáveis, e não à avaliação isolada de cada uma delas.

Segundo Brunelli (2009), o biodiesel de soja apresentou propriedades relativamente próximas às do diesel mineral quando comparado aos demais biodieseis avaliados, o que contribuiu para que as perdas de desempenho permanecessem moderadas. Ainda assim, seu menor poder calorífico reduz a quantidade de energia liberada durante a combustão, favorecendo pequenas reduções nos valores de potência e torque.

Os resultados da variação percentual média de potência e torque do biodiesel de soja em diferentes proporções, utilizando o óleo diesel convencional como referência, encontram-se no Quadro 6.

Quadro 6 - Variação percentual de potência x torque médios em função do teor de biodiesel de soja.

Teor de Biodiesel (%)	Variação média de potência x torque (%)
25	-2,7
50	-3,5
75	-4
100	-3,2

Fonte: Brunelli (2009).

Observou-se que o biodiesel de mamona apresentou comportamento atípico, pois as misturas B25 e B50 apresentaram valores percentuais superiores ao diesel mineral, embora discretos, correspondendo a 1,3% e 0,4%, respectivamente. Contudo, em B75 e B100 houve um aumento de 2,6% e 3,3%. Assim sendo, os resultados indicaram comportamento distinto em relação aos demais biodieseis avaliados, com manutenção e até incremento dos valores médios de potência e torque em determinadas misturas.

Brunelli (2009) relacionou esse comportamento às propriedades físico-químicas do biodiesel de mamona. Segundo o autor, sua viscosidade é, em média, três vezes maior que a observada para os biodieseis de soja e dendê, enquanto a densidade apresenta valores cerca de 10% superiores e o número de cetano é mais de 20% inferior. O autor argumentou que

essas diferenças influenciam os processos de injeção e combustão, refletindo diretamente nos resultados de torque e potência observados nos ensaios.

Os resultados da variação percentual de potência e torque médios do biodiesel de mamona em diferentes teores, utilizando o óleo diesel convencional como referência, são sintetizados no Quadro 7.

Quadro 7 - Variação percentual de potência x torque médios em função do teor de biodiesel de mamona.

Teor de Biodiesel (%)	Variação média de potência x torque (%)
25	1,3
50	0,4
75	2,6
100	3,3

Fonte: Brunelli (2009).

O biodiesel de dendê apresentou os piores resultados de desempenho no motor, com quedas progressivas nos valores médios de potência e torque à medida que sua participação na mistura aumentava. Nas misturas B25 e B50, as reduções foram de 1,8% e 5,7%, respectivamente, enquanto em B75 e B100 as perdas atingiram 9%. Logo, ainda que o biodiesel de dendê apresente propriedades físico-químicas mais próximas às do biodiesel de soja do que às da mamona, os dados adquiridos por Brunelli (2009) revelaram que o biodiesel de dendê apresentou as maiores reduções de desempenho entre os combustíveis avaliados. Os resultados de variação percentual de potência e torque médios das misturas de biodiesel de dendê encontram-se no Quadro 8.

Quadro 8 - Variação percentual de potência x torque médios em função do teor de biodiesel de dendê.

Teor de Biodiesel (%)	Variação média de potência x torque (%)
25	-1,8
50	-5,7
75	-9
100	-9

Fonte: Brunelli (2009).

O estudo revelou que o uso do biodiesel de soja levou a aumentos graduais no consumo específico médio de combustível à medida em que a sua concentração na mistura aumentava. Em B25, o consumo foi 4,7% superior ao diesel. Já nas misturas B50 e B75, os aumentos chegaram a 6,4% e 7,9%, respectivamente, enquanto o biodiesel puro apresentou elevação significativa de 11,2% no consumo. Brunelli (2009) indica que esse comportamento está ligado ao menor poder calorífico do combustível, que reduz a energia liberada durante a combustão e obriga o motor a injetar maior volume de combustível para a manutenção da potência e do torque, conforme discutido anteriormente. A variação percentual do consumo específico de combustível médio em função do teor de biodiesel de soja contido na mistura encontra-se no Quadro 9.

Quadro 9 - Variação percentual do consumo específico de combustível médio em função do teor de biodiesel de soja.

Teor de Biodiesel (%)	Variação média do consumo específico de combustível (%)
25	4,7
50	6,4
75	7,9
100	11,2

Fonte: Brunelli (2009).

O biodiesel de mamona apresentou os piores resultados no parâmetro de consumo específico, com aumentos progressivos e mais acentuados que os observados nos biodieseis de soja e dendê. Para B25 e B50, houve um aumento de 4,4% e 6,4%. A partir de B75 e B100, a tendência se intensificou, alcançando 8,5% e 13,8% de aumento no consumo, o maior entre todos os biodieseis testados pelo autor.

Brunelli (2009) atribuiu esse comportamento, mais uma vez, às propriedades físico-químicas peculiares da mamona, especialmente sua elevada viscosidade e maior densidade em relação aos demais biodieseis avaliados. Tais fatores, conforme aponta Brunelli (2009), afetam diretamente o processo de atomização e a estratégia de injeção, o que resulta na necessidade de se injetar maior volume de combustível para que a carga do motor seja mantida.

Os resultados de variação percentual do consumo específico de combustível médio em função do teor de biodiesel de mamona são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 - Variação percentual do consumo específico de combustível médio em função do teor de biodiesel de mamona.

Teor de Biodiesel (%)	Variação média do consumo específico (%)
25	4,4
50	6,4
75	8,5
100	13,8

Fonte: Brunelli (2009).

Com relação ao biodiesel de dendê, os resultados revelaram aumentos mais moderados no consumo específico quando comparado aos de soja e, principalmente, aos de mamona. Nas misturas B25 e B50, os acréscimos foram de 2,6% e 4,7%, respectivamente. Já em B75 e B100, os aumentos foram de 5,6% e 10,3%.

O Quadro 11 apresenta a variação percentual do consumo específico de combustível médio em função do teor do biodiesel de dendê.

Quadro 11 - Variação percentual do consumo específico de combustível médio em função do teor de biodiesel de dendê.

Teor de Biodiesel (%)	Variação média do consumo específico (%)
25	2,6
50	4,7
75	5,6
100	10,3

Fonte: Brunelli (2009).

Agora, no tocante ao índice de fumaça, o biodiesel de soja apresentou redução progressiva à medida em que sua concentração na mistura aumentava. Em B25, verificou-se uma queda média de 14%, enquanto para B50, o decréscimo foi de aproximadamente 25,2%. Com a mistura B75 e o biodiesel puro, as reduções chegaram a 37,3% e 39,7%, respectivamente. Esses resultados podem ser explicados por características gerais do biodiesel em relação ao diesel mineral, tais como o maior número de cetano, o qual favorece

uma combustão mais completa e, conseqüentemente, reduz a formação de partículas de carbono e fumaça visível.

O Quadro 12 apresenta a variação percentual do índice de fumaça médio em função do teor do biodiesel de soja.

Quadro 12 - Variação percentual do índice de fumaça médio em função do teor de biodiesel de soja.

Teor de Biodiesel (%)	Variação média do índice de fumaça (%)
25	-14
50	-25,2
75	-37,3
100	-39,7

Fonte: Brunelli (2009).

O trabalho de Brunelli (2009) destacou positivamente o biodiesel de mamona nos ensaios de índice de fumaça, pois a mamona apresentou reduções médias de 18,9% em B25 e 29,8% em B50. Para as misturas B75 e B100, os valores de queda foram de 41,2% e 35%, respectivamente.

O Quadro 13 apresenta a variação percentual do índice de fumaça médio em função do teor do biodiesel de mamona.

Quadro 13 - Variação percentual do índice de fumaça médio em função do teor de biodiesel de mamona.

Teor de Biodiesel (%)	Variação média do índice de fumaça (%)
25	-18,9
50	-29,8
75	-41,2
100	-35

Fonte: Brunelli (2009).

Os resultados de Brunelli (2009) indicam que o biodiesel de dendê apresentou desempenho intermediário: em B25, houve redução média de 13,8%, enquanto que em B50, a queda foi de 29,3%. Para as misturas B75 e B100, os decréscimos alcançaram os valores 43,9% e 50%, respectivamente. Essa significativa redução é atribuída, mais uma vez, à

melhoria da combustão propiciada pelo aumento do número de cetano. Comparativamente ao biodiesel de mamona, o de dendê apresenta um certo equilíbrio físico-químico em termos de viscosidade e densidade, o que poderia favorecer o processo de atomização do combustível. Dessa forma, o biodiesel de dendê mostrou-se o mais eficaz na redução de fumaça em altas concentrações, embora seja necessário considerar os efeitos combinados decorrentes do aumento de consumo para misturas acima de B50.

