



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

DOUTORADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

MÁRCIO AUGUSTO SAMPAIO DE CARVALHO

AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE DIETIL-ÉTER EM
MISTURAS DIESEL- BODIESEL-ETANOL APLICADAS
A MOTORES DIESEL



SALVADOR
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

MÁRCIO AUGUSTO SAMPAIO DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE DIETIL-ÉTER EM MISTURAS DIESEL- BIODIESEL-
ETANOL APLICADAS A MOTORES DIESEL**

Salvador

2020

MÁRCIO AUGUSTO SAMPAIO DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE DIETIL-ÉTER EM MISTURAS DIESEL- BIODIESEL-
ETANOL APLICADAS A MOTORES DIESEL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Industrial.

Orientadores:

Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres

Prof. Dr. Julio Augusto Mendes da Silva

Coorientador:

Prof. Dr. Vitor Pinheiro Ferreira

Salvador

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

C331 Carvalho, Márcio Augusto Sampaio de.
Avaliação da adição de dietil éter em misturas diesel-
biodiesel-etanol aplicadas a motores diesel / Márcio Augusto
Sampaio de Carvalho. – Salvador, 2020.
116 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres.
Prof. Dr. Julio Augusto Mendes da Silva.
Coorientador: Prof. Dr. Vitor Pinheiro Ferreira.

Tese (doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Escola
Politécnica, 2020.

1. Motores a diesel. 2. Biocombustíveis. 3. Etanol. 4.
Biodiesel. I. Torres, Ednildo Andrade. II. Silva, Júlio Augusto
Mendes da. III. Ferreira, Vitor Pinheiro. IV. Universidade
Federal da Bahia. V. Título.

CDD.: 621.436

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE DIETIL-ÉTER EM MISTURAS DIESEL- BIODIESEL-ETANOL APLICADAS A MOTORES DIESEL

MÁRCIO AUGUSTO SAMPAIO DE CARVALHO

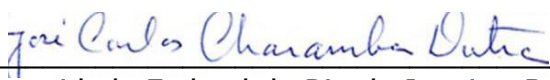
Tese submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Industrial.


Examinada por:

Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres 
Doutor em Engenharia Mecânica, pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1999

Prof. Dr. Julio Augusto Mendes da Silva 
Doutor em Engenharia Mecânica, pela Universidade de São Paulo, Brasil, 2013

Prof. Dr. Vitor Pinheiro Ferreira 
Doutor em Energia e Ambiente, pela Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2013

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra 
Doutor em Engenharia Mecânica, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 1997

Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos 
Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil, 1990

Prof. Dr. Jorge José Gomes Martins 
Doutor em Engenharia, pela Universidade de Birmingham, Inglaterra, 1989

Prof. Dr. José Ricardo Sodré 
Doutor em Engenharia Mecânica, pela Universidade de Manchester, Inglaterra, 1995

Salvador, BA - BRASIL
09/2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais: por todo o amor, incentivo e presença em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo e sempre.

À minha família, por ser presente e constante em minha vida.

Principalmente à minha esposa, Sheila Adriana, por todo amor, companheirismo e motivação. Aos meus sogros, por todo apoio nesse período.

Ao professor Ednildo, pelo acolhimento no início deste projeto, pela orientação, conselhos e pela disponibilização do laboratório de motores para as atividades experimentais.

Ao orientador e amigo Julio, pela orientação honesta, sincera e motivadora.

Ao coorientador e amigo Vitor, que atuou como um grande mentor do trabalho e articulador em momentos importantes.

Aos estudantes de engenharia mecânica, entre eles, Lucas, Pedro, Feliciano e Rafael, que ajudaram de forma voluntária em atividades experimentais no laboratório de motores.

A Pedro Ventin e João Felipe, pela grande parceria na realização dos experimentos e manutenção do dinamômetro.

Aos colegas e amigos do LEN; à Verinha, por todo o carinho e incentivo.

Ao programa deste doutorado, o PEI. Aos coordenadores Márcio e Elaine; aos queridos: Cristiano, Tati, Tamiles e Robinson; sempre sorridentes, prestativos e amistosos.

Agradeço o apoio financeiro do CNPQ, CAPES e PROAP.

À UFBA, por mais essa etapa acadêmica.

À UFRB, pela parceria na realização de parte dos ensaios experimentais do doutorado. Aos professores do CETEC, Valentim e, em especial, Acbal, pela parceria amistosa.

À UFOB, minha instituição; em especial ao colega, professor Jorge, que contribuiu bastante nas discussões técnicas da metodologia do trabalho.

Aos professores Jorge Martins e Magin Lapuerta, que em poucos momentos, contribuíram de maneira grandiosa no direcionamento do trabalho.

À Petrobahia, pelos combustíveis disponibilizados para os ensaios. Agradecimento especial a Gilson, pela ajuda de forma amistosa.

Obrigado ao Roberto, da empresa Fraipe, pela ajuda e empatia demonstrada em uma fase importante do trabalho; exemplo de profissionalismo e qualidade no serviço de recuperação do dinamômetro.

Enfim, agradecimentos a todos que nos ajudaram nas etapas deste doutorado.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira, você chega lá.”

Ayrton Senna.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 Exemplos de Legislações de Emissões.....	18
Figura 4.1 Motor diesel utilizado nos ensaios experimentais.....	47
Figura 4.2 Dinamômetro utilizado nos ensaios.....	48
Figura 4.3 Sistema de medição de combustível	51
Figura 4.4 Analisadores de gases. a) Optima 7; b) NAPRO PC Multigás.....	52
Figura 4.5 Balança para pesagem dos filtros de MP.	53
Figura 4.6 Representação da bancada experimental.	53
Figura 4.7 Combustíveis utilizados nos ensaios.....	54
Figura 4.8 Bancada dinamométrica utilizada nos ensaios.....	58
Figura 4.9 Sistema de separação dos combustíveis dos ensaios	59
Figura 4.10 Espaço experimental para mistura de três componentes	64
Figura 4.11 Espaço simplex com restrições dos componentes	65
Figura 4.12 Interpretação de superfície de resposta	67
Figura 4.13 Frações de mistura de um determinado ponto	68
Figura 5.1 Resultados de torques máximos.....	70
Figura 5.2 Valores de potências máximas.....	71
Figura 5.3 Resultados de consumo específico de combustível.....	73
Figura 5.4 Resultados de eficiência do motor.....	74
Figura 5.5 Emissões de NOx.....	76

Figura 5.6 Emissões de CO.....	77
Figura 5.7 Emissões de HC.....	79
Figura 5.8 Emissões de MP.....	80
Figura 5.9 Consumo específico de combustível.....	82
Figura 5.10 Eficiência do motor.....	84
Figura 5.11 Emissões de NOx.....	85
Figura 5.12 Emissões de CO.....	87
Figura 5.13 Emissões de hidrocarbonetos.....	88
Figura 5.14 Consumo específico.....	90
Figura 5.15 Superfícies de resposta em relação ao BSFC.....	92
Figura 5.16 Eficiência do motor.....	93
Figura 5.17 Superfícies de resposta referentes à eficiência do motor.....	94
Figura 5.18 Identificação das frações dos componentes de mistura em relação à eficiência do motor; a) B20; b) Etanol; c) DEE.....	95
Figura 5.19 Emissões de NOx.....	96
Figura 5.20 Superfície de resposta em relação às emissões de NOx.....	98
Figura 5.21 Emissões de CO.....	99
Figura 5.22 Superfície de resposta em relação às emissões de CO.....	100
Figura 5.23 Composição de mistura otimizada.....	101

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 Dados do motor utilizado nos experimentos	47
Tabela 4.2 Características do dinamômetro dos ensaios experimentais	48
Tabela 4.3 Especificações de instrumentos dos ensaios.....	54
Tabela 4.4 Propriedades dos combustíveis utilizados nos ensaios	55
Tabela 4.5 Composições volumétricas das misturas de combustíveis e valores de PCI.....	55
Tabela 4.6 Especificações do motor dos ensaios	57
Tabela 4.7 Condições de ensaios do motor.....	58
Tabela 4.8 Combustíveis utilizados nos ensaios experimentais.....	61
Tabela 4.9 Composições das misturas do planejamento experimental	66
Tabela 4.10 Misturas utilizadas nos ensaios	67

Lista de Abreviaturas e Siglas

- ASTM - American Society of Testing and Materials
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- BSFC – Consumo Específico de Combustíveis
- B20 – Mistura com 20% de biodiesel e 80% de diesel.
- CA – Ângulo do Virabrequim; “Crank Angle”
- CO – Monóxidos de Carbono.
- CVS – Túnel de diluição a volume constant (do inglês: “Constant Volume Sample”)
- DEE – Dietil éter (do inglês: di-ethyl ether).
- EN – Normas Europeias (European Standards)
- HRR – Taxa de liberação de calor (do inglês “Heat Release Rate”)
- HV - Entalpia de vaporização, ou, calor latente de vaporização; (do inglês: “heat of vaporization”)
- ICO – Ignição por Compressão
- ICE – Ignição por Centelha
- ID – Tempo de Atraso na Ignição “Ignition Delay”
- Lambda (λ) – Compreende a relação entre a mistura ar-combustível real e a mistura ar-combustível estequiométrica
- MCI – Motores de Combustão Interna
- MP – Material Particulado
- NC – Número de Cetano
- NO_x – Óxidos de nitrogênio (NO e NO₂)
- PCI – Poder Calorífico Inferior
- S10 – 10 ppm de enxofre.
- SO_x – Óxidos de enxofre.
- HC – Hidrocarbonetos não queimados.
- v/v – Volume/Volume (sigla utilizada para enfatizar as misturas em frações volumétricas).

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Objetivo	21
1.2	Objetivos Específicos	21
1.3	Justificativa	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Motores de Combustão Interna de Ignição por Compressão	24
2.1.1	A qualidade da ignição de motores ICO	24
2.1.2	Propriedades dos combustíveis e o processo de injeção	25
2.1.3	Emissões de NOx provenientes de motores diesel	27
2.2	O uso de biocombustíveis em motores diesel	29
2.2.1	O Biodiesel	31
2.2.2	Etanol em Motores Diesel.....	34
2.2.3	O Dietil Éter	36
3	Revisão da Literatura.....	37
3.1	O biodiesel em misturas com o diesel	37
3.2	O uso do etanol em misturas	38
3.3	Aplicações do DEE em misturas	40
3.4	Análise Crítica da Revisão Bibliográfica	43
4	METODOLOGIA	46

4.1 Avaliação do desempenho e emissões de um motor diesel utilizando o DEE em misturas com o diesel, biodiesel e etanol	46
4.1.1 O motor diesel	46
4.1.2 O dinamômetro	48
4.1.3 As condições do motor utilizadas nos ensaios	49
4.1.4 A instrumentação	50
4.2 Avaliação do uso do DEE em misturas biodiesel-etanol	57
4.2.1 O motor utilizado nos ensaios	57
4.2.2 A bancada dinamométrica	57
4.2.3 As condições de ensaios dos experimentos	58
4.2.4 A instrumentação	59
4.2.5 Os combustíveis dos ensaios	61
4.3 Avaliação dos efeitos das proporções de etanol e DEE em misturas diesel-biodiesel por meio de análise multivariada e superfície de resposta.....	62
4.3.1 O planejamento experimental das misturas	62
4.3.2 Os combustíveis básicos para preparação das misturas	68
4.3.3 O motor e a bancada dinamométrica	69
4.3.4 As condições de carga dos ensaios	69
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1 Resultados da avaliação do desempenho e emissões de um motor diesel utilizando o DEE em misturas com o diesel, biodiesel e etanol	70
5.1.1 Desempenho	70

5.1.2 Resultados de Emissões	75
5.2 Resultados do uso do DEE em misturas biodiesel-etanol	82
5.2.1 Desempenho do motor	82
5.2.2 Resultados de emissões	85
5.2.3 Emissões de CO.....	86
5.2.4 Emissões de HC.....	88
5.3 Resultados da avaliação das proporções de etanol e DEE em misturas diesel-biodiesel por meio de análise multivariada.....	90
5.3.1 Resultados de desempenho	90
5.3.2 Resultados de emissões	96
5.3.3 Compromisso em emissões de NOx e eficiência do motor	100
6 Conclusões	102
7 Sugestões de trabalhos futuros	106

Resumo

Neste trabalho foi realizada uma avaliação do uso de dietil éter (DEE) em misturas com os combustíveis diesel, biodiesel e etanol. Foram desenvolvidos três aparatos experimentais: o primeiro deles usou diesel puro (D100), B20 (80% de diesel + 20% de biodiesel), B20E (B20 + 10% de etanol) e B20E+DEE (B20E + 5% de DEE); no segundo, em um outro motor, foram testados D100, B100 (biodiesel puro), BE20 (80% de biodiesel + 20% de etanol) e BE20+DEE (BE20 + 5% DEE); no terceiro aparato, foi realizada uma análise estatística multivariada apresentada por meio de superfície de resposta para avaliação dos efeitos das variações dos componentes etanol, DEE e B20 nos resultados de desempenho e emissões. O uso do B20E mostrou diminuição das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) em relação ao B20 (5,3% a 13%) e ao D100 (1,4% a 4,4%); porém, com o uso do BE20 as emissões de NOx aumentaram em relação ao B100 (2,4% a 19%) e ao D100 (2,5% a 21%); essas diferenças nos resultados foram atribuídas às frações de etanol utilizadas. Com a adição de DEE as emissões de NOx diminuíram; na mistura B20E+DEE, a redução em relação ao B20E foi entre 9,6% e 10,8%, nas cargas média e elevada; já na mistura BE20+DEE a redução em relação ao BE20 foi entre 3,1% e 12,7%, em todas as condições de carga. Por meio do estudo de análise multivariada foi observada a tendência de aumento das emissões de NOx com o incremento das frações de etanol nas misturas e a tendência inversa com o aumento de DEE, ou seja, redução dessas emissões. As emissões de material particulado (MP), medidas no aparato 1, reduziram com o uso do etanol na mistura B20E em relação ao B20 (20% a 48%) e ao D100 (12% a 45%); com a adição de DEE, mistura B20E+DEE, as reduções foram ainda mais expressivas, entre 59% e 71% em relação ao B20, e entre 62% e 70% em relação ao D100. As condições de carga do motor influenciaram significativamente nos resultados obtidos; na carga mais elevada, devido às temperaturas mais altas no sistema, as misturas com etanol e DEE apresentaram os melhores dados dos comparativos em relação a emissões de NOx e eficiência do motor.

Palavras Chaves: Motores diesel, biocombustíveis, etanol, biodiesel, dietil éter.

Abstract

In this work, an evaluation of the use of diethyl ether (DEE) in mixtures with diesel, biodiesel and ethanol fuels was performed. Three experimental devices were developed: the first one used pure diesel (D100), B20 (80% diesel + 20% biodiesel), B20E (B20 + 10% ethanol) and B20E + DEE (B20E + 5% DEE); in the second, in another engine, D100, B100 (pure biodiesel), BE20 (80% biodiesel + 20% ethanol) and BE20 + DEE (BE20 + 5% DEE) were tested; in the third apparatus, a multivariate statistical analysis was performed using a response surface to assess the effects of variations in the ethanol, DEE and B20 components on performance and emissions results. The use of B20E showed a decrease in emissions of nitrogen oxides (NO_x) in relation to B20 (5.3% to 13%) and D100 (1.4% to 4.4%); however, with the use of BE20, NO_x emissions increased in relation to B100 (2.4% to 19%) and D100 (2.5% to 21%); these differences in results were attributed to the ethanol fractions used. With the addition of DEE, NO_x emissions decreased; in the B20E + DEE mixture, the reduction in relation to B20E was between 9.6% and 10.8%, in medium and high loads; in the BE20 + DEE mixture, the reduction in relation to the BE20 was between 3.1% and 12.7%, in all load conditions. Through the multivariate analysis study, the trend of increasing NO_x emissions was observed with the increase of ethanol fractions in the mixtures and the reverse trend with the increase of DEE, that is, reduction of these emissions. Emissions of particulate matter (PM), measured in apparatus 1, decreased with the use of ethanol in the B20E mixture in relation to B20 (20% to 48%) and D100 (12% to 45%); with the addition of DEE, mixture B20E + DEE, the reductions were even more expressive, between 59% and 71% in relation to B20, and between 62% and 70% in relation to D100. The load conditions of the engine significantly influenced the results obtained; at the highest load, due to the higher temperatures in the system, mixtures with ethanol and DEE presented the best comparative data in relation to NO_x emissions and engine efficiency.

Keywords: Diesel engines, biofuels, ethanol, biodiesel, diethyl ether.

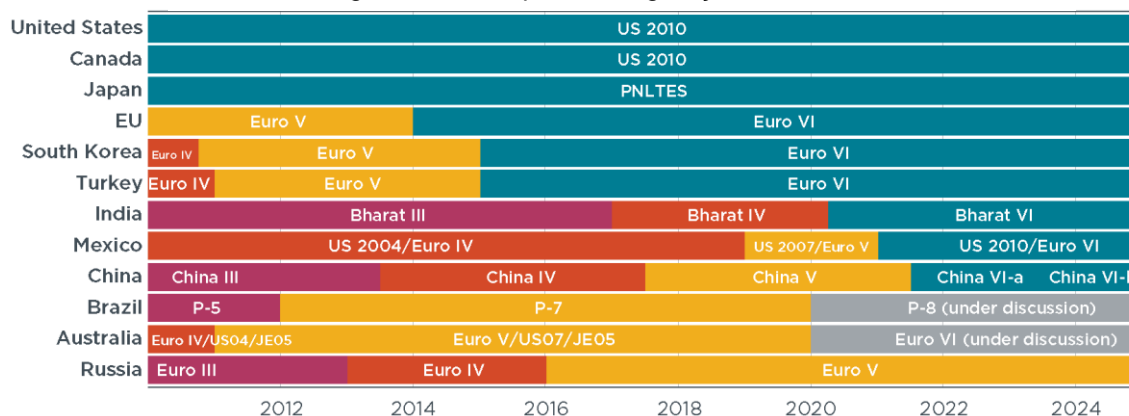
1 INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna (MCI) de ignição por compressão (ICO), popularmente conhecidos como motores a diesel, de uma forma geral, apresentam eficiência térmica mais elevada em relação a MCI de ignição por centelha (ICE). Entre as razões, estão as taxas de compressão mais elevadas, menores perdas por bombeamento (ausência de válvula borboleta) e regime de operação com excesso de ar (HEYWOOD, 1988). De acordo com Boretti (2019), alguns motores ICO chegam a apresentar picos de eficiência térmica em torno de 50% e acima de 40% ao longo de variados regimes de carga e velocidade; já motores ICE, geralmente apresentam picos de eficiência por volta de 30%, mas diminuem as eficiências em regimes de baixa carga.

Motores diesel apresentam ainda maior torque específico em baixos regimes de carga. Dessa forma, por questões técnicas e econômicas são aplicados em diversos setores, como exemplos: transportes, agrícola e industrial (CHEN *et al.*, 2019). No entanto, possuem como principais pontos adversos as elevadas emissões de óxido de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP). Naturalmente, outros poluentes também ocorrem, como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (HC) e óxidos de enxofre (SOx) em menores criticidades (GÓMEZ *et al.*, 2020; LION; VLASKOS; TACCANI, 2020).

Restrições às emissões de poluentes provindas de MCI são impostas em diferentes países por meio de legislações e normas que, compulsoriamente, impõem limites de emissões a fabricantes de motores e veículos, sob pena de não comercializarem seus produtos em caso de descumprimento desses requisitos. A Figura 1.1 mostra exemplos de legislações de emissões aplicadas aos veículos pesados em vários países do mundo.

Figura 1.1 Exemplos de Legislações de Emissões



Fonte: International Council on Clean Transportation, 2018.

As tecnologias automotivas aplicadas em motores e veículos são recursos imprescindíveis para que os fabricantes consigam obter suas certificações com relação aos limites de emissões. Entre essas, o gerenciamento eletrônico do motor integrado aos sistemas de conversão catalítica de gases foi significativamente eficaz no controle e diminuição de poluentes. Alguns limites de emissões, como MP, foram reduzidos em cerca de 100 vezes entre a fase Euro III (2001) e o início da fase Euro VI (2015) (ICCT, 2020).

O controle dos parâmetros responsáveis pela combustão mais limpa e eficiente proporcionou também a melhoria de indicadores de dirigibilidade, consumo de combustível e eficiência térmica dos sistemas. Porém, o controle efetivo de todos esses parâmetros é muito difícil de ocorrer simultaneamente. Por exemplo, a otimização de desempenho em termos de torque e potência, eleva as temperaturas da combustão e, conseqüentemente, as emissões de NOx. Como os veículos são sujeitos a regimes de trabalho transitórios, com cargas e velocidades do motor variando constantemente, o controle dessas emissões se torna ainda mais crítico. As temperaturas do sistema exercem influências no controle de emissões, uma vez que alguns sistemas de conversão catalítica só funcionam a partir de certas faixas de temperatura de trabalho. Nesse contexto, um enorme desafio é reiteradamente imposto aos fabricantes de veículos, que buscam compromissos entre parâmetros de desempenho e cumprimento dos limites legais de emissões.

A legislação brasileira ainda não regulamenta as emissões de dióxido de carbono (CO₂), que são produtos naturais da combustão e, portanto, proporcionais ao consumo de hidrocarbonetos em veículos.

Biocombustíveis aparecem como combustíveis alternativos à matriz energética e com potencial de mitigar emissões de gases poluentes e do efeito estufa, CO₂ (BILDIRICI, 2017). O oxigênio intrínseco nos biocombustíveis pode proporcionar uma combustão mais eficiente e atuar na redução de material particulado (SHI *et al*, 2006). Alguns estudos da literatura mostram que, a depender da combinação e proporção de mistura utilizada, os biocombustíveis podem proporcionar a redução simultânea de MP e NO_x (FERREIRA, 2011).

Para serem bem aceitos, combustíveis alternativos devem possuir características como serem renováveis, atóxicos, capacidade de produção em larga escala e características de desempenho e consumo similares ao combustível diesel convencional; porém, é importante ainda que apresentem menores índices de emissões de poluentes na atmosfera (FERREIRA, 2011). Além desses fatores, é importante que um combustível alternativo proporcione estabilidade, disponibilidade e efeitos positivos em relação à durabilidade dos motores (GUARIEIRO; VASCONCELLOS; SOLCI, 2011).