Os resultados de variação percentual do índice de fumaça médio em função do teor de biodiesel de dendê encontram-se no Quadro 14.

Quadro 14 - Variação percentual do índice de fumaça médio em função do teor de biodiesel de dendê.

Teor de Biodiesel (%)	Variação média do índice de fumaça (%)
25	-13,8
50	-29,3
75	-43,9
100	-50

Fonte: Brunelli (2009).

Portanto, através da realização do estudo, Brunelli (2009) concluiu que o uso de biodiesel de soja, mamona e dendê em motores diesel é viável do ponto de vista técnico e ambiental. O autor observou que, embora ocorram pequenas reduções em torque e potência e aumento no consumo específico, especialmente em misturas acima de B50, também há de se considerar a significativa redução no índice de fumaça, especialmente para o biodiesel puro de dendê. Segundo o autor, os resultados foram amplamente influenciados pelas propriedades físico-químicas do biodiesel, tais como viscosidade, densidade, número de cetano e poder calorífico, as quais diferem-se dependendo da matéria-prima utilizada para o beneficiamento do biodiesel.

Brunelli (2009) enfatizou que concentrações maiores de biodiesel poderiam exigir ajustes no projeto do motor para otimizar o seu desempenho. Por fim, Brunelli (2009) defendeu que o biodiesel é uma alternativa promissora e sustentável, com potencial para aprimoramento.

4. APLICAÇÃO DA REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Para a análise estatística, foram selecionados estudos que contivessem dados quantitativos comparáveis em relação ao teor de biodiesel e seus efeitos sobre o desempenho, consumo e emissões, sendo eles: Aguiar et al. (2016); Brunelli (2009); Castellanelli (2015); e Castellanelli et al. (2008). Os trabalhos de Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) e Souza, Guarieiro e Santos (2016) não foram contemplados nesta etapa devido aos seguintes fatores:

1. O trabalho de Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) faz uso de uma mistura ternária entre diesel, etanol e biodiesel, e binária entre biodiesel e etanol, diferindo dos demais trabalhos considerados, os quais avaliaram exclusivamente misturas entre o diesel e o biodiesel. A partir do estudo dos autores, é possível inferir que a presença do etanol altera significativamente as propriedades físico-químicas do combustível, influenciando o processo de combustão e, conseqüentemente, os parâmetros de interesse. Portanto, ainda que o estudo contribua positivamente para a expansão do conhecimento acerca do comportamento de motores diesel quando alimentados por diferentes tipos de biocombustíveis, incluí-lo na análise estatística poderia comprometer a comparabilidade dos resultados e introduzir vieses de interpretação.
2. O estudo de Souza, Guarieiro e Santos (2016), apesar de discutir os parâmetros médios de potência e torque máximos e consumo específico mínimo, os apresentam predominantemente através de gráficos, não os organizando em quadros de forma clara, diferentemente dos demais autores consultados. À vista disso, a extração não precisa dos valores poderia comprometer a confiabilidade da análise estatística realizada.

Além disso, no tocante ao consumo de combustível, optou-se por não fazer uso dos dados disponibilizados por Aguiar et al. (2016), por corresponderem ao consumo absoluto, em kg/h, e não ao específico, em g/kWh, destoando dos demais estudos avaliados. Desse modo, não haveria como traçar uma comparação direta com os outros trabalhos, porque para realizar a conversão do consumo para a unidade de g/kWh, Aguiar et al. (2016) precisariam ter fornecido uma relação direta entre essas variáveis no mesmo ponto de operação do motor, o que não é feito.

Quanto às emissões, fez-se uso dos dados de Brunelli (2009) para a análise do índice de fumaça, e de Castellanelli (2015), para a verificação das emissões dos poluentes CO₂, HC e NO_x.

É importante frisar que a análise estatística priorizou os dados obtidos através dos testes com biodiesel de soja, com a exceção do estudo de Castellaneli (2015), que fez uso do biodiesel obtido através do óleo de fritura residual. O trabalho foi mantido na comparação devido ao combustível em questão apresentar características físico-químicas e comportamento operacional mais próximos ao biodiesel de soja utilizado na maior parte dos estudos revisados. Segundo Mittlebach e Tritthart (1988 apud CASTELLANELLI, 2015), mesmo sendo proveniente de um óleo parcialmente oxidado, o biodiesel obtido de óleo residual de fritura apresenta propriedades próximas às dos ésteres produzidos a partir de óleos antes do processo de fritura.

Em contrapartida, o trabalho de Brunelli (2009) evidenciou diferenças relevantes entre os biodieseis produzidos a partir de soja, mamona e dendê. O autor destacou que propriedades físico-químicas como viscosidade, densidade, número de cetano e poder calorífico tendem a variar em função da matéria-prima empregada, influenciando diretamente o comportamento do combustível durante os processos de injeção e combustão. Dessa forma, optou-se por excluir da análise estatística os resultados obtidos com biodiesel de mamona e dendê, mantendo apenas os dados referentes ao biodiesel de soja, a fim de reduzir a influência de variáveis associadas à composição do combustível.

Dito isso, os dados foram organizados em planilhas eletrônicas e analisados por meio de gráficos de dispersão com linha de tendência e equação da reta da regressão linear simples, o que permitiu avaliar a relação entre o aumento da proporção de biodiesel aos parâmetros analisados.

4.1 Organização dos dados

A presente seção visa organizar os dados referentes à variação de potência, torque, consumo específico de combustível, índice de fumaça e emissão dos poluentes NO_x, CO₂ e HC. Diferentemente da seção de análise comparativa cruzada entre estudos, em que os trabalhos foram agrupados conforme os temas abordados a fim de facilitar a comparação de dados, na etapa da aplicação da regressão linear simples optou-se pela apresentação dos dados em ordem alfabética dos autores, uma vez que a análise estatística tem o seu foco voltado à observação de tendências gerais presentes nos parâmetros analisados, não havendo necessidade, portanto, de agrupamento temático dos estudos revisados.

Reforça-se que o objetivo desta análise não é estabelecer conclusões definitivas, mas sim identificar e avaliar possíveis tendências gerais no comportamento dos motores com a

utilização de diferentes teores de biodiesel. Para viabilizar a comparação quantitativa entre estudos, o diesel mineral (B0) foi adotado como combustível de referência, e os resultados foram expressos em variações percentuais, de modo a padronizar a análise e permitir a comparação das tendências observadas.

Optou-se pela utilização dos valores de potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo de combustível, com o objetivo de facilitar a comparação entre ensaios de maneira mais uniforme, reduzindo parcialmente a influência das diferenças operacionais observadas entre os trabalhos analisados. No entanto, o estudo de Brunelli (2009) foi o único que não apresentou especificamente os valores máximos de potência e torque, além do consumo específico mínimo. Ainda assim, o trabalho foi mantido na comparação, pois o autor forneceu diretamente os valores de variação percentual de seus resultados, calculados a partir da média dos dados obtidos em todas as faixas de rotação ensaiadas. Ainda assim, considerando que a presente análise tem caráter exploratório e visa a identificação de tendências, optou-se por aplicar a regressão linear simples aos dados desse estudo, considerando que a técnica de regressão linear simples foi aplicada de forma individual em cada trabalho.

4.1.1 Estudo de Aguiar et al. (2016)

A faixa de rotação utilizada no ensaio conduzido pelos autores foi de 1000-2300 rpm, com incrementos de 100 rpm, totalizando 14 níveis rotacionais avaliados. O quadro 15 apresenta os valores percentuais da variação de potência e torque máximos.

Quadro 15 - Variação de potência e torque máximos em função do teor de biodiesel.

Autor	Teor de biodiesel (%)	Variação de potência máxima (%)	Variação de torque máximo (%)
Aguiar et al. (2016)	0	0	0
Aguiar et al. (2016)	20	+0,35	-0,52
Aguiar et al. (2016)	50	-2,68	-3,30
Aguiar et al. (2016)	100	-5,51	-4,78

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Aguiar et al. (2016).

Destaca-se que o valor máximo de potência foi alcançado na rotação correspondente à 2300 rpm, enquanto o torque máximo foi desenvolvido em 1800 rpm.

4.1.2 Estudo de Brunelli (2009)

Brunelli (2009) realizou o ensaio nas faixas de rotação correspondentes à 1800, 2200 e 2600 rpm. Os dados de torque e potência foram obtidos por meio de ensaios experimentais em dinamômetro, realizados em diferentes rotações do motor ao longo de sua faixa de operação. O torque foi medido diretamente, enquanto a potência foi calculada a partir da relação entre torque e rotação, conforme explicado anteriormente.

Os valores de variação percentual de torque e potência, consumo específico de combustível e redução de fumaça médios encontram-se no Quadro 16, e foram obtidos diretamente através dos dados fornecidos pelo próprio autor.