Entre os biocombustíveis aplicados em motores ICO, o biodiesel é considerado uma das melhores opções para substituição ou aplicação conjunta em misturas com o diesel (PALASH, 2013). No entanto, o uso comercial no Brasil ainda é limitado a baixos percentuais de biodiesel, devido à sua viscosidade excessiva e por questões de obstruções de filtros e componentes do sistema de combustível, principalmente em temperaturas mais baixas.

O relatório do Ministério das Minas e Energias (MME) (2019), apresenta o parecer de empresas ligadas ao setor automotivo no Brasil como base para elevação do uso comercial do biodiesel para 15% em volume com o diesel fóssil (B15) até 2023 (CNPE, 2018). Atualmente (outubro de 2020), o percentual obrigatório está em 12% (CNPE, 2018). Embora algumas empresas, entre elas fabricantes de automóveis, tenham emitido parecer favorável para o uso comercial do B15 (algumas validaram até 20%), outras ainda colocaram ressalvas para esse percentual.

O uso de aditivos modificadores de viscosidade e das características do combustível é uma alternativa para a melhoria do desempenho de misturas diesel-biodiesel. A adição de alguns biocombustíveis pode cumprir essa proposta, como no caso do etanol. Além disso, outras propriedades e características podem ser modificadas, como teor de oxigênio e entalpia de vaporização, entre outras.

O etanol, em princípio, é um combustível que não seria admissível para uso em motores diesel, devido ao seu número de cetano (NC) muito baixo. A literatura, entretanto, mostra um leque abrangente de pesquisas que utilizam o etanol (assim como outros tipos de álcool) em motores diesel. Podem ser destacados o elevado teor de oxigênio, a baixa viscosidade e a elevada entalpia de vaporização do etanol em relação ao diesel e ao biodiesel. Além disso, sua menor viscosidade e tensão superficial favorecem a injeção e atomização da mistura do ar com o combustível (ZHAN, 2018).

A entalpia de vaporização elevada atua na redução da temperatura da combustão e das emissões de NOx. Porém, o baixo poder calorífico inferior (PCI) e NC do etanol podem produzir efeitos adversos, como aumento do atraso da ignição (do inglês “ignition delay” - ID) da combustão. Dessa forma, essas variáveis combinadas podem apresentar resultados divergentes, de acordo com as frações de misturas e metodologias de ensaios.

Em misturas ternárias diesel-biodiesel-etanol, o biodiesel atua como um agente tensoativo, permitindo a miscibilidade do etanol em frações elevadas com o diesel, sem a necessidade de custos adicionais com aditivos para essa finalidade (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

O éter dietílico, ou dietil éter (do inglês “di-ethyl ether” - DEE) possui baixa viscosidade, teor de oxigênio relativamente elevado, densidade energética moderada (similar ao biodiesel), baixa temperatura de ignição e miscibilidade com o etanol, biodiesel e diesel (IBRAHIM, 2016). Mas a principal atratividade do DEE é o NC elevado (>120). Logo, o uso do DEE tem sido muito utilizado em pesquisas como forma de elevação do NC de misturas, principalmente no caso em que o NC foi reduzido pela aplicação do etanol.

Neste trabalho, o DEE é avaliado como aditivo em misturas com o etanol, biodiesel e diesel fóssil. Variadas combinações de misturas são utilizadas em diferentes cargas e em mais de um tipo de motor. O estudo é complementado por meio de uma abordagem de análise multivariada, que mostra os efeitos das interações entre o etanol e o DEE em diferentes frações de misturas com o diesel-biodiesel.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem o objetivo principal de avaliar o uso do DEE como aditivo em misturas com o diesel, biodiesel e etanol visando a melhoria de parâmetros de desempenho e emissões.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os efeitos do uso do DEE (2% a 10% v/v) como aditivo em misturas biodiesel-etanol e diesel-biodiesel-etanol, visando a melhoria de parâmetros de desempenho mecânico e emissões de NOx e MP.
- Avaliar os efeitos do etanol (10% a 28% v/v) como combustível aplicado em misturas com o diesel e o biodiesel.
- Avaliar o uso do biodiesel puro (B100) e na mistura B20 em relação ao diesel fóssil.
- Avaliar a influência das condições de carga do motor nos resultados de desempenho e emissões.
- Avaliar os efeitos das interações de etanol (20% a 28% v/v) e DEE (2% a 10% v/v) na mistura B20 (70% a 78% v/v) por meio de análise estatística multivariada e superfície de resposta.

1.3 Justificativa

O biodiesel tem se consolidado como um biocombustível aplicado em misturas com o diesel fóssil no Brasil e em muitos países. No entanto, alguns setores ainda colocam ressalvas para o uso em frações elevadas, principalmente em função de

questões como viscosidade excessiva e problemas de obstrução de filtros do sistema de combustível. O uso de misturas com biocombustíveis menos viscosos e com conteúdo de oxigênio mais elevado, como o etanol, é uma das formas de se aumentar as frações volumétricas de biodiesel.

As misturas do etanol com o diesel e biodiesel ainda não são utilizadas comercialmente. Em pesquisas, porém, se justificam por pontos de vista técnico e ambiental. A baixa viscosidade, o conteúdo de oxigênio e a entalpia de vaporização elevada do etanol podem proporcionar bons resultados em desempenho e emissões de poluentes (ZHAN et al., 2018). Do ponto de vista ambiental, é mais uma forma de aumentar o uso de energia proveniente da biomassa e diminuir as emissões globais de CO₂. No entanto, as misturas etanol-biodiesel-diesel (EBD) se tornam críticas em relação ao funcionamento adequado no motor com o uso de frações elevadas de etanol, devido à redução do NC.

O DEE foi identificado na literatura como um biocombustível que pode ser utilizado em misturas de combustíveis com a principal atratividade de possuir um NC elevado (~120); cerca de 20 vezes maior do que o NC do etanol (~6,5). Embora com uma grande variedade de pesquisas aplicadas, algumas lacunas ainda foram identificadas, por exemplo, em relação ao uso do DEE em misturas quaternárias (etanol, biodiesel, diesel e DEE). Somente foi identificado em Venu e Madhavan (2017) essa aplicação, porém, com proporção de misturas diferentes da utilizada neste trabalho.

Outra lacuna foi em relação às melhores proporções de DEE que poderiam proporcionar os melhores resultados de eficiência do motor e de emissões. Essa informação é importante, visto que é um produto com volatilidade muito alta, logo, que apresenta periculosidade e requer cuidados especiais em relação ao manuseio, transporte e armazenamento, além disso pode ocorrer a formação de vapor e obstrução no sistema de combustível (“*vapor lock*”).

Dessa forma, este trabalho busca a avaliação do uso do DEE em misturas, porém, como principal originalidade, foi realizado um estudo estatístico e experimental utilizando análise multivariada, que mostrou os efeitos das proporções e interações entre o DEE, o etanol e a mistura diesel-biodiesel (B20).

A ferramenta estatística utilizada é muito comum em aplicações industriais envolvendo planejamento de misturas de dois ou mais componentes. A aplicação em misturas de combustíveis para ensaios em motores de combustão interna, porém, consiste em uma inovação e em uma contribuição científica relevante, uma vez que, com a minimização do número de misturas e de ensaios, é possível a elucidação dos efeitos e a otimização dos parâmetros de acordo com os resultados esperados. Dessa forma, foi possível, além de verificar os efeitos das interações do DEE e do etanol em misturas com o B20, complementar o embasamento das discussões dos resultados obtidos nos outros dois aparatos experimentais desenvolvidos.

Algumas limitações puderam ser percebidas no trabalho, como em relação à instrumentação das pressões internas da câmara de combustão para verificar o comportamento da combustão com as diferentes propostas de combustíveis estudadas. Contudo, as discussões foram embasadas e correlacionadas com estudos da literatura. Essa abordagem foi também incluída na seção de sugestões para trabalhos futuros.

Os resultados e conclusões obtidos neste trabalho mostraram a efetividade do uso do DEE em misturas com o etanol. Um grande desafio é ainda perceptível, naturalmente, para a implementação comercial das misturas propostas. No entanto, o trabalho procura deixar as contribuições científicas e o apelo do ponto de vista ambiental em relação ao uso de biocombustíveis aplicados em motores diesel, novos e antigos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Motores de Combustão Interna de Ignição por Compressão

Motores de combustão interna (MCI) de ignição por compressão (ICO) trabalham pelo princípio da compressão do ar, de forma que ao ser injetado o combustível, com propriedades e características adequadas a esse sistema, ocorre o início da ignição pelo contato do ar quente com o jato de combustível. Logo, existe a relação entre o princípio de funcionamento do motor com as características dos combustíveis utilizados (HEYWOOD, 1988).

Como a injeção do combustível começa praticamente junto com o processo de combustão, não existe a preocupação de “detonação” da mistura ar-combustível como ocorre em motores de ignição por centelha (ICE). Dessa forma, é possível haver taxas de compressão do motor acima de 17:1 (KLAUS MOLLENHAUER; HELMUT TSCHOKE, 2010). Em motores ICE, as taxas de compressão são limitadas, normalmente entre 9 e 13:1, devido ao princípio de funcionamento desses motores (número de octanagem do combustível). O aumento da taxa de compressão influencia diretamente no aumento da eficiência térmica do motor (HEYWOOD, 1988).

2.1.1 A qualidade da ignição de motores ICO

O tempo decorrido entre o início da injeção do combustível e o momento em que a mistura ar-combustível é ignitada é definido como tempo de atraso na ignição (do inglês: *ignition delay* - ID). Esse tempo está essencialmente relacionado ao número de cetano (NC) do combustível (BEDNARSKI *et al.*, 2019). O NC pode ser considerado como a medida da qualidade de ignição ou da tendência de autoignição de um combustível no processo de compressão do motor (BEZAIRE *et al.*, 2010).

O ID deve ser curto e de forma que possa ser sempre reproduzido. Um período curto de atraso é também necessário para manter a máxima pressão dos gases no cilindro abaixo da máxima pressão que o motor pode suportar (HEYWOOD, 1988).

Quanto maior o NC, menor o ID, e vice-versa. No entanto, tanto um NC muito alto ou muito baixo, podem causar problemas operacionais do motor. Quando muito elevado, pode resultar de as combustões ocorrerem antes da mistura ar-combustível

estar adequadamente formada, resultando em combustões incompletas e emissões excessivas de fumaça preta (opacidade). Já um NC muito baixo (pior caso), o ID é prolongado excessivamente, gerando combustões incompletas e até falhas na combustão (*misfire*), além de problemas como “rugosidade” (ruídos estranhos da combustão) e demora no tempo de aquecimento do motor, entre outros (KLAUS MOLLENHAUER; HELMUT TSCHOKE, 2010).

Entre a injeção de combustível e o início da ignição estão envolvidos tanto processos químicos como físicos (ZHENG *et al.*, 2013). Os processos físicos são basicamente: a atomização do jato de combustível, a evaporação das gotículas do jato e a mistura do vapor de combustível com o ar. Os processos químicos compreendem as reações da pré-combustão do combustível com o ar que envolvem os gases residuais do processo de autoignição (HEYWOOD, 1988). Esse processo também envolve o tempo necessário para que os radicais reativos do combustível conduzam a explosões térmicas da mistura homogênea, que depende essencialmente da composição química, especialmente das concentrações de espécies de baixa volatilidade dos combustíveis (NIETO GARZÓN; OLIVEIRA; BAZZO, 2019).

Tais processos são ainda afetados por fatores como projeto do motor, variáveis operacionais e características dos combustíveis (HEYWOOD, 1988). Dessa forma, é comum a variação do comportamento das pressões e da taxa de calor liberada na combustão (do inglês: *heat release rate* – *HRR*) ao longo de cargas do motor, mesmo considerando velocidades rotacionais constantes (SOID; ZAINAL, 2011).

2.1.2 Propriedades dos combustíveis e o processo de injeção

O torque em motores ICO é variado de acordo com a quantidade de combustível injetada a cada ciclo e o fluxo de ar admitido pelo motor essencialmente não varia em mesma rotação e ao longo da carga, uma vez que não é necessária válvula “borboleta” controlando o fluxo de ar. Dessa forma, as perdas por atrito de bombeamento são reduzidas, sendo assim, mais um fator para a melhoria da eficiência mecânica e térmica em relação a motores ICE (HEYWOOD, 1988).

O processo de injeção e formação da mistura é bastante heterogêneo, com distintos valores de λ ¹ no interior da câmara. Um exemplo é a região do jato de combustível. No centro do jato de combustível, praticamente não existe a presença de oxigênio ($\lambda \approx 0$), enquanto em outras regiões da câmara de combustão existem zonas com ar puro ($\lambda \approx \infty$). Logo, os ranges existentes de misturas durante o processo de injeção de combustível podem variar significativamente ($0 < \lambda < \infty$) (KLAUS MOLLENHAUER; HELMUT TSCHOKE, 2010).

A entalpia de vaporização, ou calor latente de vaporização (do inglês: heat of vaporization – HV), corresponde ao calor necessário para a transformação do combustível líquido em vapor. Um combustível com elevada entalpia de vaporização, como o etanol, remove mais calor do ambiente da câmara em que o jato de combustível é injetado. Logo, vai existir um maior resfriamento de regiões onde ocorrem as misturas. Isso conduz ao prolongamento do ID, uma vez que os processos de evaporação, mistura ar-combustível e o alcance da temperatura de ignição, demoram mais para serem atingidos (HEYWOOD, 1988).

A volatilidade do combustível é inversamente proporcional à propriedade ponto de fulgor (*flash point*). A alta volatilidade aumenta a evaporação e acelera a taxa de formação de mistura, logo, diminui o período físico de atraso da ignição (ZHENG *et al.*, 2013). O DEE é um exemplo de combustível de elevada volatilidade; até mesmo o seu armazenamento carece de procedimentos e cuidados especiais.

A maior volatilidade do DEE em misturas com o diesel-biodiesel, eleva a velocidade de formação da mistura ar-combustível e melhora o processo de combustão e a eficiência térmica (QI *et al.*, 2011).

A redução de viscosidade de misturas com o DEE e o etanol diretamente influencia na qualidade do jato de combustível em relação ao tamanho médio das gotículas, profundidade de alcance, diâmetro do cone, área e volume projetados no interior da câmara. Em consequência disto, existe o aumento da taxa de evaporação,

¹ $\lambda = \text{Relação (ar/combustível real)} / \text{Relação (ar/combustível estequiométrica)}$.

melhoria da mistura ar-combustível e a tendência de redução do ID. Esses fatores são responsáveis por melhorias em parâmetros da combustão e do desempenho (LAHANE; SUBRAMANIAN, 2014).

Por outro lado, uma viscosidade mais elevada diminui a tendência de vazamentos no sistema de injeção. Normalmente, combustíveis mais viscosos possuem maior densidade, menor módulo de compressibilidade e maior velocidade do som (do inglês: *sound velocity*). Essas variáveis conduzem à antecipação da injeção do jato de combustível em motores que utilizam bomba injetora mecânica. O estudo de Lahane e Subramanian (2015) mostrou que a duração de injeção diminuiu de 5.6° CA (“*crank angle*”) com o diesel puro, para valores de 5.5°, 5.4°, 5.3°, 5.2°, 5.1° e 5° CA, utilizando as misturas com biodiesel B10, B15, B20, B25, B50 e B100, respectivamente. Em outras palavras, o início da injeção do combustível foi antecipado com o uso do biodiesel.

2.1.3 Emissões de NO_x provenientes de motores diesel

Os poluentes emitidos nos gases exaustos de MCI são caracterizados em hidrocarbonetos de diferentes tipos, monóxidos de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO, NO₂ e N₂O), materiais particulados (MP), óxidos de enxofre (SO, SO₂ e SO₃), entre outros. Alguns desses poluentes são provenientes de processo de combustão incompleta. Outros poluentes, como NO_x, são formados por reações entre o O₂ e o N₂ em altas temperaturas ou por outros mecanismos de formação (GUARIEIRO, 2011). De acordo com Palash *et al.* (2013), as emissões de NO_x são os parâmetros mais nocivos que afetam o meio ambiente através de chuva ácida e comprometimento da saúde humanas, entre outros problemas.

Os principais óxidos de nitrogênio presentes na atmosfera são os óxidos nítricos (NO), dióxidos de nitrogênio (NO₂) e os óxidos nitrosos (N₂O). A denominação NO_x, corresponde à soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Segundo Brunetti (2012), a proporção aproximada para o NO_x encontrado nos gases exaustos de motores diesel é de 90% de NO e 10% de NO₂, sendo que o NO, quando na atmosfera, rapidamente se transforma em NO₂.

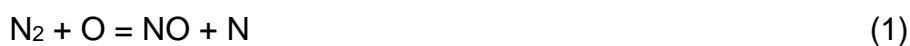
2.1.3.1 Processos de formação de NOx

A formação de NOx no processo de combustão é devida à fixação de nitrogênio com o oxigênio do ar durante a combustão em altas temperaturas, denominado mecanismo térmico (“*thermal NOx*”). Esse processo foi primeiramente postulado por Zeldovich em 1946 (PALASH et al., 2013).

Outro processo é devido à combinação de fragmentos de hidrogênio e nitrogênio atmosférico na zona da chama da combustão, denominado por processo imediato ou “*prompt NOx*”, dado por Fenimore em 1971. Um terceiro mecanismo é devido à conversão química da cadeia de nitrogênio presente no combustível, denominado NOx formado pelo combustível ou “*fuel NOx*” (SARAVANAN et al., 2012). Outros mecanismos de formação podem ainda acontecer, porém, em motores de combustão interna a formação de NOx acontece principalmente pelo mecanismo térmico (PALASH et al., 2013).

No processo de formação térmica, as reações ocorrem durante a combustão em temperaturas superiores a 1700K. Nesse processo, ocorrem as quebras de fortes cadeias triplas das moléculas de nitrogênio (“*strong triple bond of nitrogen molecules*”) e as reações atômicas do nitrogênio com o oxigênio gerando as emissões de NOx (VARATHARAJAN; CHERALATHAN; VELRAJ, 2011).

Outros fatores também contribuem na formação de NOx pelo mecanismo térmico, como o tempo de residência, a turbulência e o excesso de oxigênio (SCHWERDT, 2006). O mecanismo térmico é dirigido por 3 equações, apresentadas abaixo, que juntas são denominadas por “Zeldovich Mechanism”:



O uso de biocombustíveis em motores ICO pode modificar o perfil de emissões de NOx em relação ao diesel fóssil, tanto elevando, como reduzindo essas emissões.

A presença de oxigênio no biodiesel pode resultar em maior HRR durante a fase da combustão da pré-mistura, com maiores temperaturas médias da combustão e maior formação de NOx (PALASH *et al.*, 2013). No caso do etanol, embora possua um conteúdo de oxigênio ainda mais elevado, a entalpia de vaporização elevada e o baixo poder calorífico inferior (PCI) são fatores que podem atuar na redução de temperaturas da combustão e, logo, na diminuição das emissões de NOx (NOUR *et al.*, 2017).

Porém, o baixo NC do etanol pode causar elevação das emissões de NOx em decorrência do aumento do ID, principalmente se utilizado em concentrações volumétricas elevadas. Dessa forma, os resultados com o uso de biocombustíveis dependem muito da metodologia aplicada. Além das propriedades e características dos combustíveis, condições ambientais e fatores operacionais podem também influenciar nos resultados obtidos.

2.2 O uso de Biocombustíveis em Motores Diesel

Combustíveis fósseis são ainda a principal fonte de energia primária no mundo (MAHLIA *et al.*, 2020). O panorama mundial das reservas de óleo e gás revela uma grande capacidade de suprimento dos recursos energéticos do petróleo, mesmo considerando um cenário das próximas décadas (YA, 2020). As questões geopolíticas e econômicas são responsáveis por oscilações de preços do petróleo e combustíveis que impactam na matriz energética (GOMES *et al.*, 2018).

Nas últimas duas décadas um forte interesse tem emergido em favor da integração de energias renováveis nos setores elétrico e de transportes. Isso constitui uma grande preocupação para as economias desenvolvidas, bem como para os países em desenvolvimento e emergentes, a fim de garantir políticas de transição energética, combate às mudanças climáticas e redução das emissões de gases do efeito estufa (GOMES *et al.*, 2018).

Nesse cenário, o uso de biocombustíveis é incentivado em países e em economias emergentes, como Brasil, China e Índia, por questões ambientais, bem como por promover a segurança energética, oportunidades de incentivos agrícolas e crescimento econômico (GOMES *et al.*,

2018). Por outro lado, a Comunidade Européia (CE) tem se preocupado com o uso de terras, que eram antes utilizadas para alimentação, e agora estão tendo sua finalidade desviada para plantações de biomassa (oleaginosas) para produção de biocombustíveis, podendo, dessa forma, provocar o desmatamento de florestas (ou algo nesse sentido) para compensar áreas remanejadas. O RED II (2019) (Renewable Energy Directive) estabelece que, a começar de 2030, os biocombustíveis produzidos a partir de áreas que poderiam servir para plantio de alimentos, não poderão ser considerados como biocombustíveis renováveis (EU SCIENCE HUB, 2019).

Na matriz energética mundial, a produção de biomassa constitui a quarta fonte de energia primária, atrás do carvão, petróleo e gás natural. Muitas opções tecnológicas para converter biomassa em biocombustível foram e estão sendo estudadas e implementadas na prática com diferentes graus de sucesso (LI; SAKURAGI; MAKINO, 2019).

Em motores de combustão interna, biocombustíveis têm sido amplamente utilizados em pesquisas por razões como a diversificação da matriz energética, redução do consumo de combustíveis fósseis e possibilidade de diminuição de emissões de gases poluentes (SZABADOS *et al.*, 2018). Resistências para o aumento em escala do uso de biocombustível podem ainda surgir, por exemplo, em setores automotivos, como fabricantes de veículos e componentes que prezam a confiabilidade do sistema e a redução de custos. O mesmo pode advir de usuários privados consumidores de veículos. Uma das razões é ainda o desconhecimento dos efeitos técnicos e econômicos do uso de biocombustíveis em motores (LAPUERTA; ARMAS; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, 2008).

A seleção do tipo de biocombustível é essencial no que diz respeito a benefícios técnicos, sociais, ambientais e econômicos de sua utilização. Dessa forma, pesquisas em relação à aplicação de biocombustíveis em MCI são estrategicamente importantes e auxiliam em questões relacionadas ao desempenho, durabilidade e compatibilidade de combustíveis (PAUL; SARKAR, 2020).

2.2.1 O biodiesel

O biodiesel é um dos biocombustíveis com maior potencial de substituição ao diesel fóssil, uma vez que algumas de suas propriedades (NC e PCI) possibilitam a sua aplicação até mesmo puro em motores ICO (VERMA; SHARMA, 2015).

Do ponto de vista técnico, o biodiesel é um éster alquílico originado de ácidos graxos por meio de um processo de transesterificação de óleos ou gorduras de origens animal ou vegetal, de álcoois de cadeias curtas como o etanol e o metanol (PINTO *et al.*, 2005).

Alguns regulamentos especificam as propriedades que devem ser atendidas pelo biodiesel, como a EN-14214 na Europa e a ASTM-D-6751-03 nos EUA (LAPUERTA; ARMAS; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, 2008).

O biodiesel de origem etílica pode ser considerado renovável, uma vez que o etanol utilizado em seu processo de produção é proveniente da biomassa. No entanto, o processo diminui para cerca de 90% de “renovabilidade” quando o álcool utilizado no processo de transesterificação é de origem fóssil, normalmente utilizando o metanol (LAPUERTA; ARMAS; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, 2008). A rota metílica, porém, é a mais utilizada no processo de transesterificação para fabricação do biodiesel, tendo como justificativa as restrições do etanol para aplicação nessa finalidade (OLIVEIRA; COELHO, 2017).

O biodiesel é composto de cerca de 10% a 11% de oxigênio, alguns traços de nitrogênio e ausente de enxofre e aromáticos (SUBRAMANIAN; LAHANE, 2013; MAHLIA *et al.*, 2020). A aplicação de biodiesel em motores ICO proporciona considerável redução nas emissões de MP, uma vez que enxofre e aromáticos são considerados percursores de MP. Além disso, a maior disponibilidade de oxigênio proporciona uma combustão mais completa, contribuindo para a redução dessas emissões (LAHANE; SUBRAMANIAN, 2015; CARVALHO *et al.*, 2020; LAPUERTA *et al.*, 2005; GHAREHGHANI; MIRSALEM; HOSSEINI, 2017).

As emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos são também reduzidas com o biodiesel, em relação ao diesel fóssil (MAHLIA *et al.*, 2020).

O biodiesel oferece maior lubricidade, que promove o bom funcionamento de componentes do motor, reduz o desgaste e prolonga a vida útil do sistema (PALASH; MASJUKI; KALAM, 2013). É também considerado ecológico, sustentável (a depender da fonte de origem), biodegradável, não inflamável e não tóxico. Todas essas propriedades fazem do biodiesel um dos melhores combustíveis alternativos para garantir demandas energéticas no futuro (MAHLIA *et al.*, 2020).

Embora com muitas vantagens, o biodiesel apresenta algumas desvantagens que precisam ser levadas em consideração em suas aplicações. A presença de oxigênio no biodiesel aumenta o potencial de hidratação do biocombustível e diminui sua estabilidade em relação à oxidação (OLIVEIRA; COELHO, 2017). Em temperaturas muito baixas existe o aumento do potencial de entupimento e obstruções de filtros do sistema de combustível. Além disso, o biodiesel desempenha um papel de "solvente", que remove a sujeira armazenada dentro do tanque de combustível e que, em consequência, pode causar entupimentos em componentes do sistema (OLIVEIRA; COELHO, 2017).

Um outro ponto adverso é o aumento das emissões de NOx em relação ao diesel convencional, fator que pode ser uma barreira para a expansão comercial desse combustível (VARATHARAJAN; CHERALATHAN; VELRAJ, 2011; PALASH; MASJUKI; KALAM, 2013). Alguns estudos, contudo, mostram que é possível o controle de emissões de NOx por meio da correção do avanço da injeção do combustível (LAPUERTA; ARMAS; HERREROS, 2008). Nesse contexto, muitas pesquisas deixam dúvidas na apresentação de seus resultados quando não explicitam características do tipo de biodiesel e metodologia aplicada.

2.2.1.1 Aplicação do biodiesel em motores diesel

O biodiesel pode ser utilizado até mesmo puro em motores diesel. No entanto, como já mencionado, um dos principais empecilhos é sua viscosidade excessiva (DU *et al.*, 2018). A viscosidade aumenta em temperaturas mais baixas, assim como a

tendência para a formação de uma espécie de nuvem e de cera no combustível (“*poor point*” e “*cloud point*”) (OLIVEIRA; COELHO, 2017). Ambos os problemas podem ser mitigados por meio de aditivos ou de misturas com outros combustíveis menos viscosos (DU *et al.*, 2018).

A redução de viscosidade por meio de aditivos ou de misturas com outros combustíveis menos viscosos diretamente influencia na qualidade do jato de combustível injetado na câmara em relação a profundidade alcançada, diâmetro do cone e área projetada do jato. Em consequência disso, o diâmetro médio das gotículas do jato (aerossol) diminui, resultando em melhor qualidade da mistura com o ar e de parâmetros da combustão, desempenho e emissões (LAHANE; SUBRAMANIAN, 2014).

O tipo de biodiesel exerce influência nos resultados devido às diferenças em propriedades importantes, como viscosidade, PCI e NC. A seleção da matéria prima para a produção do biodiesel é baseada em aspectos econômicos, sociais, qualitativos, entre outros. Os principais tipos de matérias primas podem ser divididos em: óleos vegetais, óleos de gorduras animais e óleos residuais (OLIVEIRA; COELHO, 2017).

A decisão da seleção do tipo de biodiesel em países ou continentes envolve questões estratégicas, como a viabilidade para produção anual de um determinado tipo de óleo vegetal da região. Como exemplos, a matéria prima principal para o biodiesel nos Estados Unidos e Brasil é a soja, ao passo que a União Europeia utiliza o óleo de colza e alguns países tropicais, como Malásia e Indonésia, usam o óleo de palma (YASAR, 2020).

Considerando o uso em MCI, a seleção do tipo de biodiesel envolve estudos de estabilidade à oxidação e propriedades como viscosidade, PCI, NC, bem como o comportamento do biocombustível em condições de baixa temperatura. Yasar (2020) comparou 10 tipos de óleos vegetais para determinar o que melhor se adequava como matéria prima para biodiesel. O autor destacou o óleo de alga no estudo comparativo, considerando as propriedades para uso como biodiesel, viabilidade de produção e a característica de que não afeta a produtividade da terra, nem o uso de água potável e

nem sofre maiores interferências por questões como sazonalidade ou condições climáticas.

2.2.2 Etanol em motores diesel

O uso de etanol é, em princípio, incomum para ser utilizado em motores diesel, uma vez que não possui propriedades adequadas (SATGÉ *et al.*, 2001). A introdução de compostos oxigenados no combustível diesel, no entanto, é uma das melhores maneiras de se obter resultados em relação à diminuição de material particulado nos gases exaustos (SATGÉ *et al.*, 2001; KUMAR *et al.*, 2013).

O uso de álcoois combustíveis é também uma oportunidade de redução do consumo do diesel fóssil e de aumento do percentual de biocombustíveis nos setores de transportes e energia (JAMROZIK *et al.*, 2018).

Variados tipos de álcoois têm sido utilizados em pesquisas em motores ICO, como metanol, etanol, propanol, butanol, chegando até ao decanol. Os álcoois de cadeias mais elevadas, como o decanol, possuem propriedades que se aproximam às do diesel, como PCI e NC (DEVARAJAN *et al.*, 2020). No entanto, os tipos mais comuns aplicados em pesquisas em MCI são o metanol e o etanol, devido ao maior teor de oxigênio, maior entalpia de vaporização e custos de produção e logística menores (JAMROZIK *et al.*, 2018).

A adição de álcool ao biodiesel é ainda um dos métodos de se reduzir a densidade, viscosidade e melhorar as características das misturas de combustíveis para aplicação em motores (MIRHASHEMI; SADRNIA, 2020).

Em geral, a introdução de etanol em motores a diesel pode ser alcançada utilizando processos em misturas, injeção direta dupla de diesel e etanol, ou por fumigação de etanol nos pórticos de entrada de ar do motor (FERREIRA *et al.*, 2013).

De acordo com Tutak *et al.* (2017), o processo de fumigação permite uma melhor homogeneização da massa de ar-combustível em relação à introdução por misturas. Embora nesse processo, devido à menor proporção de oxigênio livre, a ignição por compressão torna-se mais difícil (MARTINS, 2013).

O uso de etanol melhora a estabilidade de misturas com o biodiesel em baixas temperaturas, deixando as características do jato de combustível similares ao diesel convencional (QI *et al.*, 2011; PARK; YOUNG; LEE, 2011).

2.2.2.1 Misturas diesel-etanol

A adição de etanol em misturas com o diesel provoca o aumento do ID da mistura de combustível. Isso ocorre devido ao menor NC do etanol e à maior entalpia de vaporização em relação ao diesel. Um outro fator coadjuvante para o aumento do ID é a maior temperatura de autoignição do etanol (JAMROZIK, 2017). A maior entalpia de vaporização provoca o efeito de resfriamento da massa fresca injetada e em regiões da câmara. Como a temperatura de autoignição é mais elevada, o tempo de início de ignição aumenta em função desse fator (KUSZEWSKI *et al.*, 2017).

Um baixo NC ocasiona um longo ID. Com isso, enquanto a ignição não se inicia, uma maior quantidade de combustível se acumula na câmara de combustão, que irá ocasionar uma combustão com maiores taxas de aumento de pressão e com picos mais elevados (KUSZEWSKI *et al.*, 2017).

O baixo NC pode também tornar a operação do motor “áspera”, ou seja, com ruídos diferentes do comum, em razão de maiores picos de carga e de aceleração em elementos do motor, como pistões, bielas e manivelas (KUSZEWSKI *et al.*, 2017). Em projetos, a taxa média de aumento da pressão na câmara deve ficar entre 3 e 8 bar/deg. Nessa faixa a operação do motor é considerada “macia”. Se a taxa atingir ou exceder o limite de 10 bar/deg, o trabalho do motor se torna áspero e com possível comprometimento de pistões e componentes em relação à durabilidade (JAMROZIK, 2017).

As emissões de poluentes nos gases exaustos da combustão são influenciadas pela adição de etanol ao diesel. No entanto, as tendências encontradas nos resultados da literatura podem variar, principalmente em função de questões como proporção de etanol utilizada, forma de introdução do etanol, tipo de motor e regimes de carga dos ensaios, entre outros (JAMROZIK *et al.*, 2018; CHOTWICHEN; LUENGNARUEMITCHAI; JAI-IN, 2009).

2.2.3 O dietil éter

Combustíveis com alto NC podem melhorar de maneira significativa o desempenho de motores ICO, uma vez que melhoram a qualidade da reação de combustão (PAUL *et al.* 2015).

O composto químico dietil éter (di-ethyl ether – DEE) é um éter de cadeia curta, cuja fórmula molecular é $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_3$ (RAKOPOULOS *et al.* 2012). Pode ser considerado um biocombustível, uma vez que uma das formas de obtenção é a partir do etanol, por meio de processo de desidratação em presença de ácidos catalisadores (YESILYURT; AYDIN, 2020). Possui um elevado número de cetano (>125), teor de oxigênio de 21,6%, poder calorífico de 33,90 MJ/kg e entalpia de vaporização de 356 kJ/kg. Adicionalmente, possui uma pressão de vapor elevada 110,2 kPa a 20°C (ZHAN *et al.*, 2018).

Devido a essas características e propriedades, em especial ao elevado NC, o DEE tem sido utilizado em muitas pesquisas com o diesel e com biocombustíveis como biodiesel e etanol. Em muitas dessas, o principal intuito é a melhoria do NC das misturas de combustíveis (RAKOPOULOS; RAKOPOULOS; KYRITSIS, 2016; YESILYURT; AYDIN, 2020; PAUL *et al.* 2015).

Em composições envolvendo o biodiesel, a adição de DEE proporciona elevação do teor de oxigênio, do NC, a diminuição da viscosidade, entre outras. Quando o etanol também está presente, a introdução do DEE eleva o NC das misturas. Logo, características da combustão, como ID, pressões e HRR podem ser melhorados por meio do uso do DEE.

Muitos estudos têm mostrado bons compromissos em emissões de NO_x com o uso simultâneo de DEE e etanol. Isso se justifica pela combinação de propriedades das duas substâncias, como alta entalpia de vaporização do etanol e NC elevado do DEE, de forma que pode haver o resfriamento e a redução dos picos de pressão e temperatura da combustão (PAUL *et al.*, 2015).

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O Biodiesel em Misturas com o Diesel

Os efeitos de misturas biodiesel–diesel em diferentes frações (B5, B10, B15, B20, B25, B50 e B100) foram avaliados em Lahane e Subramanian (2015). A viscosidade das misturas variou entre 2,65 a 5,8 cSt, considerando o diesel puro e o B100, respectivamente. Com o aumento das frações de biodiesel, o diâmetro médio das gotículas e a profundidade do jato injetado aumentaram, enquanto que o ângulo de cone do jato de combustível diminuiu. Em relação ao desempenho, houve aumento do consumo específico (BSFC) e redução do torque e da eficiência térmica. Os resultados em emissões mostraram diminuição de HC, CO e opacidade, ao passo que NOx aumentou.

Em Wu *et al.* (2009), foram avaliadas as emissões de cinco diferentes tipos de biodiesel: algodão, soja, colza (rapessed), palma e óleo residual. As emissões de MP e HC diminuíram e NOx elevou em relação ao diesel fóssil.

Em Abed *et al.* (2019), foram avaliados quatro tipos de biodiesel (mamona, palma, algas e óleo residual de cozinha) em proporções de mistura B10 e B20. Em relação ao diesel puro, os resultados mostraram diminuição de opacidade, HC e CO. As emissões de NOx aumentaram com o uso de biodiesel em todas as condições de carga.

Em Mikulski, Duda e Wierzbicki (2016), os autores avaliaram biodiesel de óleo de suíno em proporções B0, B25, B50 e B75, em duas velocidades rotacionais e três condições de carga do motor. Os resultados de emissões mostraram reduções em HC e CO e aumento de NOx, com o aumento das frações de biodiesel. Os autores relacionaram as altas concentrações de NOx às ignições e combustões mais aceleradas, responsáveis por criar um maior delta nas pressões na câmara e, conseqüentemente, temperaturas mais altas na câmara de combustão.

A presença de oxigênio no combustível proporciona uma combustão mais completa, com conseqüente aumento da temperatura da combustão e, portanto, das emissões de NOx (CHEN *et al.*, 2018).

Embora muitas pesquisas em relação ao biodiesel mostrem resultados semelhantes, existem na literatura estudos que mostram tendências diferentes. Como em Nair, Kaviti e Daram (2017), que compararam o biodiesel de Neem (Nim) com o diesel fóssil, em proporções B10, B20 e B30. Em todas as condições de carga dos ensaios os resultados mostraram diminuição de emissões de NOx com as misturas.

O perfil de emissões de NOx com combustíveis oxigenados é complexo e pode ser considerado não conclusivo (MIRHASHEMI; SADRNIA, 2020). Em Lapuerta, Armas e Rodríguez-Fernández (2008), os autores consideraram quatro grupos de resultados de pesquisas das emissões de NOx com o biodiesel: grupo I, elevação das emissões de NOx com o uso do biodiesel; grupo II, aumento das emissões somente em certas condições operacionais; grupo III, não encontraram diferenças entre os combustíveis diesel e biodiesel; e, grupo IV, redução das emissões de NOx com o uso do biodiesel. Muitos fatores exercem influência, como número de cetano, densidade, viscosidade, volatilidade, grau de insaturação, teor de oxigênio, módulo de compressibilidade (*bulk modulus*), composição de aromáticos e tipo de sistema de injeção de combustível, entre outros (MIRHASHEMI; SADRNIA, 2020).

Embora os fatores de influência para a emissão de NOx do biodiesel sejam multidimensionais, abrangentes e interativos, o fator determinante para o aumento da formação de NOx é a temperatura de combustão em diferentes condições de operação do motor (CHEN *et al.*, 2018).

3.2 O Uso do Etanol em Misturas

Em Jamrozik *et al.* (2017), foram ensaiadas combinações de diesel-metanol (DM) e diesel-etanol (DE) em frações de misturas entre 0% e 40%. Os autores observaram elevação significativa das taxas de aumento da pressão da combustão com as misturas (cerca de 10 a 12 bar/deg), superando o valor recomendado em projetos de motores diesel. Além do aumento das taxas de variação de pressão, todas as misturas DM e DE mostraram elevação do atraso na ignição (ID) e das pressões máximas na câmara em relação ao diesel puro.

Em Jamrozik *et al.* (2018) os autores constataram a redução do tempo de queima utilizando os álcoois metanol, etanol, propanol e butanol junto com o diesel. O

metanol, que possui o maior conteúdo de oxigênio, foi o que apresentou o menor período de queima.

Em Xing-Cai *et al.* (2004) foram avaliados os efeitos de aditivos elevadores do NC em misturas diesel-etanol. As emissões de NOx e opacidades diminuíram simultaneamente com a adição de etanol ao diesel e reduziram ainda mais com a adição de aditivos, nas cargas moderadas e elevadas.

Em Lee *et al.* (2018) os autores avaliaram a introdução do etanol junto com o diesel pelo método de injeção direta dupla. As emissões específicas de NOx e MP diminuíram e as de CO e HC aumentaram com a elevação do percentual de etanol, em todas as cargas. A eficiência térmica diminuiu com a adição de etanol, comportamento previsível, segundo o autor, uma vez que os parâmetros do motor estavam projetados para o funcionamento com o diesel combustível.

Em Rakopoulos, Antonopoulos e Rakopoulos (2007), misturas diesel-etanol em frações de 5%, 10% e 15% de etanol foram testadas em diferentes cargas. As emissões de NOx, CO e MP, reduziram com o aumento de etanol, em todas as cargas. As emissões de HC, no entanto, aumentaram com o incremento nas frações de etanol. Em todas as combinações diesel-etanol a eficiência térmica foi levemente maior em relação ao diesel.

Em Ajav, Singh e Bhattacharya (1999), misturas diesel-etanol em frações de 5%, 10%, 15% e 20% de etanol foram testadas. As emissões de NOx e CO reduziram em relação ao diesel puro. A eficiência térmica diminuiu com a elevação das frações de etanol.

Em Oliveira *et al.* (2015), os autores investigaram o uso de frações de 5%, 10% e 15% de etanol em misturas com o B7 em diferentes condições de carga. Em cargas elevadas, os maiores picos de pressão e HRR da combustão foram encontrados com o aumento das frações de etanol nas misturas, atribuídos à redução do NC e ao aumento do teor de oxigênio. As emissões de NOx não apresentaram um comportamento definido. Os autores destacaram que, embora o menor NC e maior teor de oxigênio contribuíssem para o aumento das temperaturas, outros fatores atuavam de maneira contrária, como a maior entalpia de vaporização e menor

temperatura da chama. Dessa forma, os autores não consideraram uma tendência definida para as emissões de NO_x.

Em Randazzo e Sodré (2011), os autores avaliaram os efeitos de misturas diesel-biodiesel (B3, B5, B10 e B20) e da adi o de etanol   mistura B20 (B20E2 e B20E5). Os resultados mostraram a eleva o das emissões de NO_x e redu o de CO, HC e MP com o aumento das fra oes de biodiesel. A adi o de etanol   mistura B20 em 2% e 5% mostrou a redu o das emissões de NO_x, porém, houve aumento de CO, HC e MP.

Em Tutak *et al.* (2017), foi verificada a introdu o do etanol em misturas com o diesel (DE) e com o biodiesel (BE), em fra oes de 10%, 20%, 30% e 40%. Em ambos os casos, o incremento de etanol resultou em aumento do ID, picos de pressão e HRR e redu o da dura o da queima. Os maiores picos de pressão resultaram em maiores pressões m dias efetivas e eficiência térmica, porém, que levaram a maiores emissões de NO_x.

Yilmaz (2012) testou combina oes biodiesel-etanol e biodiesel-metanol em fra oes de 85% biodiesel e 15% álcool, comparando com o diesel e o biodiesel puros. Os resultados mostraram redu oes das emissões de NO_x com o uso das misturas, atribuídos   maior entalpia de vaporiza o e menor PCI, que reduziram as temperaturas da combustão.

Em Oliveira *et al.* (2017) os autores avaliaram a introdu o de etanol hidratado (92,6% de pureza) pelo método de fumiga o (B7E5 a B7E30) utilizando o B7 como combustível principal. O uso de etanol mostrou o aumento do atraso na igni o e dos picos de pressão e HRR e resultou em maiores emissões de NO_x, HC e CO.

3.3 Aplica oes do DEE em Misturas

Em Nanthagopal *et al.* (2019), os autores compararam misturas ternárias diesel-biodiesel-DEE com o diesel e o biodiesel puros. O uso do DEE mostrou eleva o do consumo específico e diminui o da eficiência térmica em rela o aos combustíveis básicos. Em rela o às emissões de NO_x, os autores observaram expressiva redu o em rela o ao diesel e biodiesel, que foi atribuída ao efeito de

resfriamento da combustão causado pela maior entalpia de vaporização das misturas com o DEE. Além disso, as misturas com DEE (5% a 12,5%) mostraram reduções das pressões e HRR em relação aos demais combustíveis.

Em Imtenan *et al.* (2015) foi avaliada a adição de n-butanol e DEE em misturas diesel-biodiesel. Os autores observaram elevação da eficiência térmica e redução das emissões de NOx, CO e opacidade (fumaça) com o uso dos aditivos. Em relação ao comportamento da combustão, foram observados discretos aumentos no ID e redução dos picos de pressão da combustão, atribuídos ao aumento da entalpia de vaporização e redução do PCI dos aditivos.

Em Qi *et al.* (2011), foram avaliados em diferentes cargas do motor os efeitos da introdução do etanol e do DEE em mistura diesel-biodiesel. As formulações de combustíveis utilizadas foram o B30 (30% de biodiesel e 70% de diesel), o DEE-biodiesel-diesel (5% DEE, 25% biodiesel e 70% diesel) e o etanol-biodiesel-diesel (5% etanol, 25% biodiesel e 70% diesel). As emissões de MP reduziram com uso das misturas utilizando o DEE e o etanol. As emissões de NOx aumentaram com o uso do etanol e apresentaram discreta redução com o uso do DEE. As emissões de HC aumentaram e as de CO reduziram com as misturas em relação ao B30.