Quadro 16 - Variação de potência x torque, consumo específico de combustível e índice de fumaça médios em função do teor de biodiesel.

Autor	Teor de biodiesel (%)	Variação média de torque x potência (%)	Variação média de consumo específico (%)	Variação média do índice de fumaça (%)
Brunelli (2009)	0	0	0	0
Brunelli (2009)	25	-2,7	+4,7	-14,0
Brunelli (2009)	50	-3,5	+6,4	-25,2
Brunelli (2009)	75	-4,0	+7,9	-37,3
Brunelli (2009)	100	-3,2	+11,2	-39,7

Fonte: Brunelli (2009).

4.1.3 Estudo de Castellanelli (2015)

O teste foi realizado em motor diesel operando em diferentes faixas de rotação, variando de 1400 a 2200 rpm, aproximadamente. Foram calculadas as variações percentuais de potência e torque máximos e consumo específico mínimo de combustível.

A potência máxima foi alcançada na rotação 2333, o torque máximo em 1800 rpm e o consumo específico mínimo em 1677 rpm.

Os valores percentuais dos parâmetros mencionados foram calculados e encontram-se no Quadro 17.

Quadro 17 - Variação de potência e torque máximos e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.

Autor	Teor de Biodiesel (%)	Variação de potência máxima (%)	Variação de torque máximo (%)	Variação de consumo específico mínimo (%)
Castellanelli (2015)	0	0	0	0
Castellanelli (2015)	50	+3,28	-0,63	-1,54
Castellanelli (2015)	100	-3,71	-7,70	+14,75

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Castellanelli (2015).

Castellanelli (2015), tomando como referência B0, verificou as variações percentuais das emissões dos gases CO₂, HC e NO_x. Os valores percentuais foram disponibilizados pelo próprio autor, e dispõe-se no Quadro 18.

Quadro 18 - Variação de CO₂, HC e NO_x em função do teor de biodiesel.

Autor	Teor de Biodiesel (%)	Variação de CO₂ (%)	Variação de HC (%)	Variação de NO_x (%)
Castellanelli (2015)	0	0	0	0
Castellanelli (2015)	50	-27,0	-25,4	-13,3
Castellanelli (2015)	100	-33,2	-28,9	-17,8

Fonte: Castellanelli (2015).

4.1.4 Estudo de Castellanelli et al. (2008)

A faixa de rotação utilizada no ensaio conduzido por Castellanelli et al. (2008) foi de 1400–2600 rpm. No Quadro 19, encontram-se os valores percentuais de variação de potência

máxima, atingida em 2333; torque máximo, em 1800 rpm; e consumo específico mínimo de combustível, atingido em 1533 rpm. O estudo de Castellani et al. (2008) não dispõe de informações pertinentes a emissões.

Quadro 19 - Variação de potência e torque máximos e consumo específico mínimo de combustível em função do teor de biodiesel.

Autor	Teor de Biodiesel (%)	Variação de potência máxima (%)	Variação de torque máximo (%)	Variação de consumo específico mínimo (%)
Castellani et al. (2008)	0	0	0	0
Castellani et al. (2008)	2	+0,44	-2,86	-3,57
Castellani et al. (2008)	5	+1,09	-2,18	-2,39
Castellani et al. (2008)	10	-0,22	-3,05	-1,54
Castellani et al. (2008)	20	+3,28	-0,63	-1,54%
Castellani et al. (2008)	50	+1,97	-0,53	+3,11
Castellani et al. (2008)	75	+0,22	-2,03	+5,64
Castellani et al. (2008)	100	-3,71	-7,7	+14,75

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Castellani et al. (2008).

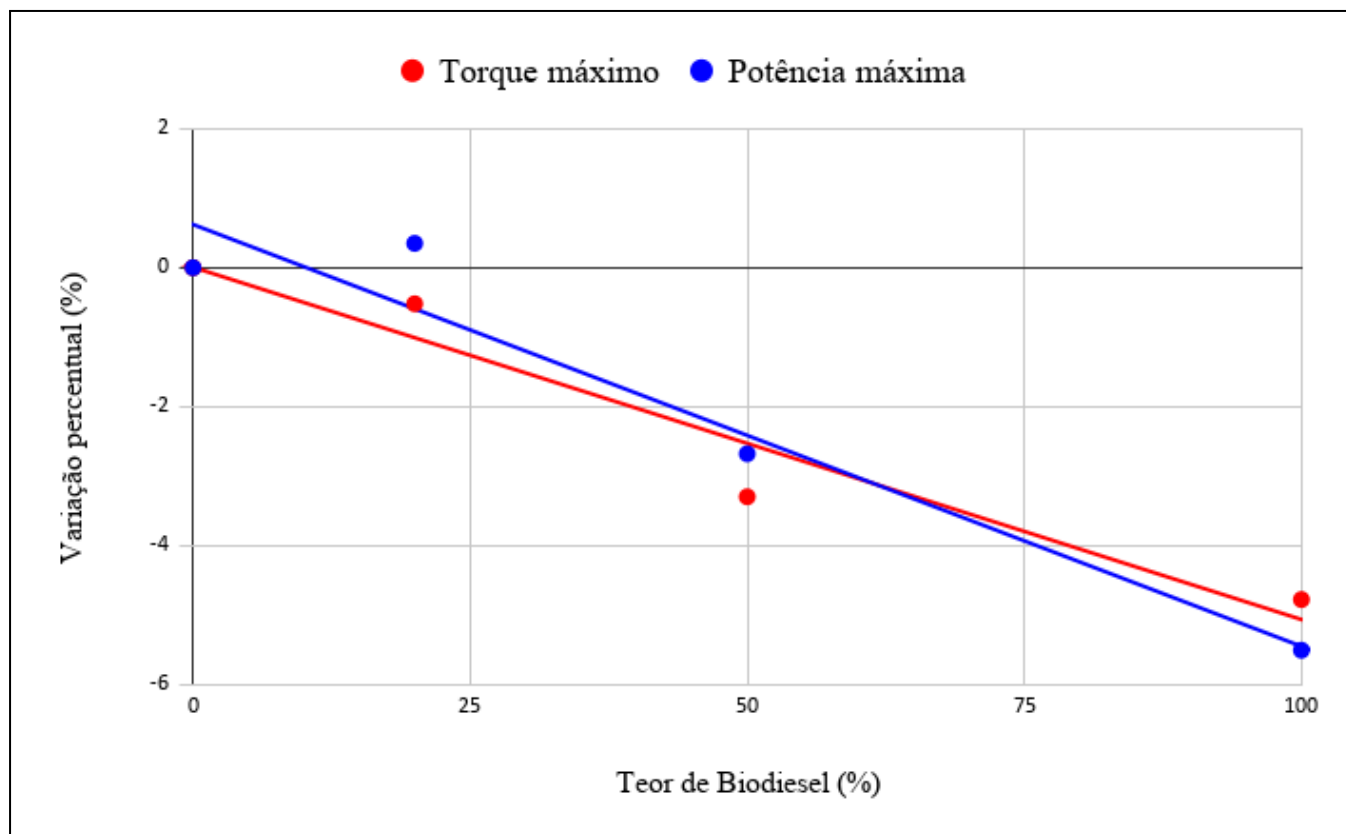
4.2 Resultados

A técnica estatística de regressão linear simples foi aplicada para avaliar a relação entre o teor de biodiesel e os parâmetros de desempenho, consumo e emissões. Na presente seção do trabalho, são disponibilizados os gráficos de dispersão obtidos através da regressão linear simples, cujo modelo de equação é: $y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$. Os gráficos de dispersão, valores de

coeficiente de determinação (R^2) e equações da reta foram obtidos através do software Excel, e neles constam linhas de tendência linear obtidas através dos dados considerados.

Primeiramente serão apresentados os gráficos, seguindo a ordem alfabética dos autores consultados. A figura 2 contém o gráfico obtido através do tratamento dos dados fornecidos por Aguiar et al. (2016), referentes aos parâmetros de potência e torque máximos.

Figura 2 - Variação de potência máxima e torque máximo em função do teor de biodiesel.



Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Aguiar et al. (2016).

O quadro 20 apresenta as equações da reta e coeficientes de determinação obtidos em cada parâmetro avaliado.