Em Roy *et al.* (2016), foram avaliados os efeitos da adição de etanol e DEE em misturas com o diesel e biodiesel durante as fases de partida a frio e aquecimento do motor. Os autores observaram a redução das temperaturas dos gases exaustos com os aditivos durante os 5 primeiros minutos da fase de aquecimento. As emissões de NOx reduziram com os aditivos durante o período de aquecimento do motor nos 30 minutos iniciais; as emissões de HC, porém, aumentaram o uso dos aditivos.

Em Srihari, Thirumalini e Prashanth (2017), os autores avaliaram a adição de DEE (5%, 10% e 15%) em misturas diesel-biodiesel em diferentes cargas de um motor PCCI (*Premixed Charge Compression Ignition*). Os resultados mostraram diminuição das emissões de NOx, CO, HC e fumaça com a adição de 10% e 15% de DEE; com a proporção de 5%, no entanto, os resultados apresentaram variações com as cargas, não mostrando uma tendência definida.

Em Paul *et al.* (2015), foram avaliadas misturas diesel-DEE e diesel-DEE-etanol em seis diferentes condições de carga do motor. A composição com 10% de etanol, 10% de DEE e 80% de diesel, se mostrou a mais eficiente e resultou nas menores emissões de NOx em relação aos demais combustíveis dos ensaios. Nas misturas diesel-DEE (D95DEE5 e D90DEE10) as emissões de NOx aumentaram. Logo, os autores destacaram os melhores resultados da aplicação conjunta dos aditivos etanol e DEE com o diesel, em relação às misturas com somente o DEE.

No estudo de Zhan *et al.* (2018), os autores avaliaram as características do jato de combustível do diesel puro, do B20, B20 com 20% de etanol (DBE) e do B20 com 20% de DEE (DBDE). Os resultados das análises microscópicas mostraram que a adição de etanol e DEE diminuíram a viscosidade e melhoraram as características do jato de combustível e o processo de atomização em relação às misturas diesel-biodiesel.

Em Yesilyurt e Aydin (2020), o DEE foi usado em proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% com o B20. Os autores observaram o aumento do ID e a redução dos picos de pressão da combustão e HRR com a adição de DEE. Apesar do NC elevado, os autores atribuíram os resultados ao aumento da entalpia de vaporização e da volatilidade das misturas com o DEE. Os resultados de emissões mostraram reduções de NOx, CO e HC em relação ao diesel e B20.

Em Kannan e Marappan (2011), foram avaliadas emulsões de biodiesel (biodiesel com frações de água) e misturas biodiesel com DEE em concentrações de 5%, 10%, 15% e 20%. As emissões de NOx e fumaça diminuíram com as misturas e emulsões testadas. As emissões de HC diminuíram com o uso das emulsões e aumentaram nas misturas com o DEE. Os autores relataram a tendência de formação de vapor na linha de combustível (*vapor lock*) usando percentuais acima de 20% de DEE, de forma a não ser possível a realização de experimentos nessas condições.

Em Barik e Murugan (2016), o DEE foi introduzido em frações de 2%, 4% e 6% no pórtico de admissão (fumigação) em um sistema de duplo combustível (*dual fuel*) biogás-biodiesel. O uso do DEE mostrou a redução do ID, o aumento das pressões e a diminuição da duração da combustão. Os resultados mostraram aumento da

eficiência térmica e redução das emissões de CO, HC e opacidade. As emissões de NOx, no entanto, foram maiores.

Em Venu e Madhavan (2017), o DEE foi adicionado ao EBD (20% de etanol, 40% de biodiesel e 40% diesel) com o objetivo de elevar o NC das misturas. Os autores relataram que a adição de DEE aumentou a duração da combustão, a pressão da câmara e o BSFC; porém com redução das emissões de NOx, PM e fumaça devido ao menor ID e à maior entalpia de vaporização.

Embora o DEE tenha um alto NC, alguns estudos mostram o aumento do ID em combinações com o EBD. Esse comportamento é observado principalmente em carga mais baixa, em que as temperaturas dos gases residuais da combustão e nas paredes da câmara são menores. Logo, nas pesquisas aplicadas, devem ser observados as interações de propriedades do etanol e do DEE, como entalpia de vaporização, poder calorífico, NC e volatilidade, que podem influenciar de forma diferente no comportamento da combustão e nos resultados de desempenho e emissões de acordo com as composições de misturas e cargas do motor (VENU; MADHAVAN, 2017).

3.4 Análise Crítica da Revisão Bibliográfica

Na análise da literatura, observa-se uma grande variedade de estudos relacionados ao uso de biocombustíveis em motores diesel. As pesquisas abrangem diferentes metodologias de aplicações, como em relação ao método de introdução do combustível no motor, variações nas composições de misturas de combustíveis (e biocombustíveis) e modificações em parâmetros operacionais do motor (taxa de compressão; pressão de injeção; momento da injeção do combustível; etc.).

Os resultados em emissões de NOx são um dos principais indicadores na avaliação dos resultados das pesquisas, uma vez que o controle dessas emissões é um dos principais desafios nesses tipos de motores.

O conteúdo de oxigênio nos biocombustíveis é um fator que proporciona a redução das emissões de MP, por permitir uma combustão mais completa. No entanto, ocorre a redução do PCI do combustível.

Os estudos com o biodiesel estão mais consolidados, uma vez que as propriedades e características desse biocombustível estão mais adequadas para o uso em motores diesel. A literatura mostra muitas variações de biodiesel e aponta matérias primas promissoras para aplicações, considerando a viabilidade de produção e questões de sustentabilidade, como o óleo vegetal proveniente de algas. A viscosidade do biodiesel e a estabilidade em relação à oxidação, no entanto, ainda aparece como um dos principais pontos adversos ao uso em altas concentrações.

A combinação do biodiesel com o etanol é uma das formas de se elevar o uso de biomassa nos combustíveis. As pesquisas se justificam por questões técnicas também, como a redução da viscosidade, elevação do teor de oxigênio e da entalpia de vaporização das misturas. O número de cetano (NC) muito baixo, no entanto, aparece como um empecilho ao seu uso.

Algumas pesquisas em misturas etanol-diesel, etanol-biodiesel e etanol-biodiesel-diesel, o uso de etanol mostrou elevação das emissões de NO_x devido ao aumento do ID, ocasionado pela redução do NC. Em elevadas concentrações de etanol, os resultados são ainda mais expressivos e resultam, também, em maiores emissões de hidrocarbonetos, devido à deterioração da qualidade da queima. A necessidade de aditivos modificadores do NC fica evidente nos estudos do etanol.

Na revisão da literatura, o dimetil éter (DME) e o dietil éter (DEE) foram identificados como éteres de elevado NC e com a possibilidade de utilização em misturas de combustíveis em motores de ignição por compressão (ICO) como formas de melhoria dessa propriedade. O DME, no entanto, devido à complexidade técnica para utilização no motor (propriedades semelhantes às do GLP) e custo elevado (custos de importação), foi retirado do escopo dessa pesquisa. O DEE, por sua vez, apresenta-se no estado líquido nas condições ambientais e apresenta miscibilidade com o diesel, biodiesel e etanol. Ressalvas naturalmente existem, como em relação à volatilidade excessiva devido à alta pressão de vapor, que necessita cuidados especiais no manuseio e armazenamento; no sistema de combustível do motor existem relatos de formação de vapor, obstrução e comprometimento da estabilidade do funcionamento do motor (*"vapor lock"*).

Foi possível observar na literatura que os efeitos em relação à redução das emissões de NO_x com o uso do DEE eram mais efetivos quando utilizado em misturas em que o etanol esteve presente. As explicações são devido à combinação de propriedades do etanol e do DEE. A entalpia de vaporização das misturas fica elevada em função do etanol (836 kJ/kg) e do DEE (356 kJ/kg). O NC é elevado em função do DEE (120), enquanto o NC do etanol é de somente cerca de 6,5. Além disso, ambos possuem teor de oxigênio elevado, 34,7% e 21,6% para o etanol e DEE, respectivamente. Isso propicia a melhoria do processo da queima do combustível, com o aumento da eficiência do motor e redução de MP.

A literatura, no entanto, não deixa claro os resultados dos efeitos das interações e das proporções de misturas entre DEE-etanol com o diesel e biodiesel. Essa informação é importante/relevante, uma vez que, como mencionado anteriormente, o DEE é um produto de custo relativamente elevado e que apresenta restrições devido à sua pressão de vapor (volatilidade) excessiva.

Uma outra lacuna identificada na revisão da literatura foi em relação ao uso de misturas quaternárias diesel-biodiesel-etanol-DEE. Somente em Venu e Madhavan (2017) foi possível verificar esse viés. Os autores adicionaram o DEE na mistura EBD (40%biodiesel-40%diesel e 20%etanol) e observaram reduções de emissões de NO_x e MP em seus resultados.

De uma forma geral, pode-se sintetizar que o DEE pode ser utilizado como um aditivo modificador do NC. Nas misturas com o etanol, as combinações de propriedade entre dos combustíveis resultam em bons compromissos em resultados de eficiência do motor e redução de emissões de NO_x.

4 METODOLOGIA

Essa metodologia descreve os procedimentos dos ensaios experimentais que foram realizados para se avaliar os efeitos do uso do DEE em misturas com o etanol, biodiesel e o diesel fóssil. Os estudos foram desenvolvidos em três planejamentos experimentais, denominados como “aparatos” 1, 2 e 3.

No primeiro aparato, realizado no laboratório de motores da UFRB, foi utilizado um motor diesel MWM, 4 cilindros. Nos outros dois aparatos, desenvolvidos no laboratório de motores da UFBA, foi utilizado um motor Agrale, 2 cilindros.

O terceiro aparato foi desenvolvido com base em um planejamento experimental estatístico de análise multivariada, que abordou os efeitos das interações entre os combustíveis e as regiões otimizadas de misturas. Com os resultados obtidos foi possível melhorar o embasamento de explicações dos outros dois estudos.

A utilização de motores e laboratórios distintos, em princípio, foi devido à interrupção temporária em um dos laboratórios; no entanto, se mostrou como uma oportunidade de se avaliar os efeitos de misturas de combustíveis em sistemas diferentes, complementando as informações e reforçando a robustez da pesquisa em relação aos resultados.

4.1 Avaliação do Desempenho e Emissões de um Motor Diesel Utilizando o DEE em Misturas com o Diesel, Biodiesel e Etanol

Nesse planejamento experimental (aparato 1), os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Motores do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB/CETEC), Campus de Cruz das Almas, Bahia.

4.1.1 O motor diesel

Foi utilizado um motor diesel, quatro cilindros, com sistema de injeção de combustível direta, realizado por meio de bomba injetora mecânica (com tubos entre

a bomba e os bicos injetores) e sistema de aspiração natural de ar. A tabela 4.1, abaixo, apresenta as principais especificações do motor utilizado.

Tabela 4.1 Dados do motor utilizado nos experimentos

Fabricante e modelo	MWM 229.4
Tipo de motor	Diesel; injeção direta; 4 cilindros em linha.
Sistema de Admissão de Ar	Natural aspirado
Potência máxima	54 kW a 2500 rpm (NBR-1585)
Taxa de Compressão	17:1
Diâmetro x curso dos cilindros	102 x 120 mm
Sistema de injeção de combustível	Injeção direta com bomba injetora mecânica em linha
Pressão de injeção	23 MPa
Volume do motor	3,92 L

Fonte: Catálogo técnico MWM

A Figura 4.1 apresenta a imagem do motor utilizado nos ensaios experimentais.

Figura 4.1 Motor diesel utilizado nos ensaios experimentais.



Fonte: O autor.

4.1.2 O dinamômetro

O dinamômetro utilizado para a realização dos ensaios foi do tipo corrente de Foucault. A tabela 4.2 apresenta as principais especificações do dinamômetro.

Tabela 4.2 Características do dinamômetro dos ensaios experimentais

Fabricante e modelo	Logs Eletronics Systems
Modelo	EC - 150
Tipo	Corrente de Foucault
Capacidade máxima de potência	150 kW
Velocidade máxima de funcionamento	4500 rpm

Fonte: Logs Eletronics Systems

A Figura 4.2 mostra a imagem do dinamômetro utilizado na realização dos ensaios experimentais.

Figura 4.2 Dinamômetro utilizado nos ensaios.



Fonte: O autor.

4.1.3 As condições do motor utilizadas nos ensaios

4.1.3.1 Velocidade constante e cargas variadas

Nesses ensaios, as mesmas condições de carga do motor (torque, potência e rotação) foram utilizadas com cada um dos combustíveis. A rotação (velocidade angular do motor) selecionada foi de 1800 rpm. As faixas de potência do motor foram: 8 kW, 16 kW e 24 kW. Essas condições de potência correspondem às cargas de aproximadamente 25%, 50% e 75% da potência máxima do motor na rotação de 1800 rpm, considerando como parâmetro o diesel combustível convencional. Como os combustíveis ensaiados possuem propriedades diferentes, como densidade e PCI, foram necessárias correções no sistema de injeção de combustível (aceleração) do motor, por meio de maior débito de combustível na bomba injetora, para o ajuste das condições.

Ainda em função de diferenças nos valores de PCI, a carga mais alta utilizada nos ensaios comparativos foi de 75% do valor da carga máxima, considerando o diesel puro como referência. Essa consideração é importante, uma vez que as misturas com menores PCI poderiam não alcançar os valores de torque e potência superior a essa carga.

Todos os ensaios foram realizados em triplicatas. Em cada um, alcançada a condição de teste, o motor foi mantido na condição por cerca de três minutos e os dados medidos ao menos cinco vezes.

As temperaturas e umidades relativas do ar, durante os ensaios, foram de $26^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e $65\% \pm 7\%$, respectivamente.

4.1.3.2 Carga máxima e velocidades variadas

Nesses ensaios, o objetivo foi a verificação dos valores de torque e potência máximos com cada um dos combustíveis. Para a obtenção dessas condições, o sistema de alimentação foi mantido com o maior débito de combustível, correspondente ao curso máximo da alavanca de aceleração do motor. Na bancada dinamométrica, foi possível o estabelecimento dessas condições de carga máxima em diferentes rotações do motor; dentre as quais foram selecionadas para esse

comparativo: 1400, 1600, 1800, 2000 e 2200 rpm, que correspondem à rotação de teste dos ensaios de carga constante, 1800 rpm, e a duas faixas de rotações abaixo e duas acima desse valor. Também foram limitadas a 2200 rpm, uma vez que, na bancada dinamométrica utilizada, em rotações acima de 2400 rpm havia a possibilidade de ressonância no sistema de acoplamento motor-dinamômetro, podendo comprometer a segurança dos equipamentos e operadores.

As condições ambientais dos ensaios foram de $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\% \pm 2\%$ de umidade relativa do ar.

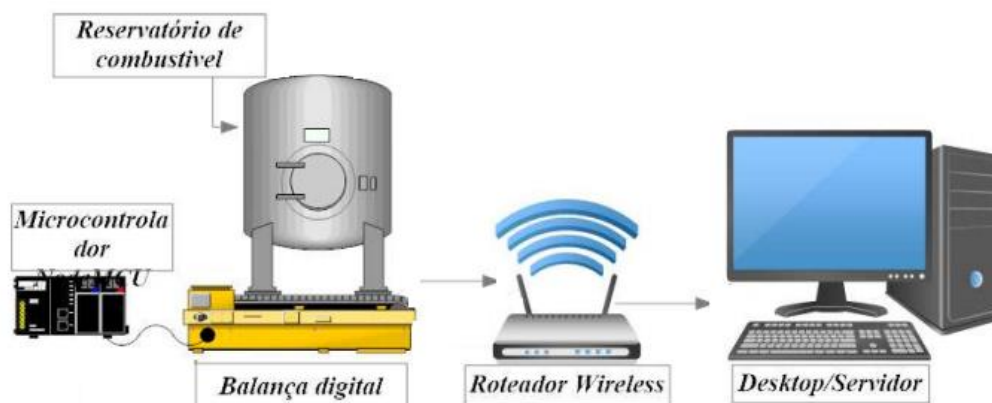
4.1.4 A instrumentação dos ensaios

A instrumentação da bancada possibilitou a obtenção de parâmetros complementares dos ensaios, tais como consumo de combustível, emissões e temperaturas do sistema.

4.1.4.1 O sistema de medição de combustível

O consumo de combustível foi obtido pelo método gravimétrico, utilizando uma balança digital. Com a medição simultânea do tempo, determinava-se a vazão mássica de combustível (consumo mássico). Além de serem anotadas manualmente, um sistema automatizado do tipo SCADA foi utilizado na aquisição dos dados. Dessa forma, com a redundância dos dados foram verificadas as coerências das medições e melhorada a confiabilidade. A Figura 4.3 representa a automação do sistema de medição de combustível.

Figura 4.3 Sistema de medição de combustível



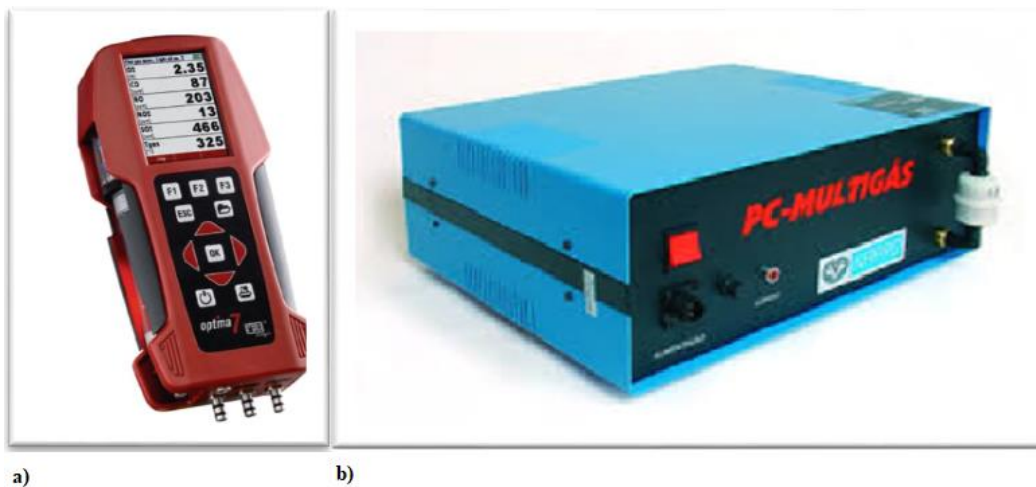
Fonte: Adaptada de Souza e Achy (2019).

Para cada combustível dos ensaios, seis ciclos de medições foram realizados, com amostras coletadas em tempos de três minutos. A temperatura foi medida por meio de um sensor termopar alocado internamente no tanque de combustível que transmitia os dados para o sistema de automação do dinamômetro.

4.1.4.2 O sistema de medição de gases de exaustão

As medições de gases exaustos do motor foram realizadas por meio de dois analisadores. Um deles mede O_2 , CO_2 , CO , NO e NO_2 , além de dados de temperatura ambiente e dos gases exaustos. Para as medições de hidrocarbonetos não queimados (HC), foi utilizado um outro analisador apto para essa função, manufaturado pela NAPRO, modelo PC-MULTIGÁS. A Figura 4.4 representa os analisadores utilizados.

Figura 4.4 Analisadores de gases. a) Optima 7; b) NAPRO PC Multigás.



Fonte: Catálogo do fabricante.

A medição de material particulado (PM) foi determinada pelo método gravimétrico, utilizando túnel de diluição do tipo CVS.

A taxa de diluição foi de 20:1 (20 partes de ar ambiente para cada parte de gases exaustos) em volume. Para a coleta do PM foram utilizados filtros de fibra de vidro, com 0.7 μm (mesh), e diâmetro externo de 47mm, fabricados pela Milipore®. O fluxo de gás diluído, utilizado nos filtros, foi regulado em uma vazão de 10 LPM (litros por minuto), conforme indicado pela norma brasileira ABNT-NBR14489. Todos os filtros foram armazenados em sílica gel, conforme definições da norma. Os filtros “brancos” foram previamente aquecidos a 150°C durante 24 horas, a fim de se eliminar possível contaminação com umidade; posteriormente, os filtros foram pesados para a classificação de massa e armazenados utilizando sílica gel. Os procedimentos se repetiram após a coleta de material particulado, antes de serem novamente pesados.

A Figura 4.5 mostra a balança digital utilizada para a medição dos filtros de material particulado. A resolução dessa balança é de 0,000001 g.

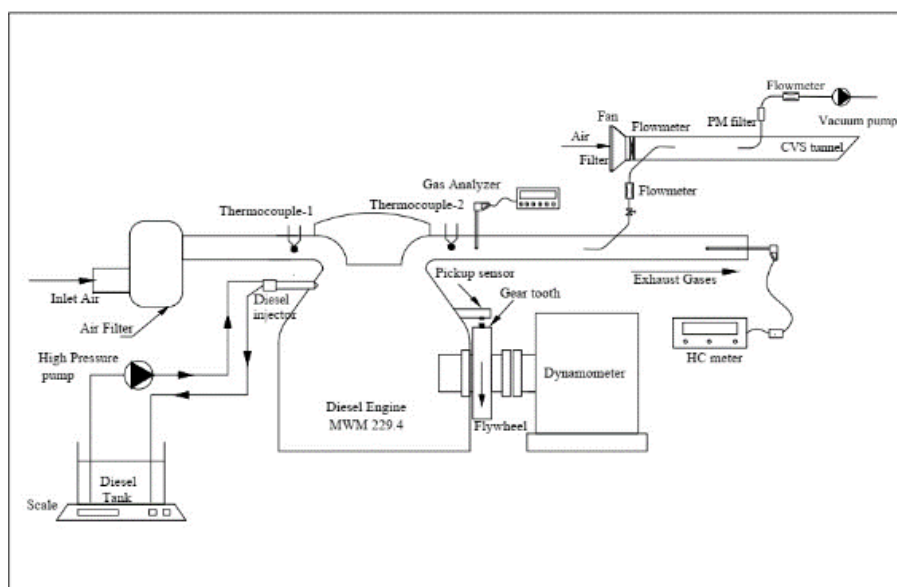
Figura 4.5 Balança para pesagem dos filtros de MP.



Fonte: O autor.

A Figura 4.6 representa esquematicamente a bancada dinâmométrica e o CVS utilizado.

Figura 4.6 Representação da bancada experimental.



Fonte: O autor

A tabela 4.3 apresenta especificações e faixas de incertezas de equipamentos e instrumentações utilizados nos experimentos.

Tabela 4.3 Especificações de instrumentos dos ensaios.

Medidas	Instrumentos	Fabricante (Modelo)	Faixa de medição	Incertezas
Temperatura dos gases exaustos	Analizador de gases	MRU (Optima 7)	0 a 1100 °C	± 1%
Temperatura e umidade do ambiente	Termo-higrômetro digital	ICEL (HT-208)	0 a 100 %	± 3%
Consumo de combustível	Balança digital	Mettler Toledo (9094)	0 a 15 kg	± 2%
Gases de exaustão (NOx)	Analizador de gases	MRU (Optima 7)	0-1000 ppm	± 5 ppm
Gases de exaustão (CO)	Analizador de gases	MRU (Optima 7)	0-4000 ppm	± 5%
Gases de exaustão (HC)	Analizador de gases	NAPRO (PC-Multigás)	0-500 ppm	± 3%

4.1.4.3 Os combustíveis dos ensaios

Para a preparação das misturas foram utilizados os combustíveis diesel puro (D100), com 10 ppm de enxofre, o biodiesel puro de soja (B100), o etanol anidro, com pureza de 99,3%, e o éter dietílico, com pureza de 99,7%. A Figura 4.7 mostra o armazenamento dos combustíveis utilizados nos experimentos.

Figura 4.7 Combustíveis utilizados nos ensaios.



Fonte: O autor.

Os combustíveis D100, B100 e etanol foram gentilmente doados pela Petrobahia®. O DEE foi adquirido no comércio local de produtos químicos para laboratórios.

Com o D100 e o B100, foi realizada a mistura B20 (20% de biodiesel e 80% de diesel S10A, em volume). Esta foi utilizada como base para preparação das misturas com o etanol e com o DEE. A Tabela 4.4, abaixo, apresenta propriedades dos combustíveis básicos.

Tabela 4.4 Propriedades dos combustíveis utilizados nos ensaios

Propriedades	Unidades	Diesel (D100)	Biodiesel (B100)	Dietil-Eter (DEE)	Etanol (E)
Teor de Oxigênio (%)	% (massa)	0	10,8	21,6	34,7
Densidade	g/mL	0,84	0,878	0,713	0,786
Viscosidade	cSt	3,3	4,95	0,23	1,2
Flash point	°C	96	158	-45	15
Número de Cetano	-	46	55,9	125	6,5
PCI (MJ/Kg)	MJ/kg	42,5	37,46	36,87	28,4
Entalpia de vaporização	kJ/kg	260	200	356	836

Fonte: Adaptada de (FERREIRA, 2013); (WEI; CHEUNG; NING, 2018); (QI et al., 2011a).

As misturas utilizadas nos ensaios, assim como informações de frações volumétricas utilizadas e PCI, aparecem abaixo, Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Composições volumétricas das misturas de combustíveis e valores de PCI.

Combustível	D100	B100	Etanol	DEE	PCI (MJ/Kg)
D100 (S10)	100%	0%	0%	0%	42,50
B20	80%	20%	0%	0%	41,46
B20E	72%	18%	10%	0%	40,24
B20E+DEE	68,4%	17,1%	9,5%	5%	40,09

Fonte: O autor.

Os valores de PCI da Tabela 4.5 foram determinados conforme a equação 4, abaixo:

$$PCI_{mistura} = \frac{v_D PCI_D \rho_D + v_B PCI_B \rho_B + v_E PCI_E \rho_E + v_{DEE} PCI_{DEE} \rho_{DEE}}{m_{mistura}} \quad (4)$$

Os valores de v_D , v_B , v_E e v_{DEE} correspondem aos volumes de cada componente na mistura. Os valores de ρ_D , ρ_B , ρ_E e ρ_{DEE} correspondem às densidades e $m_{mistura}$ corresponde ao somatório das massas dos componentes. Essa metodologia foi também observada em Al-Esawi; Qubeissi; Kolodnytska (2019).

Para a determinação das frações de oxigênio das misturas, utiliza-se a equação 5, seguindo a mesma analogia utilizada.

$$O_2(\%) = \frac{v_D O_{2D} \rho_D + v_B O_{2B} \rho_B + v_E O_{2E} \rho_E + v_{DEE} O_{2DEE} \rho_{DEE}}{m_{mistura}} \quad (5)$$

4.2 Avaliação do Uso do DEE em Misturas Biodiesel-Etanol

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Motores da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA), sendo esse parte integrante do Laboratório de Energia (LEN).

4.2.1 O motor utilizado nos ensaios

Os ensaios foram realizados em um motor diesel, dois cilindros, com injeção direta de combustível. A Tabela 4.6 apresenta as principais especificações do motor.

Tabela 4.6 Especificações do motor dos ensaios

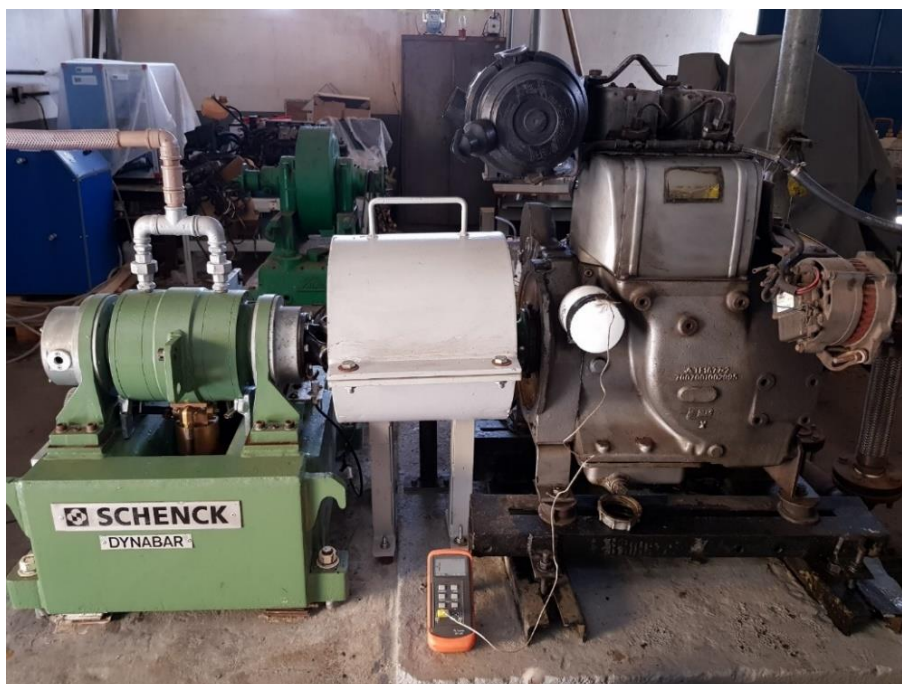
Descrição	Motor Agrale Modelo M790
Número de cilindros	2
Potência Máxima	19,8 kW a 3000 rpm
Volume do Motor (deslocado)	1272 cm ³
Taxa de Compressão	18:1
Ciclo de Funcionamento	Diesel, 4 tempos, injeção direta.

Fonte: Catálogo Agrale.

4.2.2 A bancada dinamométrica

O dinamômetro dos ensaios foi do tipo hidráulico, fabricado pela Shenck, com capacidade para motores de até 200 kW. A Figura 4.8 ilustra o motor e dinamômetro utilizados.

Figura 4.8 Bancada dinamométrica utilizada nos ensaios.



Fonte: O autor

4.2.3 As condições de ensaios dos experimentos

Os ensaios experimentais foram realizados em três condições de carga do motor, 2,7 kW, 5,4 kW e 8,1 kW. A velocidade de rotação foi mantida a 1700 rpm. Esses regimes correspondem a aproximadamente 25%, 50% e 75% da carga máxima do motor utilizando o diesel como combustível. A Tabela 4.7 especifica as condições de torque e potência dos ensaios.

Tabela 4.7 Condições de ensaios do motor

RPM	Carga (%)	Torque (Nm)	Potência (kW)
1700	25	15	2,7
	50	30	5,4
	75	45	8,1

Fonte: O autor

A velocidade rotacional de 1700 rpm foi selecionada em função de ser esta a que mostrou a melhor estabilidade do sistema motor/dinamômetro, principalmente na carga mais elevada, 8,1 kW.

As faixas de erros consideradas para as condições de rotação, torques e potência foram de ± 6 rpm; $\pm 0,3$ Nm e $\pm 0,1$ kW, respectivamente.

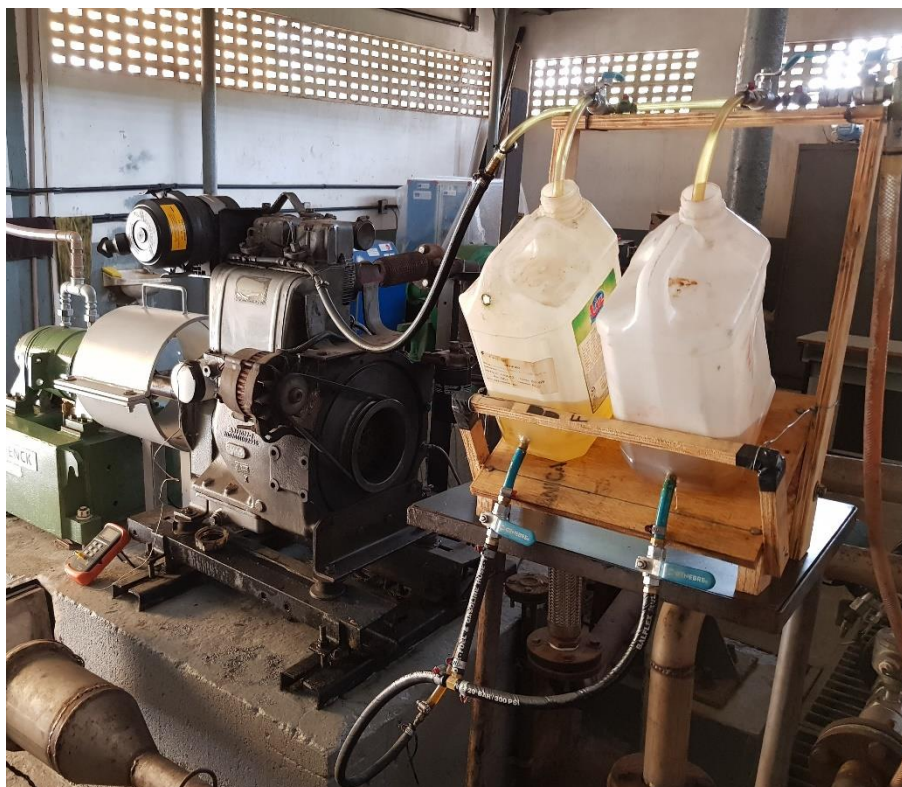
4.2.4 A instrumentação

4.2.4.1 O sistema de medição de combustível

O consumo de combustível foi medido pelo método gravimétrico, utilizando uma balança da marca Welmy, modelo BCW 30, com resolução de 10g. Para minimizar as incertezas nas medições, os tempos foram prolongados para tomadas de cerca de 120 segundos. Os ensaios foram realizados em duplicatas e, ao menos, cinco tomadas de medições do consumo mássico foram feitas.

A Figura 4.9 ilustra o sistema desenvolvido para as medições de diferentes combustíveis.

Figura 4.9 Sistema de separação dos combustíveis dos ensaios



Fonte: O autor

Com esse sistema, por meio de válvulas hidráulicas de fechamento rápido, foi possível realizar as mudanças entre os combustíveis durante os ensaios com o motor em funcionamento nas mesmas condições de carga. Durante a fase inicial das

mudanças de combustíveis, parte do volume de combustível correspondente aos filtros, linhas hidráulicas e bomba injetora era descartado (drenado), de forma a não haver a mistura entre esses. Como o motor permanecia em funcionamento, com apenas pequenas correções na carga hidráulica de frenagem do dinamômetro, as variáveis de erros eram minimizadas, como posição da alavanca de aceleração, temperaturas do motor e do ambiente, entre outras.

4.2.4.2 Medição de gases de exaustão

As medições de gases exaustos do motor foram realizadas por meio de dois analisadores. Um deles dedicado às emissões de HC e o outro apto às medições dos gases O₂, CO₂, CO, NO e NO₂. O segundo analisador media também as temperaturas ambiente e dos gases exaustos. Como os equipamentos foram os mesmos utilizados na seção 4.1, as ilustrações e outras características podem ser observados na seção 4.1.4.2.

4.2.4.3 As medições de temperaturas

Nos ensaios, o motor era aquecido a cada partida a frio por 20 minutos, de forma a também minimizar erros aleatórios influenciados por temperaturas. Um sensor termopar da marca Minipa, modelo MT-405, media a temperatura do óleo do motor para esse monitoramento.

As temperaturas e umidade ambientes foram medidas por meio de um sensor termo-higrômetro, da marca Icel, modelo HT-208.

Na realização dos ensaios, alcançadas as condições de teste, o motor era mantido estável na condição por cerca de 2 minutos e os dados medidos ao menos cinco vezes.

Em relação às condições ambientes, buscaram-se condições semelhantes para a melhor representatividade dos resultados. Assim, as temperaturas eram de, aproximadamente, $29\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a umidade relativa do ar de $65\% \pm 7\%$. As incertezas da instrumentação utilizada aparecem na Tabela 4.3.

4.2.5 Os combustíveis dos ensaios

Os combustíveis utilizados na preparação das misturas foram o biodiesel puro de soja (B100), o etanol anidro, com pureza de 99,3%, e o DEE, com pureza de 99,7%. O diesel puro (D100), com 10 ppm de enxofre (S10), e o B100 foram utilizados nos ensaios como referências. As propriedades dos combustíveis estão descritas na Tabela 4.4, da Seção 4.1.

Com o B100 e o etanol, foi realizada a mistura BE20 (80% de biodiesel e 20% de etanol v/v). Esta foi utilizada nos ensaios e como base para preparação da mistura com o DEE, BE20+DEE (95% de BE20 e 5% de DEE v/v). As proporções de cada um dos combustíveis e os valores de PCI considerados estão apresentados na Tabela 4.8, abaixo.

Tabela 4.8 Combustíveis utilizados nos ensaios experimentais.

Combustíveis	Diesel	B100	Etanol	DEE	PCI (MJ/kg)
D100	100%	0%	0%	0%	42,50
B100	0%	100%	0%	0%	37,45
BE20	0%	80%	20%	0%	35,80
BE20 + DEE	0%	76%	19%	5%	35,84

Fonte: O autor

Os valores de PCI foram calculados considerando as frações volumétricas, densidades e energias de cada um dos combustíveis, conforme apresentado previamente pela equação 4.

4.3 Avaliação dos Efeitos das Interações de Etanol e DEE em Misturas Diesel-Biodiesel por Meio de Análise Multivariada e Superfície de Resposta.

As misturas de três ou mais combustíveis em motores diesel podem apresentar diferenças significativas nos resultados obtidos com a variação das proporções de seus componentes. Por mais sutil que seja a modificação no volume de um dos componentes, necessariamente existe a alteração nas frações dos demais. Devido às diferenças em propriedades e características, as modificações podem resultar em alterações significativas nos resultados obtidos de desempenho e emissões.

Os fatores operacionais do motor e as condições ambientais dos ensaios também influenciam nos resultados e de maneira diferenciada para cada composição de mistura.

A avaliação de todas as combinações de misturas e em cada condição operacional pode exigir um número muito grande de ensaios e, ainda assim, os resultados podem estar sujeitos a erros aleatórios e sistemáticos que podem deixar as conclusões duvidosas.

Neste planejamento experimental de Análise Multivariada, baseado em princípios estatísticos, o objetivo é extrair do sistema o máximo de informações sobre as interações entre DEE, etanol e B20, desenvolvendo um número mínimo de ensaios experimentais.

4.3.1 O planejamento experimental das misturas

Em sistemas que envolvem reações químicas (exemplo: motor de combustão interna) dois tipos de variáveis podem influenciar nas respostas do sistema: as de processo e de mistura. Mudanças nos níveis dessas variáveis afetam a resposta do sistema em razão dos efeitos causados por cada uma individualmente (efeitos principais) e/ou dos efeitos decorrentes da interação entre ambas. Desse modo, em muitos casos é importante que seja realizado um estudo para a otimização dos níveis dessas variáveis para obtenção da melhor resposta do sistema.

Em trabalhos que visam a otimização de sistemas, nas mais diversas áreas da ciência e da indústria, é muito comum o uso de metodologias com planejamento de experimentos (DOE, acrônimo do inglês de *Design of Experiments*) (BARROS NETO, SCARMINIO & BRUNS, 2010). O DOE é uma ferramenta da estatística aplicada, desenvolvida para a otimização de fatores que influenciam na resposta de um sistema, bem como na obtenção de modelos para estimativas dessas respostas. Além disso, a utilização de DOE possibilita economia de recursos e tempo, haja vista que no delineamento experimental são necessários menos experimentos em relação às otimizações univariadas (BARROS NETO, SCARMINIO & BRUNS, 2010).

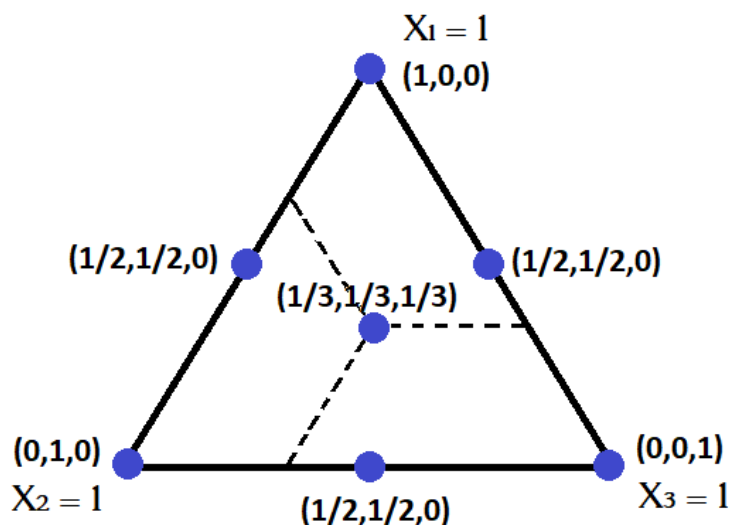
Nos problemas que compreendem a otimização das variáveis de processo (exemplos: pressão de injeção, tempo de injeção e etc), os níveis podem ser alterados de forma independente, ou seja, a mudança no nível de uma não resulta em mudança do nível da outra (COSCIONE, 2005). Entretanto, no caso específico das variáveis de mistura, a resposta do sistema é influenciada pela proporção dos componentes. As alterações nos níveis das variáveis de mistura ocorrem de forma dependente, uma vez que a mudança na fração de um dos componentes (x_i) implica na mudança da fração do outro, já que, a soma das frações é sempre igual a 1. Assim, o espaço (domínio) experimental de misturas com q componente fica sujeito às seguintes restrições:

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, q \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_q = 1 \quad (7)$$

O formato do espaço experimental depende do número de componentes da mistura, constituindo-se num *simplex* ($q-1$) dimensional. Na Figura 4.10 é mostrada a representação gráfica do espaço experimental para uma mistura de três componentes (mistura ternária), que é um triângulo equilátero onde os vértices correspondem aos componentes puros, os lados às misturas binárias e os pontos internos às misturas ternárias.

Figura 4.10 Espaço experimental para mistura de três componentes



Fonte: Coscione (2005).

Para três componentes (ou pseudocomponentes) quaisquer (A, B e C), devem ser realizados experimentos com 7 (sete) misturas de composição diferentes: 3 (três) experimentos com componentes puros (100% de A, 100% de B e 100% de C, correspondente aos vértices do triângulo do espaço simplex); 3 (três) experimentos com misturas binária (50% de A e 50% B; 50% de A e 50% C e 50% de B e 50% C, correspondendo ao ponto médio das arestas) e, por fim, 1 (um) experimento com a mistura ternária em um ponto central (33% de A, 33% de B e 33% de C, correspondendo ao centroide)(COSCIONE; DE ANDRADE; MAY, 2005). Caso sejam estabelecidos mínimos para os componentes, as proporções entre eles irão variar a partir dos limites mínimos; como exemplo, zero por cento (0%) do componente será equivalente ao limite mínimo estabelecido.

4.3.1.1 Os limites mínimos para os componentes

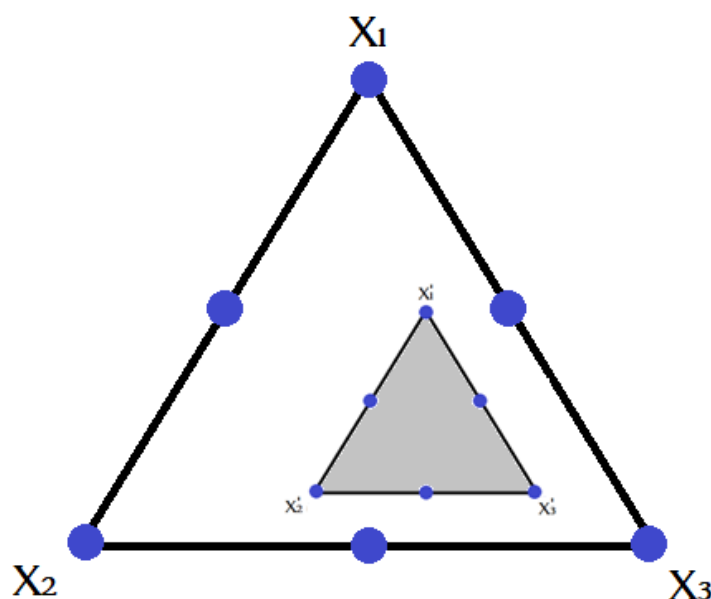
No planejamento experimental de misturas, em função de limitações técnicas ou práticas, pode surgir a necessidade de restringir a proporção de um ou mais componentes da mistura. Essa necessidade pode ocorrer, por exemplo, pela indispensabilidade da presença de todos os componentes para que a mistura proporcione o resultado de interesse. Nessas condições, o espaço experimental passa a ser uma sub-região do espaço *simplex* original, sendo imprescindível a definição de limites inferiores (L_i) e/ou superiores (L_s) para os componentes da mistura

(MONTGOMERY, 2017). Assim, x_i , que é a proporção do componente i na mistura, tem sua faixa de variação definida na forma:

$$0 \leq L_i \leq x_i \leq L_s \leq 1 \quad (8)$$

Quando se impõem limites nos componentes de uma mistura, é necessário garantir que a distribuição original dos experimentos seja obedecida. Dessa forma, o espaço experimental passa a ser uma sub-região interna ao *simplex* e deve conservar o formato original do mesmo. No entanto, estes novos componentes não são, na realidade, puros e, por essa razão, eles são chamados de pseudocomponentes (NOVAES *et al.*, 2018). A figura 4.11 representa o espaço experimental em um planejamento com restrições nas proporções dos componentes.