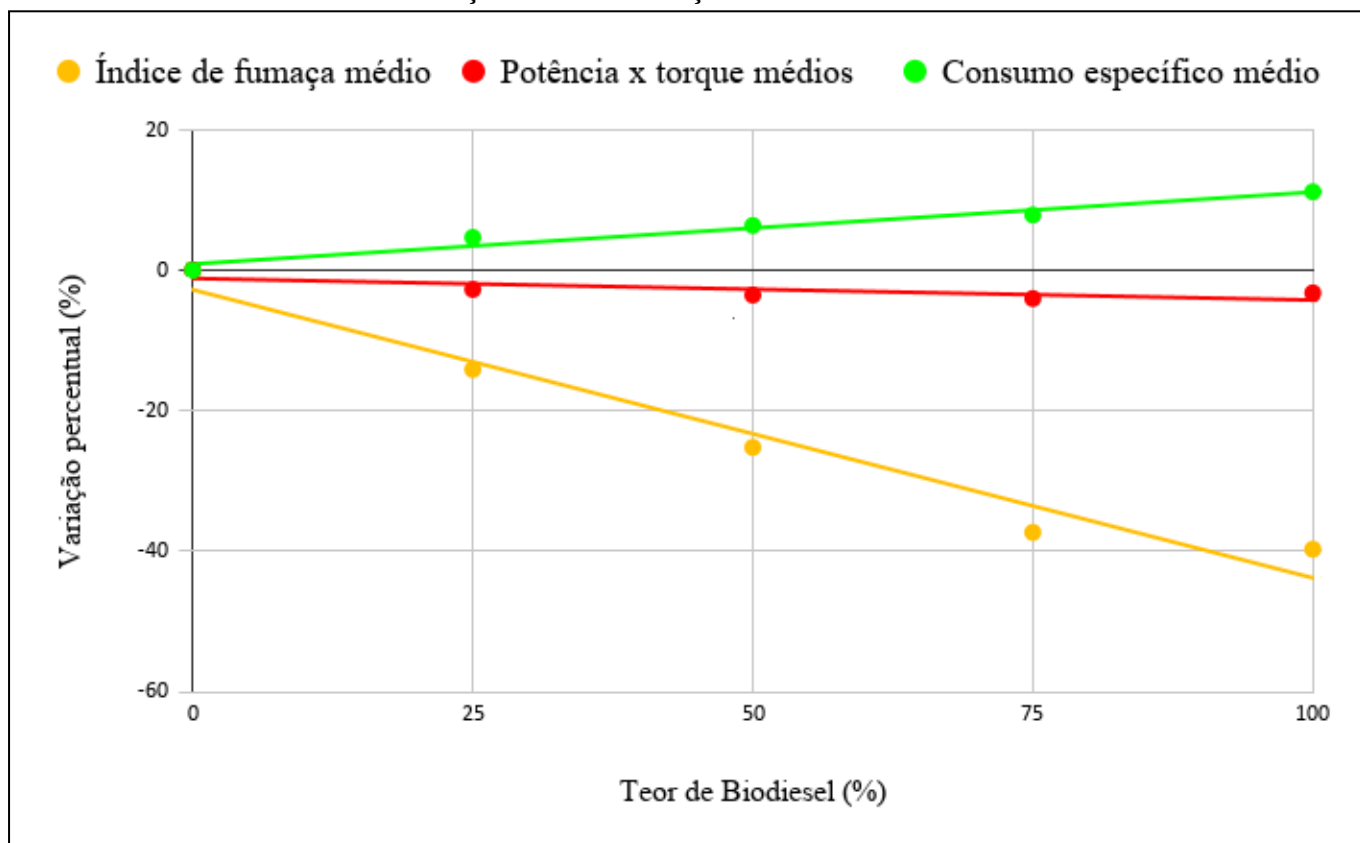
Quadro 20 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) da potência máxima e torque máximo em função do teor de biodiesel.

Parâmetro avaliado	Equação da reta	Coeficiente de determinação (R^2)
Potência máxima	$y = -0,0608x + 0,6222$	0,939487598
Torque máximo	$y = -0,0507x + 0,0061$	0,941151043

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Aguiar et al. (2016).

Na figura 3, encontra-se o gráfico obtido através dos dados de potência x torque médios, consumo específico médio e índice de fumaça médio, extraídos de Brunelli (2009)

Figura 3 - Variação de potência x torque médios, consumo específico médio e índice de fumaça médio em função do teor de biodiesel.



Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Brunelli (2009).

No quadro 21 constam as equações da reta e coeficientes de determinação obtidos.

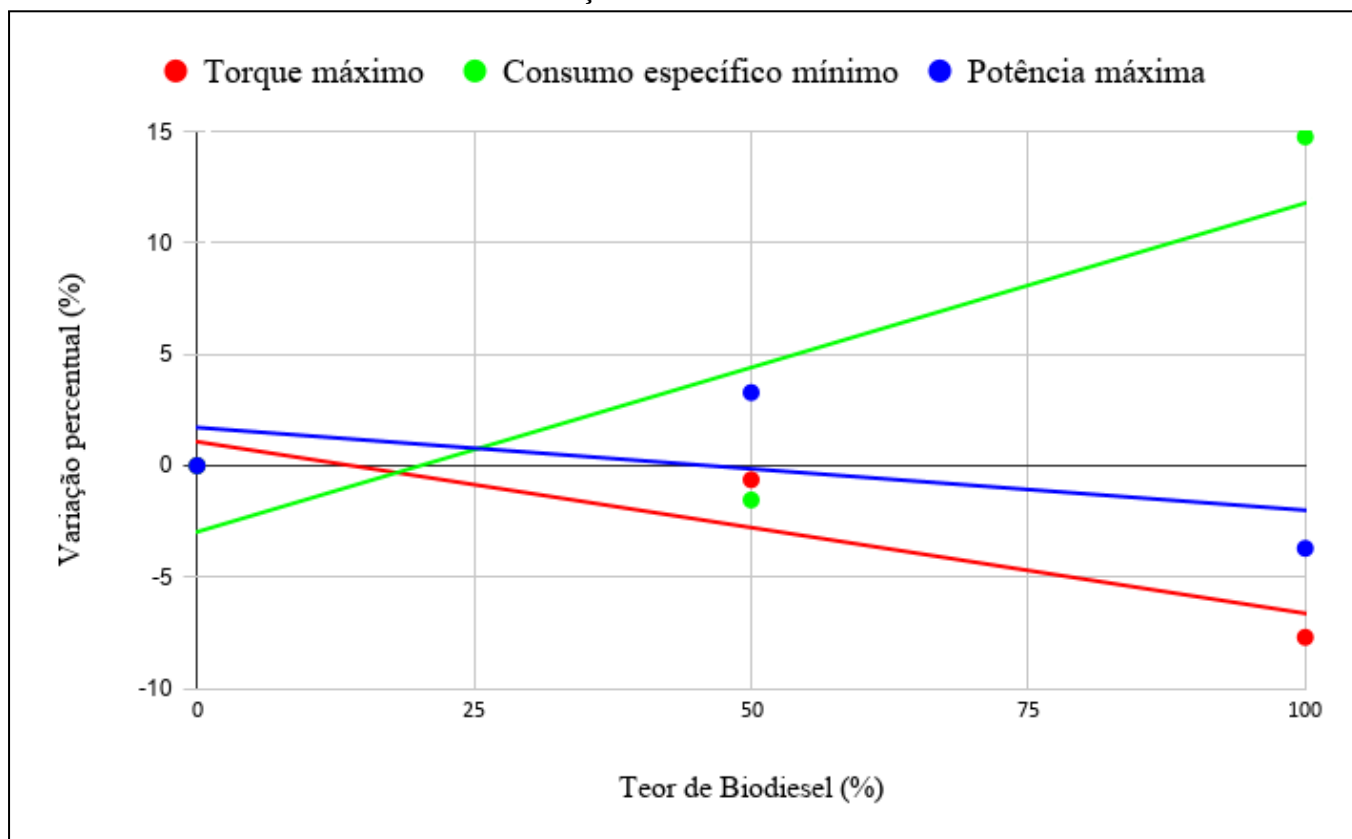
Quadro 21 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) da potência x torque médios, consumo específico médio e índice de fumaça médio.

Parâmetro avaliado	Equação da reta	Coefficiente de determinação (R^2)
Potência x torque médios	$y = -0,308x - 1,14$	0,600830969
Consumo específico médio	$y = 0,1024x + 0,92$	0,956841675
Índice de fumaça médio	$y = -0,4104x - 2,74$	0,960390186

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Brunelli (2009).

A figura 4 apresenta o gráfico obtido através dos dados de potência e torque máximos e consumo específico mínimo fornecidos por Castellanelli (2015).

Figura 4 - Variação de potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.



Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Castellanelli (2015).

No quadro 22, encontram-se as equações da reta e coeficientes de determinação da potência máxima e torque máximo em função do teor de biodiesel, fazendo uso dos dados de Castellanelli (2015).