Figura 4.11 Espaço simplex com restrições dos componentes



Fonte: Coscione (2005).

Os limites mínimos estabelecidos neste planejamento experimental (apartado 3) para os pseudocomponentes foram de 70%, 20% e 2% para B20, etanol e DEE (em volume), respectivamente. Com esses limites estabelecidos, foi possível garantir que todas as misturas contivessem sempre os 3 pseudocomponentes.

O limite mínimo de 20% para o etanol foi arbitrado de forma a modificar as propriedades das misturas em relação ao B20, especialmente a redução do NC.

No caso do limite de 2% para o DEE, foi para garantir sempre a presença do DEE nas misturas. Com a elevação das frações de DEE, de 2% até 10%, buscou-se o aumento do NC das misturas, avaliado por meio dos resultados de desempenho e emissões.

O limite mínimo de 70% para o B20, foi selecionado de forma que as misturas tivessem propriedades adequadas para uso no motor diesel. O uso do B20 foi selecionado de forma que o biodiesel e o diesel estivessem presentes nas misturas.

A Tabela 4.9 apresenta a lógica utilizada nas definições das composições das misturas, levando em consideração a metodologia e os limites mínimos arbitrados para cada componente.

Tabela 4.9 Composições das misturas do planejamento experimental

Misturas	Pseudocomponentes			Componentes originais (%)		
	X'1	X'2	X'3	B20	Etanol	DEE
1	1	0	0	78	20	2
2	0	1	0	70	28	2
3	0	0	1	70	20	10
4	0,5	0,5	0	74	24	2
5	0,5	0	0,5	74	20	6
6	0	0,5	0,5	70	24	6
7	0,33	0,33	0,33	73	23	4

Fonte: O autor

Como exemplo, a mistura 1 utiliza 100% de A (B20), 0% de B (etanol) e 0% de C (DEE). Como os limites mínimos de etanol e DEE são de 20% e 2%, os valores correspondentes a 0% serão de 20% e 2%, respectivamente. Logo, a fração de B20 será o valor complementar aos limites mínimos; ou seja, 78%, formando a mistura B20(78)E(20)DEE(2). De forma a melhor apresentar as misturas nos gráficos, as nomenclaturas foram simplificadas como o B, corresponde ao B20, E, ao etanol, e D, ao DEE.

A tabela 4.10, apresenta os combustíveis utilizados nos ensaios experimentais e os respectivos conteúdos de oxigênio e valores de PCI. Os combustíveis D100 e B20 foram utilizados como referências nos resultados.

Tabela 4.10 Misturas utilizadas nos ensaios

Combustíveis	Diesel (%)	Biodiesel (%)	Etanol (%)	DEE (%)	O ₂ (%)	PCI (MJ/kg)
D100	100	0	0	0	0	42,50
B20	80	20	0	0	2,24	41,46
B78E20D2	62,4	15,6	20	2	8,7	38,91
B70E28D2	56	14	28	2	11,2	37,91
B73E23D4	58,4	14,6	23	4	9,99	38,45
B70E24D6	56	14	24	6	10,67	38,23
B70E20D10	56	14	20	10	10,13	38,56
B74E24D2	59,2	14,8	24	2	9,95	38,41
B74E20D6	59,2	14,8	20	6	9,41	38,74

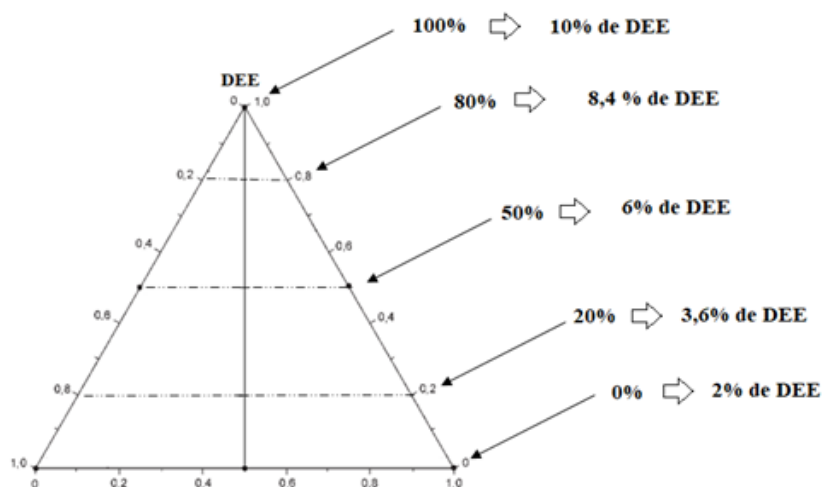
Fonte: O autor.

Os teores de oxigênio e PCI foram calculados com base nas densidades, volumes, PCI e/ou teores de oxigênio dos componentes individuais das misturas, conforme equações 4 e 5.

4.3.1.2 A interpretação da superfície de resposta

Como explicado anteriormente, a representação de um sistema de mistura com três componentes pode ser realizada por meio de diagramas triangulares. A figura 4.12, ilustra como identificar as frações dos componentes na superfície de resposta.

Figura 4.12 Interpretação de superfície de resposta

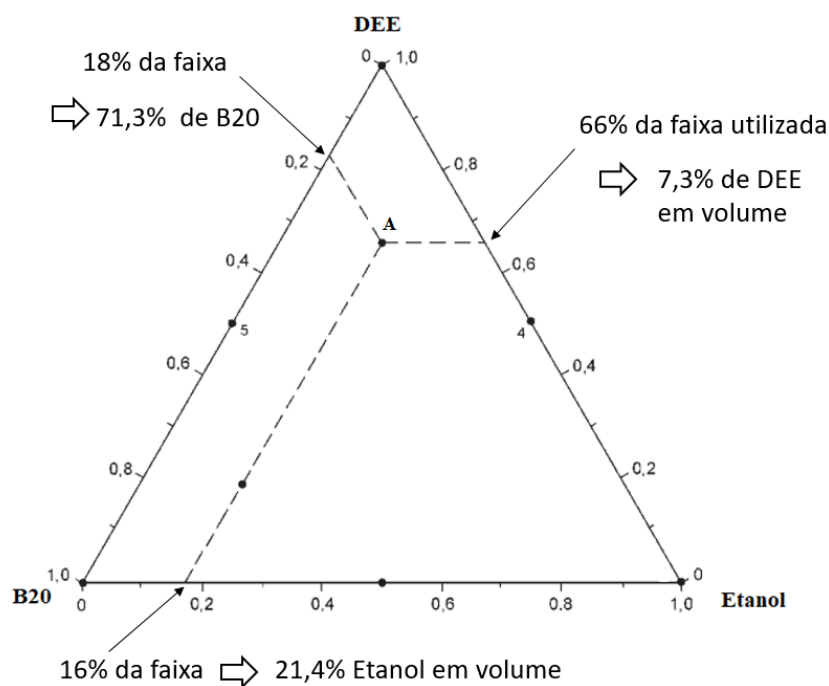


Fonte: Coscione (2005) adaptada.

A localização da composição das misturas não é trivial em um primeiro momento. Um procedimento comumente empregado para facilitar a interpretação dos pontos de mistura é a observação da direção em que a proporção do componente aumenta em relação ao seu respectivo eixo (COSCIONE; DE ANDRADE; MAY, 2005), conforme Figura 4.12.

Considerando os limites mínimos estabelecidos para o DEE, etanol e B20, um ponto A, arbitrado como exemplo na Figura 4.13, teria as seguintes frações volumétricas para os componentes: 7,3% de DEE, 21,4% de etanol e 71,3% de B20.

Figura 4.13 Frações de mistura de um determinado ponto



Fonte: Coscione (2005) adaptada.

4.3.2 Os combustíveis básicos para preparação das misturas

Os combustíveis utilizados na preparação das misturas foram o diesel puro (D100) com 10 ppm de enxofre (S10), o biodiesel puro de soja (B100), o etanol anidro com pureza de 99,3%, e o DEE, com pureza de 99,7%. As propriedades dos combustíveis foram previamente apresentadas na Tabela 4.4. Com o D100 e o B100, foi realizada a mistura B20 (20% de B100 e 80% de D100). Esta foi utilizada como

base para preparação das misturas com o etanol e com o DEE. Como referências nos resultados, foram também ensaiados o D100 e o B20.

4.3.3 O motor e a bancada dinamométrica

Os ensaios foram realizados em um motor diesel, da marca Agrale, dois cilindros com injeção direta de combustível - mesmo motor utilizado nos ensaios da seção 4.2. As especificações desse motor foram previamente apresentadas na Tabela 4.6.

As informações da bancada dinamométrica, composta de dinamômetro hidráulico e instrumentação para medição de consumo e emissões, foram descritas nas seções 4.2.2 e 4.2.4.

4.3.4 As condições de carga dos ensaios

Os ensaios foram realizados na velocidade de rotação de 1700 rpm e potências do motor de 2,7 kW, 5,4 kW e 8,1 kW. Essas condições de ensaios foram as mesmas descritas na seção 4.2.3.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

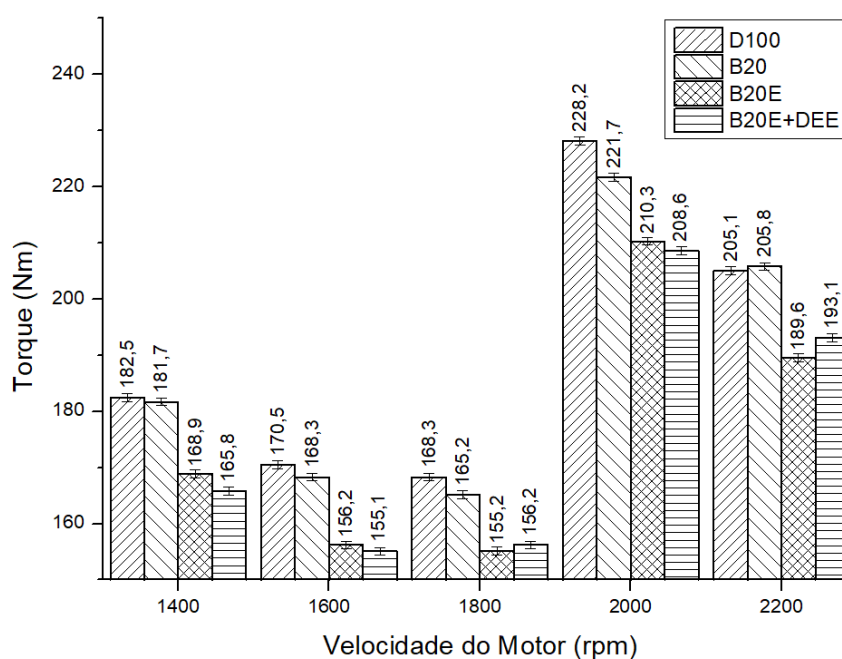
5.1 Resultados da Avaliação do Desempenho e Emissões de um Motor Diesel Utilizando o DEE em Misturas com Diesel, Biodiesel e Etanol

5.1.1 Desempenho

5.1.1.1 Torque e potência máximos

Os resultados de máximos torques e potências obtidos com os combustíveis estão apresentados nas figuras 5.1 e 5.2, respectivamente.

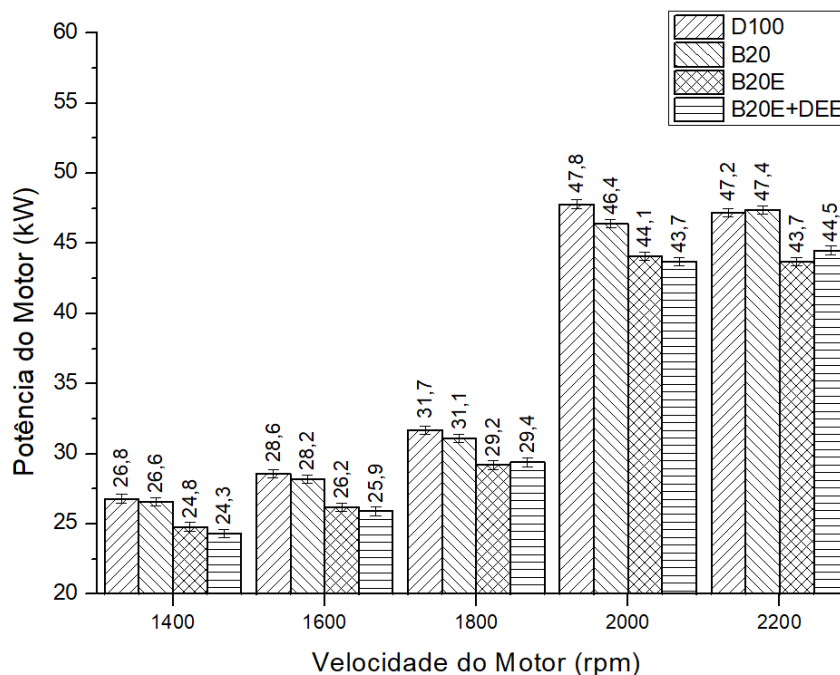
Figura 5.1 Resultados de torques máximos



Fonte: O autor

Observa-se que, na rotação de 2000 rpm, ocorrem os valores mais elevados de torque para todos os combustíveis. Isso se deve ao projeto do motor, em que provavelmente a eficiência volumétrica esteja otimizada nessa rotação, por características de projeto do sistema de admissão de ar e desenho da câmara de combustão, entre outros.

Figura 5.2 Valores de potências máximas.



Fonte: O autor

Os resultados com o uso do B20² foram semelhantes aos do D100, apenas com leves diminuições entre 0,4% e 2,8%. Na rotação de 2200 rpm, porém, o B20 mostrou leve aumento em relação ao D100. As variações podem ser explicadas, primeiramente, pelo menor PCI do B20 em relação ao D100 (cerca de 2,5%). No entanto, a mistura com o biodiesel apresenta maior densidade, viscosidade, menor compressibilidade e maior velocidade do som. Essas propriedades são apontadas como responsáveis pela antecipação da injeção do combustível, podendo resultar em melhoria do desempenho. Além disso, o NC é um pouco elevado em função do biodiesel. Como explicado na seção 4.1, nessa parte dos ensaios o motor é colocado em carga máxima, logo, com a bomba injetora fixada em posição de máxima aceleração. Dessa forma, é natural que os combustíveis com menor PCI, proporcionem menores valores de torque ao motor. Além disso, as características da injeção de combustível (tempo e pressão de injeção) foram as condições padrões do

² B20 = 20% de biodiesel + 80% de diesel

motor; sendo fatores que também contribuem para as variações dos resultados encontrados.

As misturas com o etanol e o DEE mostraram a redução do torque, em relação ao D100 e ao B20. Conforme explicado, essa diminuição é atribuída ao menor PCI das misturas.

Nas misturas B20E³ e o B20E+DEE⁴, observou-se desempenho similar entre si. Os valores de PCI's calculados das duas misturas foram de 40,24 MJ/kg e 40,09 MJ/kg para o B20E e o B20E+DEE, respectivamente.

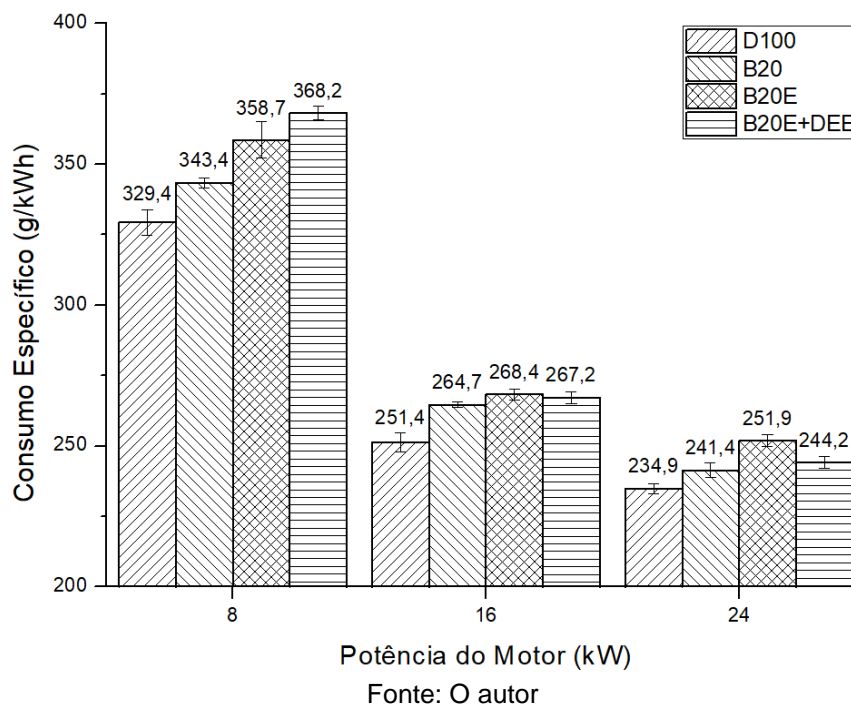
5.1.1.2 Consumo específico de combustível

O consumo específico de combustível (BSFC) corresponde à relação entre a vazão mássica de combustível consumida e a potência entregue pelo motor. A figura 5.3 apresenta os resultados de BSFC obtidos com os combustíveis dos ensaios.

³ B20E = 90% de B20 + 10% de etanol

⁴ B20E + DEE = 95% de B20E + 5% de DEE

Figura 5.3 Resultados de consumo específico de combustível.



Conforme apresentado na seção 4.1.3.1, os ensaios de BSFC foram realizados nas mesmas condições de carga e velocidade, ou seja, mesma potência para cada um dos combustíveis. Logo, esses resultados são diretamente influenciados pelas diferenças entre os PCI dos combustíveis testados.

No caso do B20, os resultados mostraram elevação do BSFC em relação ao D100 (2,8% a 5,3%). O principal motivo é o menor PCI do B20 em relação ao D100 (Tabela 3.5). Como a diferença entre os valores de PCI (2,5%) é menor do que a diferença observada do BSFC, esses resultados irão refletir em menor eficiência do motor com o B20. É importante ressaltar que as condições do sistema de injeção de combustível foram mantidas constantes, conforme o projeto original do motor. Esses resultados poderiam ser modificados caso houvesse alteração do tempo de injeção, uma vez que existe a possibilidade de otimização para cada combustível ensaiado.

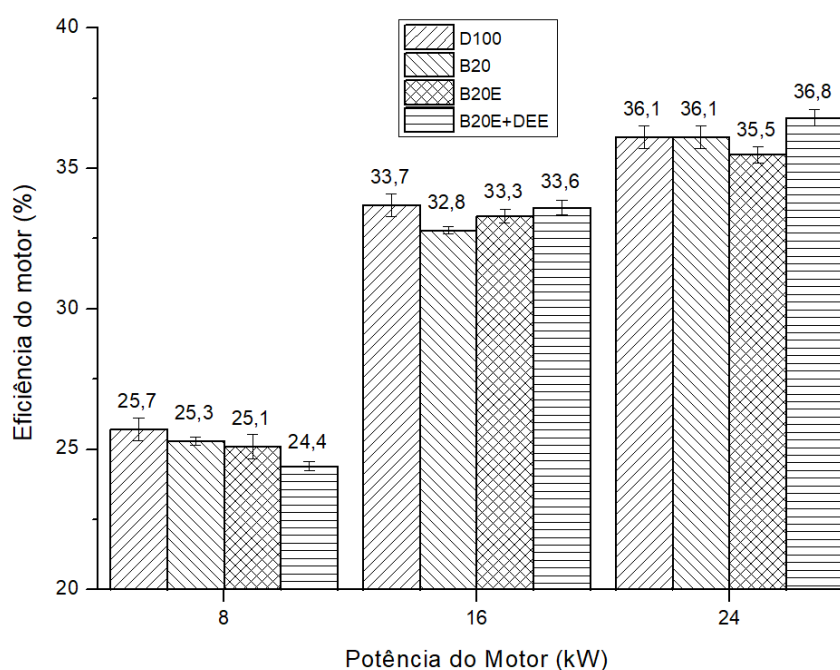
Considerando as misturas B20E e B20E+DEE nas cargas correspondentes às potências de 16 kW e 24 kW, o BSFC do B20E+DEE diminuiu em relação ao B20E. Como o PCI do B20E+DEE é menor do que o do B20E, isso revela um melhor aproveitamento da energia do combustível (eficiência), que pode ser atribuída aos efeitos positivos da adição do DEE, como elevação do NC da mistura. Além disso, as

misturas com DEE reduzem ainda mais a viscosidade e elevam a volatilidade, proporcionando uma melhor qualidade da mistura ar-combustível e do processo de queima (VENU; MADHAVAN, 2017).

5.1.1.3 Eficiência do motor

A eficiência do motor, ou eficiência da conversão de combustível, é um dos mais importantes indicadores para a avaliação do desempenho. Nos ensaios deste trabalho, como os comparativos foram realizados nas mesmas condições de carga e potência, foi necessária a compensação da massa de combustível injetada quando os PCI diminuíam. Quando as variações no consumo são maiores do que as variações em PCI, os resultados afetam diretamente a eficiência do motor. Essas variações são devidas às diferenças em propriedades físico-químicas dos combustíveis, que influenciam nos processos de injeção, formação de mistura, na qualidade da queima e na eficiência da combustão. Os resultados de eficiência do motor com os combustíveis dos ensaios estão apresentados na Figura 5.4.

Figura 5.4 Resultados de eficiência do motor.



Fonte: O autor

Observa-se na Figura 5.4 maior eficiência do motor com o aumento da carga, devido à maior eficiência mecânica. Como a velocidade rotacional é a mesma, as

condições de atritos são semelhantes, logo, existe a elevação da eficiência mecânica, uma vez que, na mesma rotação, mais trabalho é realizado.

Os resultados de eficiência na carga baixa, 8 kW, mostram eficiências mais baixas com o uso do B20E e B20E+DEE. Como o etanol possui entalpia de vaporização elevada e o DEE alta volatilidade, ambas causam um resfriamento da mistura ar-combustível, que ocasiona o aumento do ID. Em cargas mais baixas, devido a menores temperaturas nas paredes da câmara e nos gases residuais da combustão, considera-se que existe maior sensibilidade do motor às características mencionadas dos combustíveis, sendo esses fatores responsáveis pela diminuição da eficiência do motor.

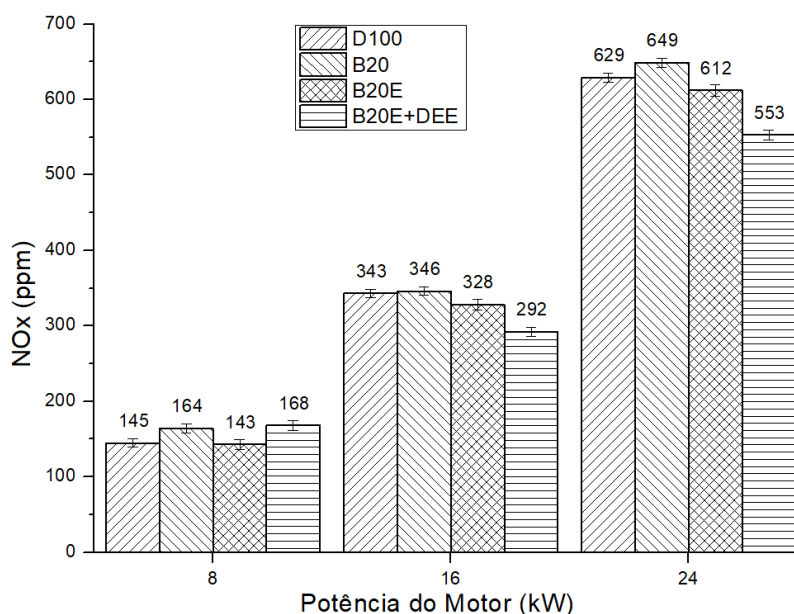
Conforme as cargas aumentam, as eficiências com as misturas com etanol e DEE aumentam. Na carga mais alta do motor, 24 kW, observa-se que a eficiência com o B20E+DEE foi superior aos demais combustíveis. Nessa condição de carga, as magnitudes de temperatura e pressão na câmara aumentam, propiciando um melhor ambiente para a atomização e evaporação da mistura ar-combustível, aumentando a e qualidade da combustão. A mistura B20E+DEE possui baixa viscosidade e alta volatilidade em função do DEE, características que proporcionam uma melhor atomização e evaporação do jato de combustível e na qualidade da queima.

5.1.2 Resultados de emissões

5.1.2.1 Emissões de NO_x

A figura 5.5 apresenta os resultados de emissões de NO_x obtidos com os combustíveis testados.

Figura 5.5 Emissões de NOx.



Fonte: O autor.

Observam-se os maiores índices de NOx em cargas mais elevadas, devido ao aumento das pressões e temperaturas nessas condições, que favorecem a formação de NOx pelo mecanismo térmico.

Considerando a mistura B20, os resultados mostraram elevação das emissões de NOx em relação ao D100, aproximadamente 13,1%, 0,9% e 3,2%, nas cargas de 8 kW, 16 kW e 24 kW, respectivamente. Entre os principais fatores que explicam esses resultados estão a maior quantidade de combustível injetada (devido ao menor PCI), presença de oxigênio no combustível e adiantamento físico do momento da injeção do combustível; mesmo o motor mantendo as características originais do sistema de injeção, propriedades do biodiesel como menor módulo de compressibilidade (e maior velocidade do som) e maior viscosidade fazem com que haja a antecipação da injeção do combustível nos motores com sistema de injeção por bomba injetora mecânica.

O uso da mistura B20E mostrou redução das emissões de NOx em relação ao D100 (1,4% a 4,4%) e ao B20 (5,2% a 12,8%). Essa redução foi devido ao efeito de resfriamento causado pela maior entalpia de vaporização do etanol presente na mistura.

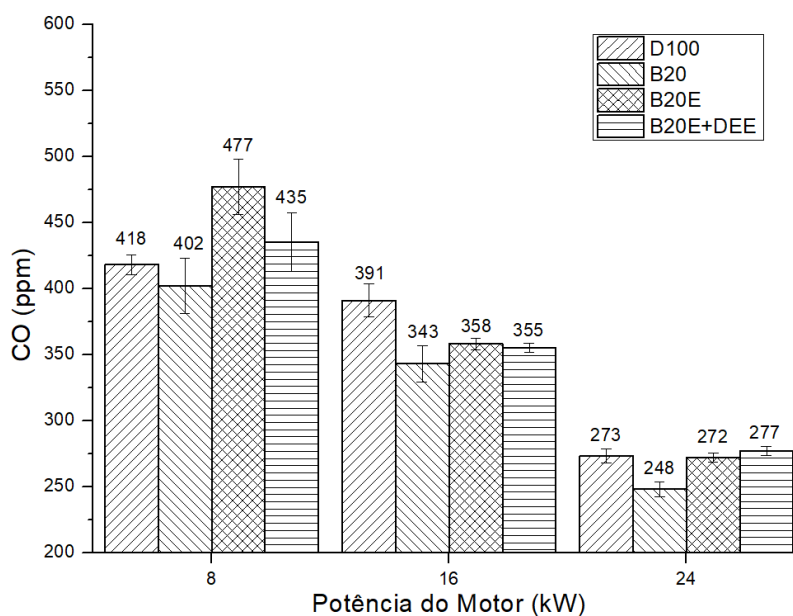
O uso da mistura com o DEE mostrou as menores emissões de NOx nas cargas de 16 kW e 24 kW. A explicação é uma ação combinada de propriedades do etanol e DEE na mistura B20E + DEE. A entalpia de vaporização elevada pela presença do etanol proporciona o resfriamento da mistura, ao passo que a maior volatilidade e NC do DEE melhoram as características de ignição, diminuindo o ID e os picos de pressão e temperatura da combustão.

Na carga mais baixa, 8 kW, no entanto, as emissões de NOx com o B20E+DEE apresentaram valores elevados em relação aos demais combustíveis. Nessa condição de carga, a maior concentração de oxigênio contribui com maiores taxas de reações com o nitrogênio do ar. Além disso, devido a temperaturas menores nas regiões da câmara e da combustão, a qualidade da queima com a mistura deteriora em função da maior entalpia de vaporização. O efeito de resfriamento aumenta o ID e traz como consequência a elevação dos picos de pressão da combustão, que contribui com a formação das emissões de NOx.

5.1.2.2 Emissões de CO

A figura 5.6 apresenta os resultados das emissões de CO obtidos nos ensaios.

Figura 5.6 Emissões de CO.



Fonte: O autor.

A mistura B20 mostrou reduções em relação ao D100 (3,8% a 12,1%). A redução foi atribuída à presença de oxigênio, que melhora a qualidade da queima e a eficiência da combustão.

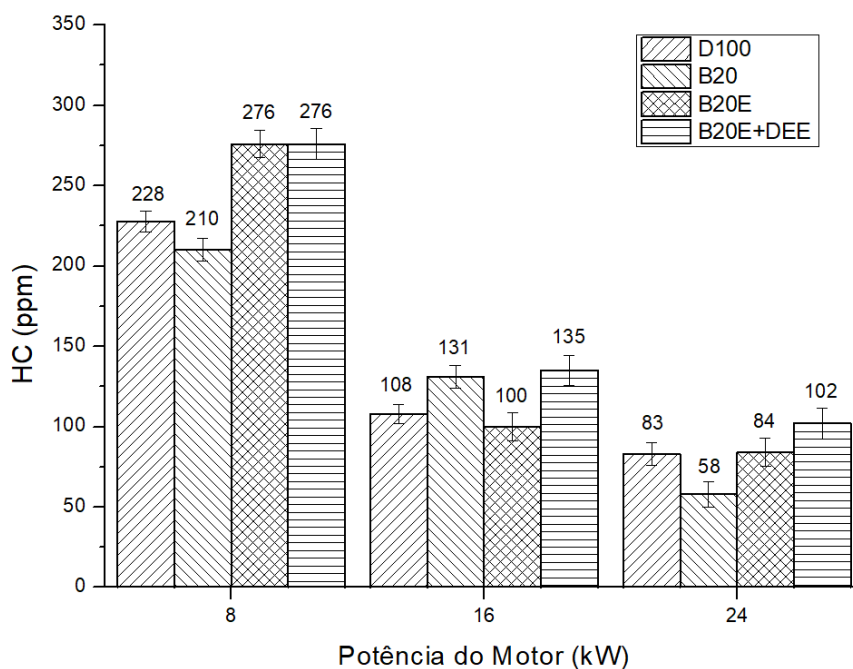
No caso da mistura B20E, apesar da elevação do conteúdo de oxigênio, os resultados mostraram elevação das emissões de CO em relação ao B20. Atribui-se esses resultados à diminuição da temperatura de combustão devido à maior entalpia de vaporização do etanol. Além disso, o menor NC da mistura B20E eleva o ID, de forma que reduz o tempo de combustão em temperaturas elevadas e diminui a oxidação de CO.

O uso da mistura B20E+DEE reduziu as emissões de CO em relação à mistura B20E, nas cargas de 8 kW e 16 kW. Esse resultado foi atribuído ao aumento do NC, da volatilidade e da facilidade de evaporação devido ao DEE. Além disso, o conteúdo de oxigênio da mistura também é um pouco mais elevado. Esses fatores conduzem à uma combustão mais completa e à redução das emissões de CO. No entanto, um discreto aumento das emissões de CO foi observado na carga de 24 kW.

5.1.2.3 Emissões de hidrocarbonetos

Emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC) são decorrentes de reações incompletas da combustão. A figura 5.7 apresenta os resultados de emissões de HC obtidos nos experimentos.

Figura 5.7 Emissões de HC



Fonte: O autor

Observam-se menores níveis de emissões em cargas mais elevadas, em função de reações de combustão mais completas. Além disso, em temperaturas mais elevadas diminuem as probabilidades de ocorrência de combustíveis não queimados em zonas de fendas do cilindro do motor, como nas regiões dos anéis de segmentos.

A mistura B20 apresentou as menores emissões entre os combustíveis, nas cargas de 8 kW e 24 kW. Esses resultados foram atribuídos ao aumento do teor de oxigênio e ao maior NC pela presença do biodiesel. O maior NC diminui o tempo de início da ignição e o maior teor de oxigênio proporciona uma combustão mais completa e mais eficiente. Na carga intermediária, no entanto, foram observadas maiores emissões com o B20, em relação ao D100; um possível erro sistemático pode ter ocorrido nessa condição de carga (a recomendação, nesse caso, seria a repetição do experimento, o que foi impossibilitado devido à observação tardia).

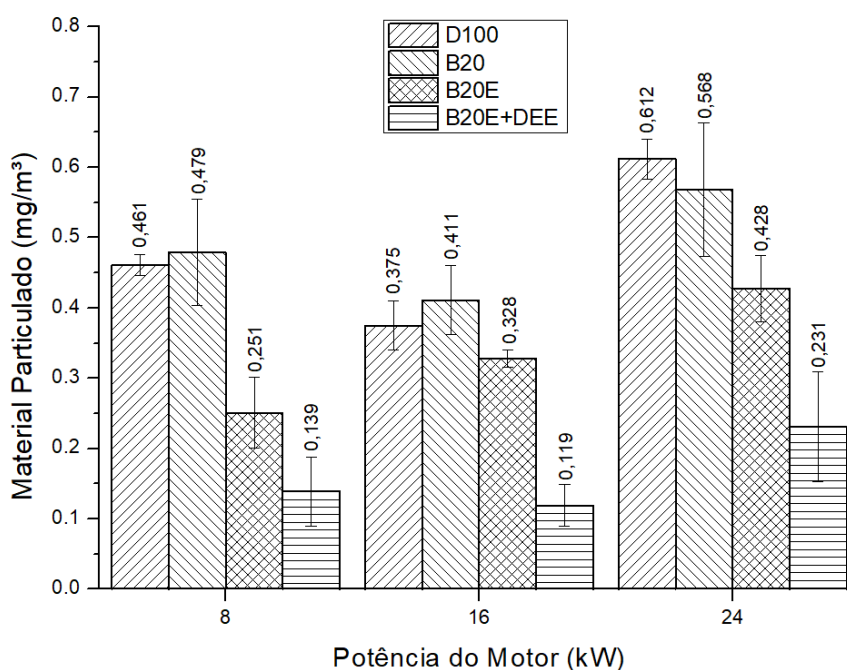
As misturas B20E e B20E + DEE mostraram elevação das emissões de HC em relação ao D100 e ao B20. Um dos principais fatores para essa elevação é a maior entalpia de vaporização ocasionada pela presença do etanol na mistura, que eleva o ID, devido ao efeito de resfriamento e à maior temperatura de ignição.

5.1.2.4 Emissões de MP

As emissões de MP são resultantes de reações incompletas da combustão. Essas tendem a diminuir com o uso de biocombustíveis em relação ao diesel fóssil, devido ao conteúdo de oxigênio e à ausência de aromáticos e enxofre em sua composição.

A Figura 5.8 apresenta os resultados de emissões de MP obtidos com os combustíveis testados.

Figura 5.8 Emissões de MP.



Fonte: O autor

A mistura B20 mostrou redução de 7,2% do MP em relação ao D100, na carga de 24 kW. No entanto, as emissões aumentaram nas cargas de 8 kW e 16 kW cerca de 3,9% e 9,6%, respectivamente. Embora apresente leve fração de oxigênio em sua composição, a mistura B20 apresenta maior viscosidade, o que normalmente diminui a atomização e evaporação do jato de combustível, sendo essa uma das explicações para esse aumento de MP.

As misturas B20E e B20E+DEE, mostraram redução de emissões de MP em relação ao D100 e ao B20, em todas as condições de ensaios. O conteúdo de oxigênio e a menor viscosidade são os principais fatores responsáveis por esses resultados.

Existe a entrega efetiva de maior quantidade de oxigênio nas zonas de pirólises da combustão, aumentando a oxidação e reduzindo as emissões de MP nos gases da combustão. Já a redução da viscosidade diminui o tamanho médio das gotículas do jato de combustível, que melhora a atomização, a mistura ar-combustível e a qualidade da queima, contribuindo para a redução dessas emissões.

5.2 Resultados do Uso do DEE em Misturas Biodiesel-Etanol

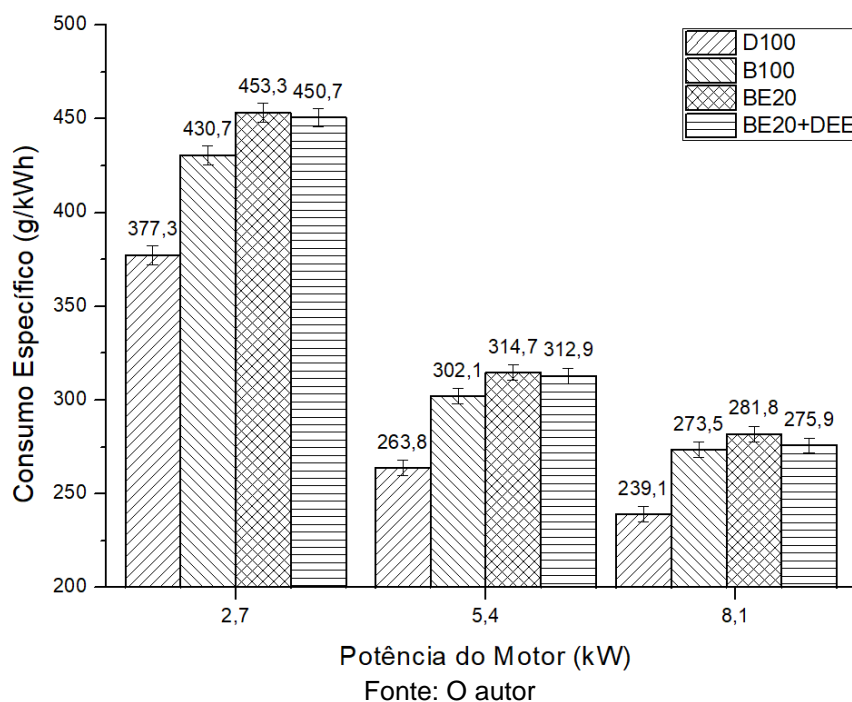
Nesses ensaios, misturas de biocombustíveis foram utilizadas sem o diesel fóssil em sua composição. O etanol foi utilizado em proporção considerada elevada (20%v/v) de mistura com o biodiesel. O DEE foi adicionado em fração de 5% v/v à mistura diesel-biodiesel-etanol.

5.2.1 Desempenho do motor

5.2.1.1 Consumo específico de combustível

Os resultados de consumo específico de combustível (BSFC) estão apresentados na figura 5.9.

Figura 5.9 Consumo específico de combustível



Observa-se a diminuição do BSFC em cargas mais elevadas, devido ao aumento da eficiência mecânica e térmica nessas condições, conforme discutido na seção 5.1.1.

Os resultados do uso do B100⁵ mostraram o aumento do BSFC em relação ao D100, em média de 14% nas três condições de cargas dos ensaios. Esses resultados são atribuídos à diferença entre os valores de PCI (cerca de 12%) dos combustíveis. Além disso, a viscosidade elevada do B100 contribui com o aumento do BSFC, uma vez que diminui a qualidade do jato de combustível, elevando o diâmetro médio e densidade das gotículas e a qualidade da mistura com o ar.

A mistura BE20⁶ mostrou elevação do BSFC em relação ao B100, em valores de aproximadamente 5,3%, 4,2% e 3%, nas cargas de 2,7 kW, 5,4 kW e 8,1 kW, respectivamente. A explicação natural para a elevação do BSFC é a redução do PCI devido ao etanol, cerca de 4,4%. No entanto, as variações nos resultados podem ser atribuídas, também, ao efeito de resfriamento da mistura ar-combustível, ocasionada pela elevada entalpia de vaporização do etanol. Observa-se a maior variação na carga mais baixa, 2,7 kW, em que o efeito de resfriamento é mais proeminente, uma vez que as temperaturas na câmara e nos gases residuais são menores.

A introdução do DEE mostrou uma pequena redução do BSFC em relação à mistura BE20. Embora o PCI do BE20+DEE⁷ tenha se elevado discretamente em relação ao BE20, a redução no consumo foi atribuída ao aumento do NC e volatilidade da mistura, que melhoraram a evaporação do jato de combustível e diminuíram o ID, contribuindo para a melhoria da conversão da energia do combustível.

5.2.1.2 Eficiência do motor

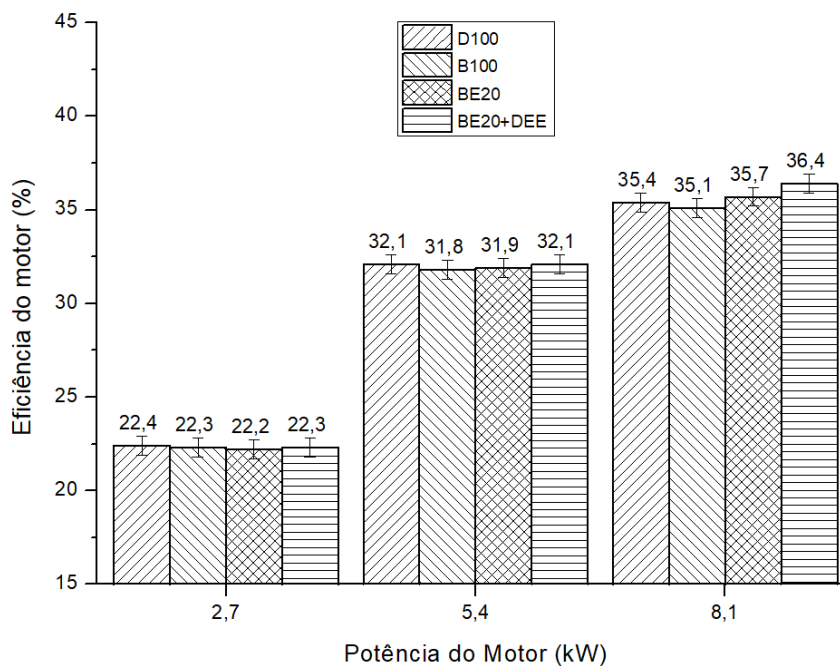
A Figura 5.10 apresenta os resultados de eficiência do motor. Observa-se o aumento da eficiência em cargas mais elevadas, devido à maior eficiência mecânica e menor BSFC.

⁵ Biodiesel puro

⁶ (20% de etanol + 80% de biodiesel)

⁷ (95% de BE20 + 5% de DEE)

Figura 5.10 Eficiência do motor.



Fonte: O autor

O uso do B100 mostrou discreta redução na eficiência do motor em relação ao D100, cerca de 0,7% em média das três condições de cargas. Pode-se atribuir essa variação às diferenças em viscosidade e densidade, que influenciam na qualidade do jato de combustível (diâmetro das gotículas; ângulo de cone do jato; área de combustível projetada), na formação da mistura e na qualidade da queima. No entanto, o maior NC e a presença de oxigênio do biodiesel são fatores favoráveis ao processo de combustão e à eficiência da conversão de combustível.

Os resultados do uso do BE20 mostraram aumento da eficiência em relação ao B100, cerca de 0,3% e 1,7%, nas cargas de 5,4 kW e 8,1 kW, respectivamente. O uso do etanol em soluções com o biodiesel diminui a viscosidade e a densidade, ao passo que eleva o conteúdo de oxigênio. O maior teor de oxigênio proporciona uma combustão mais completa; já a redução da viscosidade melhora as características do jato de combustível em relação ao biodiesel. Porém, como fatores considerados adversos à eficiência com o etanol, estão a diminuição do NC, do PCI, e a elevação da entalpia de vaporização. Na carga mais baixa, a eficiência reduziu em função das menores temperaturas na câmara e da maior entalpia de vaporização da mistura.