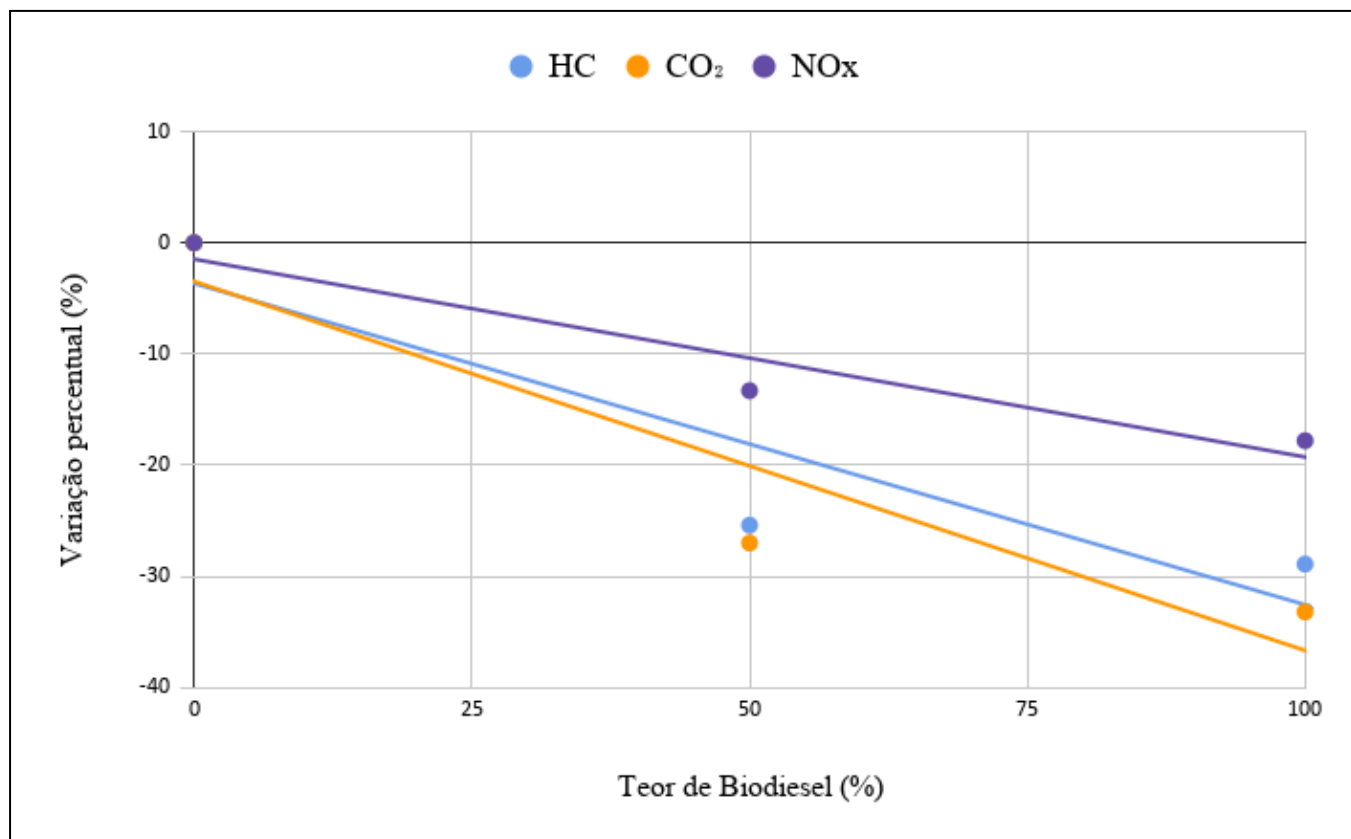
Quadro 22 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) da potência máxima e torque máximo em função do teor de biodiesel.

Parâmetro avaliado	Equação da reta	Coeficiente de determinação (R^2)
Potência máxima	$y = -0,0371x + 1,7117$	0,281349393
Torque máximo	$y = -0,077x + 1,0733$	0,810919489
Consumo específico mínimo	$y = 0,1475x - 2,9717$	0,672460252

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Castellanelli (2015).

A figura 5 apresenta as variações percentuais dos dados de emissões de Castellanelli (2015).

Figura 5 - Variação das emissões de CO₂, HC e NO_x em função do teor de biodiesel.



Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Castellanelli (2015).

O Quadro 23 apresenta as equações da reta e coeficientes de determinação.

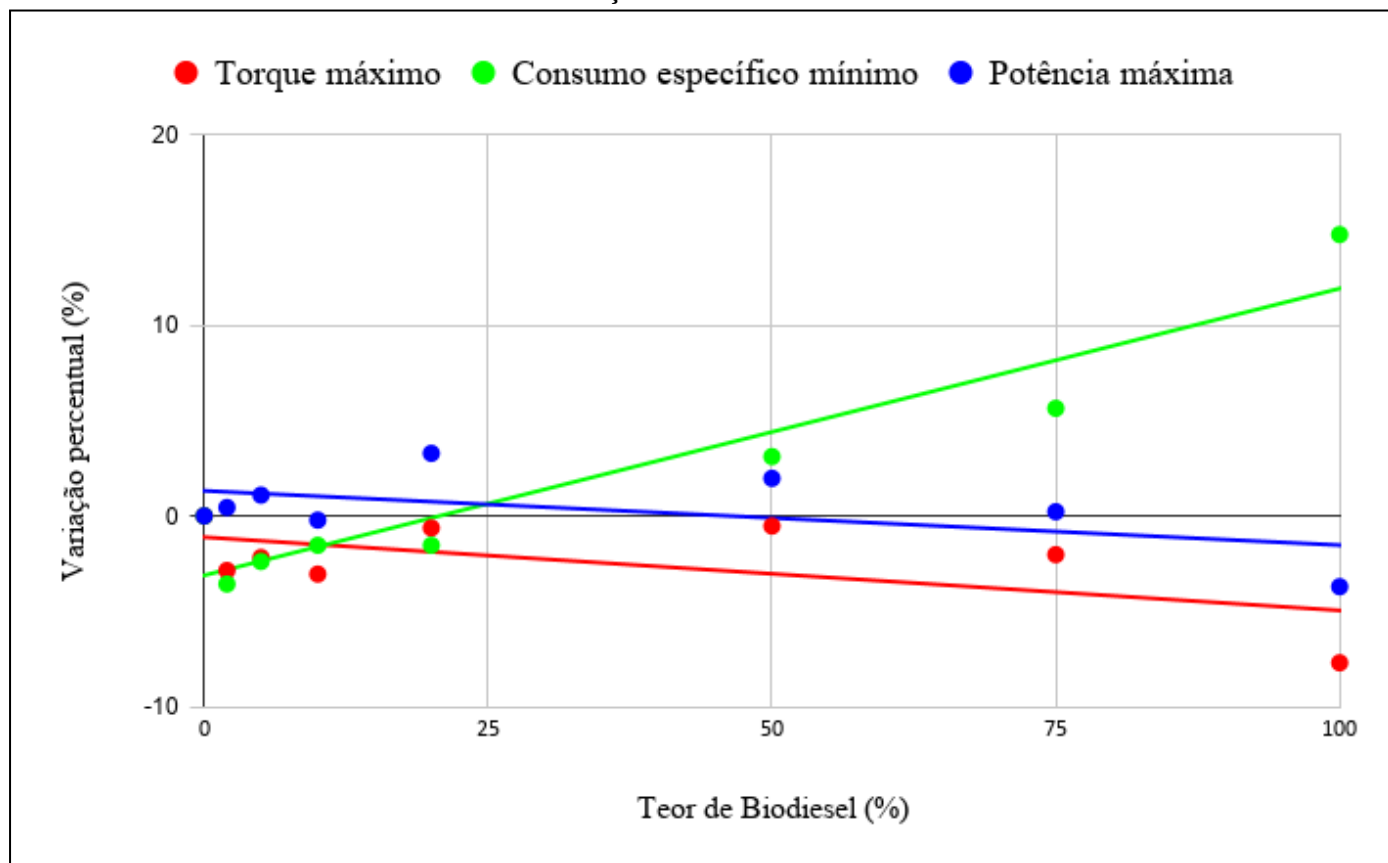
Quadro 23 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R²) das emissões de CO₂, HC e NO_x em função do teor de biodiesel.

Parâmetro avaliado	Equação da reta	Coeficiente de determinação (R ²)
Emissão de HC	$y = -0,178x - 1,4667$	0,839339551
Emissão de CO ₂	$y = -0,332x - 3,4667$	0,884301057
Emissão de NO _x	$y = -0,289x - 3,65$	0,92466632

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Castellanelli (2015).

A figura 6 contém o gráfico obtido através dos dados de potência e torque máximos e consumo específico mínimo de combustível do ensaio desenvolvido por Castellanelli et al. (2008).

Figura 6 - Variação de potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo em função do teor de biodiesel.



Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Castellanelli et al. (2008).

O quadro 24 apresenta as equações da reta e os valores de coeficiente de determinação dos parâmetros de potência e torque máximos e consumo específico mínimo de combustível.

Quadro 24 - Equações da reta e coeficientes de determinação (R^2) da potência máxima, torque máximo e consumo específico mínimo.

Parâmetro avaliado	Equações da reta	Coeficiente de determinação (R^2)
Potência máxima	$y = -0,0285x + 1,3162$	0,284496254
Torque máximo	$y = -0,0384x - 1,1147$	0,359818036
Consumo específico mínimo	$y = 0,1504x - 3,1168$	0,889238506

Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados de Castellanelli et al. (2008).

4.3 Discussão da análise estatística

As equações da reta possuem como variável independente a proporção de biodiesel na mistura e como variáveis dependentes os parâmetros de torque, potência, consumo e emissões, sendo que o coeficiente angular das equações representa a variação média desses parâmetros para cada aumento de 1% na fração de biodiesel. Em todos os estudos, as equações da reta referentes aos parâmetros de potência, torque e emissões possuem coeficientes angulares negativos, indicando suas reduções conforme o aumento do teor de biodiesel na mistura. O consumo específico, em contrapartida, possui equações da reta com coeficientes angulares positivos, indicando o seu aumento conforme a adição de biodiesel à mistura.

Logo, foi possível identificar a redução progressiva das emissões de poluentes, reforçando o potencial ambiental do biodiesel em misturas mais elevadas. Ademais, verificou-se uma tendência de aumento do consumo específico de combustível conforme a elevação da fração do biodiesel. No tocante à variável de desempenho, avaliada na forma de potência e torque médios ao longo da faixa de operação do motor no caso de Brunelli (2009), e potência e torque máximos nos demais estudos, apesar das equações das retas apresentarem coeficientes angulares negativos, a tendência deve ser analisada com cautela, pois alguns estudos apresentaram resultados de coeficiente de determinação (R^2) baixos.

O coeficiente de determinação indica a proporção da variação da variável dependente (parâmetro analisado), representada no eixo y, que é explicada pela variável independente (teor de biodiesel) no modelo, representada no eixo x, sendo que valores mais próximos de 1 representam melhor ajuste do modelo aos dados.

No tocante ao desempenho do motor, no caso de Castellani et al. (2008), os baixos valores do coeficiente de determinação de potência e torque máximos - respectivamente 0,284496254 e 0,359818036 - podem ser explicados, uma vez que o estudo deixa claro que as variáveis não dependem exclusivamente do teor de biodiesel, sendo fortemente influenciadas pela rotação do motor e por fenômenos físico-químicos associados ao processo de combustão. Dessa forma, mesmo em condições padronizadas de desempenho máximo e mínimo, a resposta dos parâmetros ao teor de biodiesel não é perfeitamente linear. Notou-se uma queda de linearidade, por exemplo, no comportamento dos dados de Castellani et al. (2008) na mistura B20, a qual desenvolveu potência e torque muito próximos e, em alguns casos, até mesmo superiores ao diesel convencional. Além disso, conforme discutido anteriormente, os dados de Castellani et al. (2008) não possuem uma tendência de

crescimento ou decrescimento consistente, existindo muitas variações, as quais resultaram, consequentemente, em uma maior dispersão dos dados. No entanto, em concordância com os demais estudos, os resultados dos autores apresentaram reduções mais expressivas nos parâmetros de desempenho quando comparados ao diesel mineral em teores mais elevados de biodiesel, como B75 e B100. É importante destacar que os baixos valores de R^2 não indicam ausência de tendência, e sim uma limitação do modelo linear em descrever integralmente o fenômeno analisado. Reforça-se, no entanto, que a ferramenta ainda assim é útil para fins comparativos.

Adicionalmente, observou-se que Castellanelli (2015) obteve baixo R^2 de potência máxima (0,281349393) e alto R^2 de torque máximo (0,810919489). Essa diferença pode ser associada ao comportamento não linear dos dados de potência, uma vez que B50 apresentou valores próximos e até superiores ao diesel convencional em determinadas faixas de rotação, sendo a sua potência máxima a maior entre os combustíveis testados. Por outro lado, os dados de torque máximo do autor apresentaram reduções graduais entre B0, B50 e B100, o que proporcionou um melhor ajuste linear.

Diferentemente dos autores previamente mencionados, os dados adquiridos por Aguiar et al. (2016) obtiveram elevados coeficientes de determinação tanto na potência máxima (0,939487598), quanto no torque máximo (0,941151043). Isso pode ser explicado porque, neste trabalho, as variáveis analisadas apresentaram tendências progressivas e consistentes, com redução gradual do desempenho do motor à medida em que se aumentava a proporção do biodiesel, sem a ocorrência de oscilações abruptas entre os pontos experimentais. Essa menor dispersão de dados favoreceu o ajuste por regressão linear simples, resultando em valores mais elevados de R^2 quando comparados aos demais estudos, nos quais o comportamento das variáveis se mostrou mais irregular ou dependente de múltiplos fatores operacionais.

Com relação aos dados de Brunelli (2009), observou-se um coeficiente de determinação moderado (0,600830969). Diferentemente dos demais autores, Brunelli (2009) apresentou dados de valores médios ao longo da faixa de operação do motor, incorporando diferentes regimes de rotação e condições de carga, o que introduziu maior variabilidade, reduzindo, consequentemente, o ajuste linear perfeito.

No tocante ao consumo específico mínimo, a diferença observada entre os coeficientes de determinação obtidos por Castellanelli et al. (2008) e Castellanelli (2015) - respectivamente 0,889238506 e 0,672460252 -, possivelmente relaciona-se ao fato de que o estudo de 2008 testou variadas proporções de biodiesel, permitindo a obtenção de um

conjunto de dados mais representativo. Além disso, apesar de B2 ter apresentado um consumo específico mínimo inferior ao diesel, ainda assim há uma tendência relativamente linear de aumento, quanto maior for a concentração de biodiesel na mistura. Em contrapartida, o de 2015 analisou um número reduzido de amostras, uma vez que o seu foco estava na análise técnico-econômica de uma condição operacional real, que geralmente tende a apresentar maior variabilidade. Além disso, foi observado que a mistura B50 apresentou o menor consumo específico mínimo, o que reduziu a linearidade dos dados. Ademais, notou-se um aumento expressivo em B100, em comparação com os demais combustíveis testados. Em relação ao estudo de Brunelli (2009), foi possível verificar que o R^2 do consumo específico médio de combustível indicou um comportamento mais uniforme dessa variável, com aumentos graduais conforme a adição de biodiesel à mistura. Devido a isso, o coeficiente de determinação apresentou valor bem próximo de 1 (0,956841675).

No que tange às emissões, as variações percentuais de índice de fumaça apresentadas por Brunelli (2009) e emissões de HC, CO₂ e NO_x obtidas através dos dados de Castellanelli (2015) apresentaram uma tendência de redução uniforme, conforme o incremento de biodiesel à mistura, com coeficientes de determinação próximos a 1, sendo a redução mais expressiva a do índice médio de fumaça (0,960390186).

5. DISCUSSÃO INTEGRADA

A presente seção visa destacar, através da comparação entre estudos, os principais pontos de discordância e consenso entre os diferentes ensaios realizados, bem como a verificação de tendências quanto ao desempenho, consumo de combustível e emissões quando o motor diesel é alimentado por diesel convencional, biodiesel puro e misturas.

De modo geral, os estudos analisados apresentaram resultados convergentes quanto à viabilidade técnica do uso do biodiesel em motores diesel. Autores como Aguiar et al. (2016) e Souza, Guarieiro e Santos (2016) observaram pequenas reduções de potência e torque acompanhadas de um leve aumento no consumo específico de combustível com a adição de biodiesel à mistura, e o comportamento foi atribuído, principalmente, ao menor poder calorífico do biodiesel e, em alguns casos, à maior viscosidade, que dificulta a atomização e, consequentemente, o processo de combustão.

Porém, estudos como o desenvolvido pelos autores Castellanelli et al. (2008) revelaram que, apesar do biodiesel puro apresentar valores de torque e potência inferiores ao diesel mineral em todas as faixas de rotação, ainda assim a mistura B20 desenvolveu a maior

potência entre todas as amostras testadas, enquanto o torque resultou em um valor bem próximo ao óleo diesel. Esse comportamento indica que a resposta do motor não segue uma tendência estritamente linear com o aumento do teor de biodiesel, sendo influenciada pelas condições de operação, especialmente a rotação do motor.

No estudo de Aguiar et al. (2016), os autores observaram que os valores de potência e torque para a mistura B20 ficaram muito próximos aos do diesel em determinadas condições de operação. Tal comportamento também é observado por Souza, Guarieiro e Santos (2016), especialmente em misturas com baixo teor de biodiesel, nas quais as diferenças de desempenho em relação ao diesel também são pequenas, sobretudo em determinadas faixas de rotação.

No entanto, embora Castellaneli et al. (2008) e Aguiar et al. (2016) indiquem um bom desempenho da mistura B20, especialmente quando comparada às demais proporções testadas, os resultados de Souza, Guarieiro e Santos (2016) mostram que esse comportamento pode variar conforme a condição de operação do motor. No estudo, a mistura B5 apresentou desempenho ligeiramente superior ao diesel em altas rotações, enquanto em outras faixas de operação os valores de torque permaneceram muito próximos entre si, sem diferenças relevantes.

Pontua-se como ponto de convergência entre todos os trabalhos consultados a existência de uma influência direta no desempenho do motor ao se utilizar o biodiesel, devido às suas características e propriedades físico-químicas particulares, tais como o número de cetano, densidade, viscosidade, tensão superficial e poder calorífico. No caso específico de Souza, Guarieiro e Santos (2016), essa relação é evidenciada de forma mais direta, uma vez que o aumento do número de cetano favorece a ignição e reduz o atraso de combustão, enquanto a viscosidade mais elevada pode tanto reduzir perdas no sistema de injeção quanto prejudicar a atomização do combustível, afetando a qualidade da combustão, segundo interpretação dos autores a partir do comportamento observado nos ensaios.

O trabalho conduzido por Brunelli (2009) também comprova que, a depender da matéria-prima utilizada, a resposta do motor tende a diferir. O autor utilizou biodiesel de soja, mamona e dendê, e as diferentes propriedades das matérias-primas testadas influíram tanto nos parâmetros de desempenho, quanto nos de consumo e emissões.

Em relação ao consumo de combustível, é consenso entre a literatura consultada que o biodiesel puro, frente ao diesel convencional, apresenta os maiores valores. Em outras palavras, é o combustível menos econômico. Souza, Guarieiro e Santos (2016) atribuíram esse efeito principalmente ao menor poder calorífico do combustível e às alterações no

processo de injeção e atomização, os quais impactam diretamente a eficiência da combustão. No entanto, apesar da tendência ser observada, também, no ensaio conduzido por Castellanelli et al. (2008), é relevante pontuar que os autores verificaram uma aproximação de valores em rotações mais elevadas.

No quesito emissões, é possível obter informações acerca dos poluentes emitidos através dos estudos desenvolvidos por Brunelli (2019), Castellanelli (2015) e Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014). Os autores chegaram à conclusão de que a presença de biodiesel na mistura influencia significativamente o comportamento das emissões, sendo observadas, em diversos casos, reduções na opacidade da fumaça e em determinados poluentes. A possível explicação dada por Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) é que, pelo biodiesel possuir em sua composição um maior teor de oxigênio, contribui para a melhora da combustão em determinadas condições. Além disso, por ser isento de enxofre, o biodiesel também elimina emissões de SO₂ e reduz a emissão de fumaça, o que é comprovado pelo ensaio de Brunelli (2009), que apresentou uma consistente queda no índice médio de fumaça conforme o aumento do teor de biodiesel.

No entanto, ao testar a mistura ternária E15B, Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) notaram que o oxigênio em teores elevados – nesse caso, proveniente tanto do etanol quanto do biodiesel –, resultaram em um aumento na emissão de NO_x e HC, devido à, respectivamente, maior temperatura no cilindro e efeito de resfriamento do etanol. O mesmo não é observado por Castellanelli (2015), o qual constatou uma queda gradativa nos valores de ambos os poluentes mencionados, além do CO₂. Agora, em relação ao CO, os autores Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) observaram, na mistura rica E15B, um expressivo aumento, e atribuíram o resultado à fatores como combustão incompleta e atraso de autoignição. No entanto, essas divergências já eram esperadas, pois os autores fizeram uso de misturas com composições diferentes, uma vez que Castellanelli (2015) testou misturas binárias, entre diesel e biodiesel, enquanto Labeckas, Slavinskas e Mazeika (2014) fizeram uso de mistura ternária entre diesel, biodiesel e etanol.

É válido mencionar que a literatura não restringiu o uso do biodiesel como sendo benéfico apenas na esfera ambiental. Isso é comprovado através do trabalho de Castellanelli (2015) que, em sua análise, apontou o biocombustível em questão como uma alternativa financeiramente viável em sistemas de geração estacionária, com retorno financeiro rápido.

Diante desse contexto mais amplo de análise, envolvendo aspectos de consumo, desempenho e viabilidade econômica, pode-se afirmar que a análise comparativa cruzada revelou que a aplicação do biodiesel é tecnicamente segura e viável, desde que sejam

respeitados os limites de teor de mistura utilizados em cada aplicação, sendo que o teor ideal depende de onde e como o biocombustível é aplicado, e para que fim. Foi possível verificar que misturas de baixo a moderado teor, como B5 e B20, apresentam valores de desempenho e consumo similares aos do diesel convencional, principalmente em altas faixas de rotação do motor. Por outro lado, teores mais elevados, como B75 e B100, apesar de propiciarem expressiva redução de emissões, resultaram em quedas nos parâmetros de potência e torque e elevado consumo de combustível frente ao diesel. Apesar disso, o estudo de Castellaneli (2015) demonstrou que a mistura B50, com concentração moderada de biodiesel, apresentou comportamento satisfatório nos quesitos de desempenho e consumo de combustível.

Adicionalmente à análise comparativa cruzada entre os estudos, a fim de verificar tendências nos parâmetros de interesse, aplicou-se a técnica de regressão linear simples aos trabalhos selecionados. No entanto, é importante frisar que os resultados devem ser interpretados com cautela, uma vez que são diretamente impactados pelo número de amostras e, principalmente, pelas condições de ensaio, equipamentos e motores utilizados, procedimentos metodológicos, particularidades e finalidades de cada trabalho consultado. Por isso mesmo, recomenda-se, para fins de interpretação, aliar o tratamento dos dados quantitativos à análise comparativa cruzada, onde as particularidades de cada ensaio são abordadas. Portanto, a proposta da análise estatística não é ser conclusiva, uma vez que possui limitações, as quais foram especificadas no decorrer do trabalho. Na verdade, a técnica é empregada como uma ferramenta auxiliar, capaz de indicar a possível existência de uma tendência global.

Sendo assim, do ponto de vista estatístico, pode-se afirmar que os resultados revelaram que o comportamento das variáveis analisadas não se mostrou uniforme entre os estudos. Enquanto o consumo específico e as emissões apresentaram, majoritariamente, forte correlação linear com o teor de biodiesel, com tendências bem definidas, o desempenho do motor, representado pela potência e torque, apresentou maior variabilidade e menor ajuste ao modelo de regressão linear.

Observou-se, em todos os trabalhos analisados, coeficientes angulares negativos para potência e torque, indicando tendência de redução dessas variáveis conforme o aumento do teor de biodiesel. No entanto, há diferenças quanto aos coeficientes de determinação, sendo a tendência mais assertiva a avaliada através do estudo de Aguiar et al. (2016), devido à ausência de discrepâncias e comportamento mais consistente de seus dados, apresentando curvas progressivas. O coeficiente de determinação inferior dos demais estudos é associado, principalmente, à maior influência da rotação nos parâmetros de potência e torque, resultando

em oscilações entre as misturas avaliadas, maior dispersão de dados e, portanto, menor ajuste ao modelo linear. Dessa forma, ainda que tenham sido utilizados dados referentes às condições ótimas de operação do motor a fim de atenuar a heterogeneidade entre estudos, o efeito da rotação e das particularidades de cada ensaio ainda assim se sobressaiu na maioria dos estudos avaliados, impactando diretamente os parâmetros de potência e torque.

Por outro lado, o consumo específico de combustível e as emissões apresentaram, de maneira mais consistente, coeficientes angulares positivos e negativos, respectivamente, com valores elevados de R^2 , evidenciando tendências bem definidas de aumento do consumo e redução das emissões conforme a adição de biodiesel à mistura.

Diante do exposto, os resultados da análise estatística sugerem que, embora o biodiesel apresente vantagens ambientais claras, o desempenho do motor em termos de potência e torque varia significativamente em função das condições operacionais de ensaio e suas particularidades e a operação do motor. Assim, reforça-se que o biodiesel é viável, desde que suas limitações sejam consideradas e respeitadas.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho procurou, essencialmente, verificar a aplicabilidade do biodiesel em motores ciclo Diesel, por meio da análise de dados pertinentes ao desempenho, consumo de combustível e emissões, obtidos através de ensaios experimentais diversos. Focou-se, principalmente, nas discussões realizadas pelos autores, a fim de interpretar os resultados obtidos com clareza, tendo como foco a influência exercida pelas características físico-químicas do biodiesel sobre o funcionamento do motor.

Como apoio à análise qualitativa, foi realizada complementarmente uma estatística, com a aplicação da técnica de regressão linear simples. No entanto, devido à limitações tais como o tamanho amostral reduzido e a heterogeneidade entre estudos, o tratamento quantitativo de dados não representa, isoladamente, resultados conclusivos, e sim tendências globais.

De maneira geral, os estudos envolvendo misturas diesel-biodiesel apresentaram reduções no nível de emissões. Isso se deve à, principalmente, maior teor de oxigênio e número de cetano, e à isenção de enxofre na composição do biodiesel. Esses fatores proporcionam uma combustão mais completa e eficiente no motor, o que acaba por reduzir a emissão de poluentes à atmosfera. Entretanto, mesmo que o biodiesel puro apresente reduções expressivas no nível de emissões frente ao diesel, os estudos analisados mostraram que sua utilização em motores sem alterações pode resultar em reduções de potência e torque, além de aumentar o consumo de combustível.

Ainda no quesito emissões, notou-se que, ao adicionar etanol à mistura diesel-biodiesel, há um aumento nas emissões de HC, NO_x e CO. Isso se deve a particularidades do etanol, tais como baixo número de cetano e alto calor latente de vaporização, sendo o último responsável pelo efeito de resfriamento. Adicionalmente, o etanol aumenta o teor de oxigênio na mistura, o que pode alterar a temperatura e a dinâmica de combustão no interior do motor.

No que tange ao desempenho, pode-se afirmar que possui uma tendência de variação conforme as condições e finalidades do ensaio, procedimentos metodológicos, rotação, tipo motor e biodiesel, e suas características físico-químicas, com destaque para a viscosidade, densidade, número de cetano e teor de oxigênio, por alterarem o processo de combustão.

Por isso mesmo, a análise estatística feita evidenciou comportamento não linear entre os estudos considerados neste parâmetro em especial. Dessa forma, apesar de existir uma tendência geral de queda de torque e potência conforme o incremento de biodiesel, a

regressão linear simples apresentou, em alguns casos, coeficientes de determinação baixos, por ser mais suscetível às particularidades de cada ensaio e exigir, portanto, uma examinação mais complexa.

Com relação ao consumo de combustível, há uma tendência bem definida de aumento conforme a adição de biodiesel à mistura. Portanto, o biodiesel puro mostrou-se ser o menos econômico entre o diesel e as misturas testadas. Ademais, nos ensaios analisados, tanto o consumo quanto as emissões não apresentaram resultados discrepantes, aumentando e diminuindo respectivamente de forma progressiva, conforme o aumento da concentração de biodiesel na mistura. Dessa forma, o modelo de regressão linear adequou-se melhor à ambos os parâmetros, decido às suas tendências mais consistentes.

A revisão de literatura e análise estatística destacaram B5 e B20 como misturas equilibradas nas três grandezas avaliadas. Observou-se que, de maneira geral, o biodiesel tende a comportar-se de maneira similar ao diesel comercial quando o motor opera em faixas de rotação elevadas. A mistura B20, em especial, desenvolveu valores de torque e potência bem próximos aos do diesel mineral, podendo até, em alguns casos, alcançar valores superiores, e consumo de combustível menor, em certas faixas de rotação. Já a mistura B5 apresentou resultados satisfatórios associados ao aumento moderado da viscosidade, o qual poderia reduzir perdas no sistema de injeção sem comprometer significativamente a pulverização do combustível. A mistura B50, com concentração mais moderada, também apresentou resultados satisfatórios em uma aplicação específica, alcançando valores de potência máxima e consumo específico mínimo superiores ao diesel.

Portanto, a revisão dos estudos possibilitou inferir que misturas com baixos e moderados teores de biodiesel tendem a não prejudicar o funcionamento do motor e também não aumentam o consumo de combustível de forma expressiva, com a vantagem de poluir menos o meio ambiente. Dessa forma, a combinação entre o diesel e o biodiesel é uma alternativa energeticamente sustentável e tecnicamente segura, desde que os limites de concentração e as particularidades de cada aplicação sejam respeitadas..

Como proposta para projetos futuros, sugere-se o aprofundamento da análise estatística por meio de modelos mais complexos e robustos, de maneira a representar de forma mais adequada o comportamento, em especial, dos parâmetros de potência e torque. Sugere-se, também, a transformação dos dados dos diferentes estudos analisados no presente trabalho em um modelo único, que seja capaz de prever o comportamento de diferentes motores conforme a variação de biodiesel. Além disso, recomenda-se o estudo de novas formas de otimização das propriedades físico-químicas do biodiesel, a fim de o motor diesel,

sem a necessidade de realização de ajustes ou alterações em seu projeto original, conseguir comportar misturas com teores superiores de biodiesel. Por fim, destaca-se a importância da realização de ensaios considerando misturas ternárias entre diesel, biodiesel e etanol, testando um maior número de proporções entre os três combustíveis, com o fim de identificar condições que minimizem o aumento das emissões de HC, NO_x e CO.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Márcio Alves de; PEDROZA, Marcelo Mendes; SERRA, Juan Carlos Valdés; ZUKOWSKI JÚNIOR, Joel Carlos; PAU, Felipe Soto; MARINHO, João Pedro da Silva. **Análise de desempenho de um motor agrícola com uso de diesel e biodiesel de soja (Glycine max) da região do Matopiba, Tocantins, Brasil**. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 5, n. 4, p. 566–586, 2016.

ANP (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS). **Produção e fornecimento de biocombustíveis**. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis>>. Acesso em: 20 abr. 2026.

BARBOSA, Ronald Leite; SILVA, Fábio Moreira da; SALVADOR, Nilson; VOLPATO, Carlos Eduardo Silva. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel**. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588–1593, set./out. 2008.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia. Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB)**. Brasília, DF: MME, [2025]. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/biodiesel/pnpb>>. Acesso em: 2 nov. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **E30 e B15 entram em vigor em todo o Brasil**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 1 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/e30-e-b15-entram-em-vigor-em-todo-o-brasil>>. Acesso em: 21 jun. 2026.

BRUNELLI, José Carlos. **Avaliação do desempenho de motores ciclo Diesel utilizando biodiesel de diferentes matérias-primas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BUSSAB, Wilton de Oliveira; MORETTIN, Pedro Alberto. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

CASTELLANELLI, C.A. **Auto-suficiência energética no horário de ponta: análise técnico-econômica de geradores operados com diesel e biodiesel obtido através do óleo de fritura usado**. *Revista Espacios*, v. 36, n. 19, p. 10, 2015. Disponível em: <<https://www.revistaespacios.com/a15v36n19/15361910.html>>. Acesso em: 15 mar. 2026.

CASTELLANELLI, M.; SOUZA, S. N. M. de; SILVA, S. L.; KAILER, E. K. **Desempenho de motor ciclo diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel**. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 145-153, jan./mar. 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/2025**. Brasília, 2025. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 20 abr. 2026.

DEVORE, Jay L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/claude/files/2020/09/Probabilidade-e-Estatistica-para-Engenharia-e-Ciencias-Devore.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Soja: dados econômicos**. Londrina: Embrapa Soja, [2025]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 2 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2025**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 20 abr. 2026.

FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto; SILVA JÚNIOR, José Alexandre da. **Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r)**. Revista Política Hoje, Recife, v. 18, n. 1, p. 115–146, 2009.

HONÓRIO, Glaucio Gualtieri. **Panorama da produção de biodiesel no Brasil: situação atual e perspectivas**. Dataset Reports, v. 3, n. 1, p. 257–261, 2024. DOI: 10.58951/dataset.2024.041.

LABECKAS, G.; SLAVINSKAS, S.; MAZEIKA, M. **The effect of ethanol–diesel–biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine**. Energy Conversion and Management, v. 79, p. 698–720, 2014. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.12.064.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MONTGOMERY, Douglas C.; PECK, Elizabeth A.; VINING, G. Geoffrey. **Introduction to linear regression analysis**. 5th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

MORENO, Luisa Zanolli; MORCILLO, André Moreno. **Comparação de duas médias: teste t de Student**. Campinas, SP, 2019.

SELL, Isair. **Utilização da regressão linear como ferramenta de decisão na gestão de custos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, XII., 2005, Florianópolis, SC. Anais [...]. São Leopoldo: ABCustos, 2005. p. 1-13.

SILVA, Carla Silva da; SAMÁ, Suzi. **Estatística: volume II**. Rio Grande: Ed. da FURG, 2021. E-book. 247 p. ISBN 978-65-5754-047-3.

SOUZA, L. S. A.; GUARIEIRO, L. L. N.; SANTOS, A. A. B. **Avaliação experimental do desempenho de motores do ciclo diesel utilizando misturas biodiesel/diesel marítimo**. Revista Virtual de Química, v. 8, n. 4, p. 1192–1203, 2016.