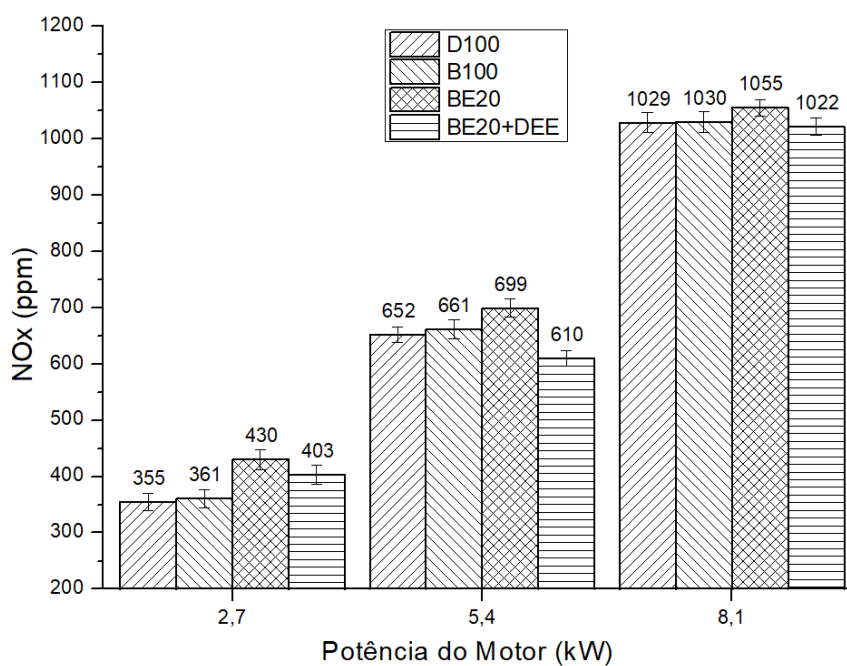
O uso do BE20+DEE elevou a eficiência do motor em relação ao BE20. Na carga de 8,1 kW, a mistura apresentou a maior eficiência do motor também em relação aos demais combustíveis do comparativo. A melhoria da eficiência com a adição do DEE foi atribuída ao aumento do NC e da volatilidade, que proporcionam uma evaporação mais rápida e a redução do ID da combustão.

5.2.2 Resultados de emissões

5.2.2.1 Emissões de NOx

A figura 5.11 apresenta os resultados das emissões de NOx obtidos nos ensaios.

Figura 5.11 Emissões de NOx



Fonte: O autor

O aumento das emissões de NOx em cargas mais elevadas é decorrente das maiores temperaturas da combustão e nos gases exaustos.

O uso do B100 elevou os níveis de NOx em relação ao uso do D100. Uma das explicações para esse resultado é o maior conteúdo de oxigênio no biodiesel, que aumenta a disponibilidade de oxigênio e eleva a temperatura da combustão. Além disso, o menor módulo de compressibilidade do biodiesel causa a antecipação da

injeção do combustível (em sistemas com bomba injetora). Isso melhora o processo de queima, mas causa o aumento das temperaturas e pressões da combustão e contribui para a formação de NOx. É importante ressaltar que, no motor utilizado, as configurações do sistema de injeção de combustível foram mantidas originais.

O uso do etanol na mistura com o biodiesel, BE20, mostrou elevação das emissões de NOx em relação aos demais combustíveis testados. Esses resultados foram atribuídos à alta concentração de etanol utilizada, 20% em volume. Dessa forma, o NC resultante da mistura diminui e provoca o aumento do ID que pode resultar em maiores picos de pressão e temperatura da combustão. Além disso, a alta disponibilidade de oxigênio no combustível contribui para uma combustão mais completa e eficiente, porém com a elevação das temperaturas e maior formação de NOx.

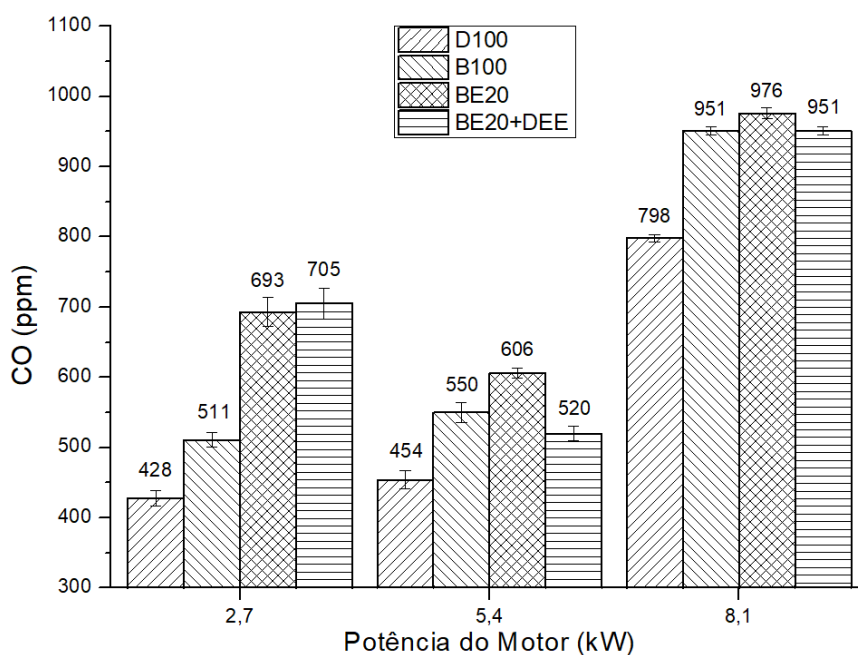
Com o uso do BE20+DEE, as emissões de NOx reduziram em comparação ao BE20 (entre 3,1% e 12,7%). Nas cargas de 5,4 kW e 8,1 kW, as emissões foram menores também em relação aos demais combustíveis do comparativo. Esses resultados foram atribuídos ao aumento do NC, devido ao DEE, e à entalpia de vaporização elevada em função do etanol. Com a melhoria do NC, ocorre a redução do ID e dos picos de pressão na fase inicial da combustão. A entalpia de vaporização elevada é um fator responsável pela redução das temperatura da combustão.

5.2.3 Emissões de CO

A figura 5.12 apresenta os resultados das emissões de CO obtidos nos ensaios experimentais.

Observa-se que os níveis de CO tendem a se elevar em cargas maiores, devido à menor relação ar-combustível e, portanto, menor disponibilidade de oxigênio (XUE; GRIFT; HANSEN, 2011).

Figura 5.12 Emissões de CO



Fonte: O autor

O uso do B100 elevou as emissões de CO em relação ao D100 em cerca de 17%, em média. Esse aumento foi atribuído à maior proporção de combustível injetada e à maior viscosidade do biodiesel.

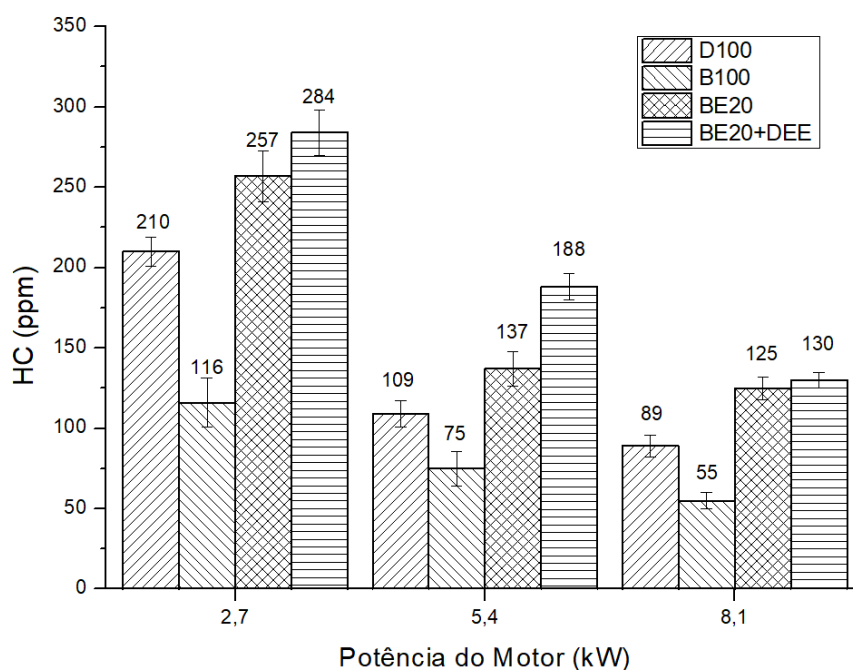
O uso do BE20 elevou as emissões de CO em relação ao B100 e ao D100 em todas as condições de cargas. Esses resultados foram atribuídos à redução da temperatura média da combustão em função da entalpia de vaporização do etanol. Resultados semelhantes foram observados em Çelik *et al.* (2017).

A mistura BE20+DEE mostrou diminuição dos níveis de emissões em relação à mistura BE20, nas cargas de 5.4 kW e 8.1 kW. Os resultados foram atribuídos ao aumento do NC, devido ao DEE, que diminui o ID e melhora a eficiência da combustão, reduzindo as emissões de CO. Na carga mais baixa, no entanto, um leve aumento das emissões foi observado. Como nestas condições as temperaturas da câmara e dos gases residuais são menores, o efeito de resfriamento ocasionado pela elevada entalpia de vaporização influenciou na conversão dos gases.

5.2.4 Emissões de HC

Os resultados de emissões de hidrocarbonetos estão apresentados na Figura 5.13.

Figura 5.13 Emissões de hidrocarbonetos



Fonte: O autor

Observa-se a diminuição das emissões com o aumento das cargas devido às maiores temperaturas da combustão, que melhoram o processo da queima e a eficiência da conversão de combustível.

Os resultados do uso do B100 mostraram reduções em emissões de HC em relação ao D100 (31% a 45%). Os principais fatores que explicam essa diminuição são o conteúdo de oxigênio e o maior NC do B100. O maior conteúdo de oxigênio conduz a combustões mais completas, com temperaturas mais elevadas e diminuição de hidrocarbonetos não queimados. O maior NC diminui o ID e melhora a eficiência do processo de combustão. Além disso, a injeção do biodiesel é antecipada devido à menor compressibilidade, disponibilizando mais tempo para o processo de formação da mistura e da queima, fatores que também contribuem para a redução de hidrocarbonetos.

O uso da mistura BE20 elevou as emissões de HC em relação ao D100 e ao B100. Embora a elevação do conteúdo de oxigênio pelo etanol na mistura seja um fator positivo à combustão, outras propriedades são influenciadas, tais como NC, PCI e entalpia de vaporização. A maior entalpia de vaporização contribui para o aumento de HC, uma vez que prolonga o ID e reduz a temperatura e o tempo disponível da combustão. O menor PCI da mistura conduz à necessidade de maior quantidade de combustível injetada para alcançar a mesma condição de carga, sendo esse um fator que também explica o aumento dessas emissões.

A mistura BE20 + DEE mostrou os níveis mais elevados das emissões de HC. Os resultados foram atribuídos ao resfriamento da mistura e da combustão devido ao efeito combinado do etanol e do DEE. A maior entalpia de vaporização, devido ao etanol, e a alta volatilidade do DEE, são fatores responsáveis por combustões em baixas temperaturas, liberando maior quantidade de HC.

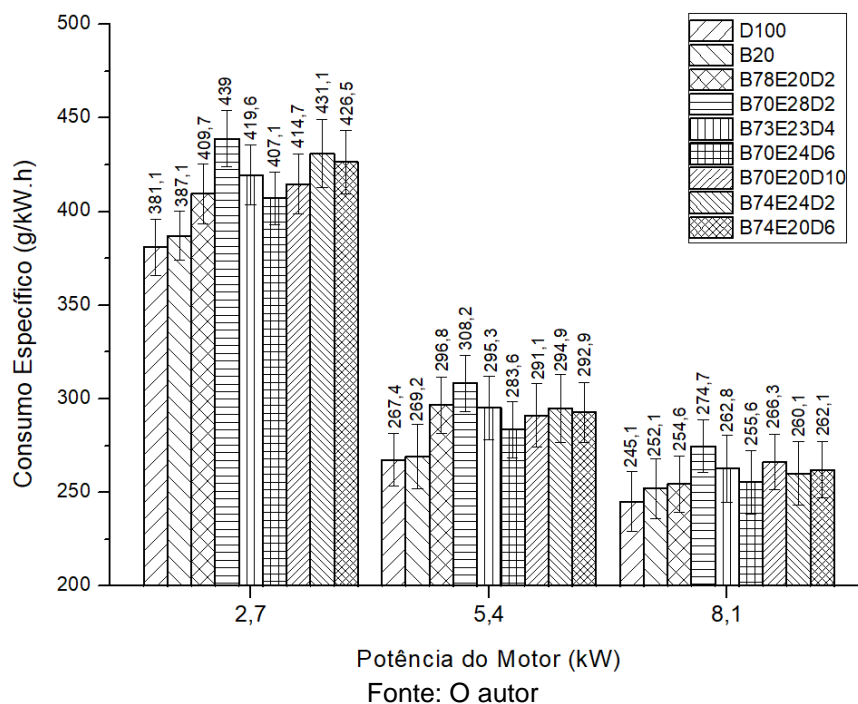
5.3 Resultados da avaliação das Interações de Etanol e DEE em Misturas Diesel-Biodiesel por Meio de Análise Multivariada e Superfície de Resposta

5.3.1 Resultados de desempenho

5.3.1.1 Consumo específico de combustível (BSFC)

Os resultados de BSFC obtidos com os combustíveis dos ensaios⁸ estão apresentados na Figura 5.14.

Figura 5.14 Consumo específico.



⁸ Nomenclatura dos combustíveis dos ensaios:

D100 (diesel puro); B20 (20% de biodiesel + 80% de diesel); B78E20D2 (78% de B20 + 20% de etanol + 2% de DEE); B70E28D2 (70% de B20 + 28% de etanol + 2% de DEE); B73E23D4 (73% de B20 + 23% de etanol + 4% de DEE); B70E24D6 (70% de B20 + 24% de etanol + 6% de DEE); B70E20D10 (70% de B20 + 20% de etanol + 10% de DEE); B74E24D2 (74% de B20 + 24% de etanol + 2% de DEE); B74E20D6 (74% de B20 + 20% de etanol + 6% de DEE).

Observa-se a diminuição do BSFC em cargas mais elevadas devido à maior eficiência mecânica nessas condições. Esse comportamento foi previamente discutido nas seções 5.1.1.2 e 5.2.1.1.

Na Figura 5.14 pode-se observar que os combustíveis que tiveram os menores valores de BSFC foram o D100 e, em seguida, o B20. Isso pode ser explicado pelos valores mais elevados de PCI (Tabela 4.10).

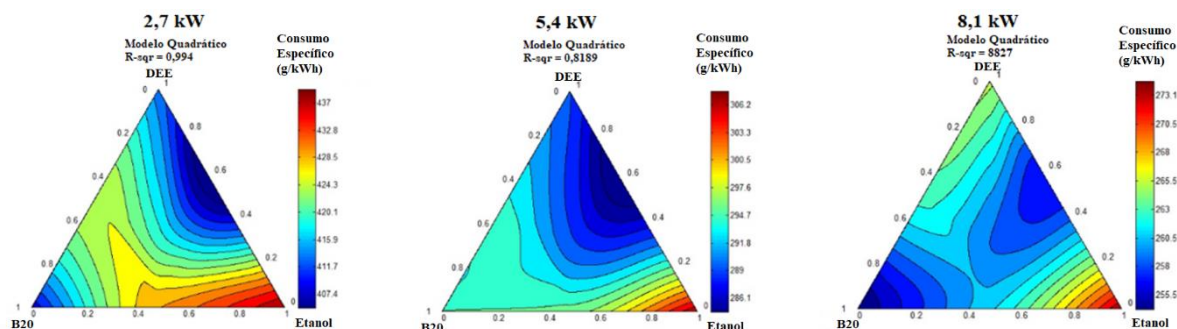
Considerando as misturas ternárias do planejamento experimental (B20-etanol-DEE), observou-se que a mistura com o menor PCI, B70E28D2, foi a que, coerentemente, apresentou os maiores valores de BSFC, nas três condições de ensaios.

As demais misturas possuíam valores de PCI mais aproximados entre si (Tabela 4.10). As pequenas variações nos resultados de BSFC foram atribuídas a fatores diversos, como em relação a propriedades que influenciam na qualidade da queima. Pode-se perceber que o DEE influenciava de forma positiva, diminuindo o BSFC. Como exemplos, nas combinações com percentual de etanol em 24%, B70E24DEE6 e B74E24DEE2, observou-se menor BSFC na mistura com maior fração volumétrica de DEE. Essa tendência foi observada nas três condições de carga. Os resultados podem ser atribuídos à melhor qualidade da queima com a elevação do percentual de DEE, devido à elevação do NC das composições. Os PCI das misturas consideradas estavam com valores próximos, 38,23 MJ e 38,41 MJ, respectivamente.

Considerando as misturas com teor de DEE constante em 2%, B74E24D2, B78E20D2 e B70E28D2, observou-se a tendência de elevação do BSFC com o aumento do teor de etanol. Esses resultados são devido à diminuição dos valores de PCI e NC, com a elevação do percentual de etanol. Uma vez que a fração utilizada de DEE é constante, a elevação das frações de etanol implica em diminuição das frações de B20. Esses efeitos das variações dos componentes nas misturas podem ser melhor elucidados por meio dos resultados das superfícies de resposta do planejamento experimental.

As superfícies de resposta, que mostram as interações das misturas nas três condições de carga, são apresentadas na Figura 5.15.

Figura 5.15 Superfícies de resposta em relação ao BSFC



Fonte: O autor

As regiões azuladas correspondem aos menores valores de BSFC. Considerando as interseções das três condições de carga, as composições de misturas com menor BSFC correspondem a etanol em faixas entre 21% e 24%, DEE entre 3% e 8% e B20 abaixo de 73% (lembrando que os limites inferiores são 20%, 2% e 70%, para o etanol, DEE e B20, respectivamente). Esses resultados podem ser atribuídos à melhoria da queima com o aumento das frações de DEE, uma vez que o DEE possui um NC elevado.

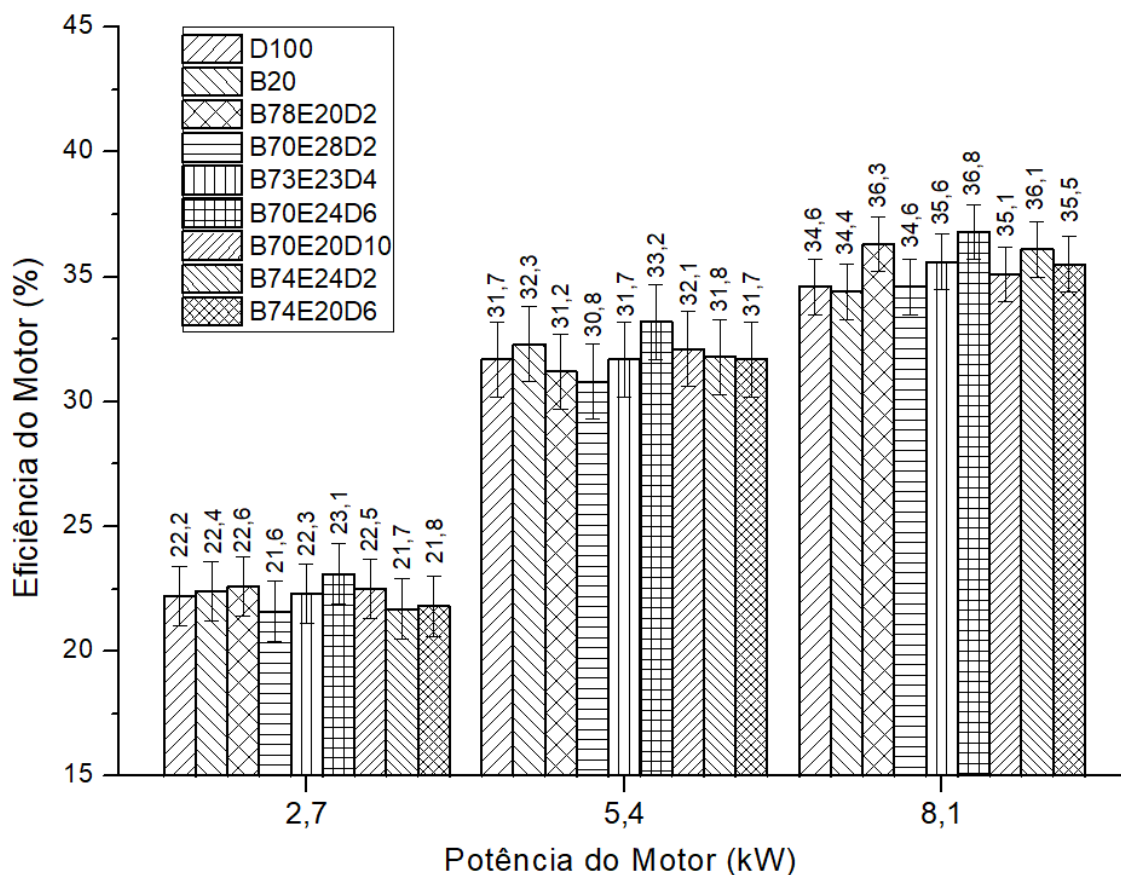
Nas cargas de 2,7 kW e 8,1 kW, observa-se também a abrangência de menor BSFC na região do vértice do B20. Essa região corresponde a misturas com o B20 em seu limite máximo e etanol e DEE em seus limites mínimos. A explicação para essa região se deve ao menor efeito de resfriamento das misturas em que o etanol e o DEE estão em seus limites mínimos, uma vez que a entalpia de vaporização pode diminuir a qualidade da queima do combustível.

As regiões de maior BSFC, coloração avermelhada, aparecem nas áreas próximas ao vértice do etanol, que correspondem às misturas em que o DEE está em seus limites mínimos (2%) e o etanol em seus valores mais elevados (28%). Isso é explicado pelos menores valores de PCI e NC devido ao etanol.

5.3.1.2 Eficiência do motor

A Figura 5.16 apresenta os gráficos com os resultados de eficiência do motor obtidos nos ensaios.

Figura 5.16 Eficiência do motor.

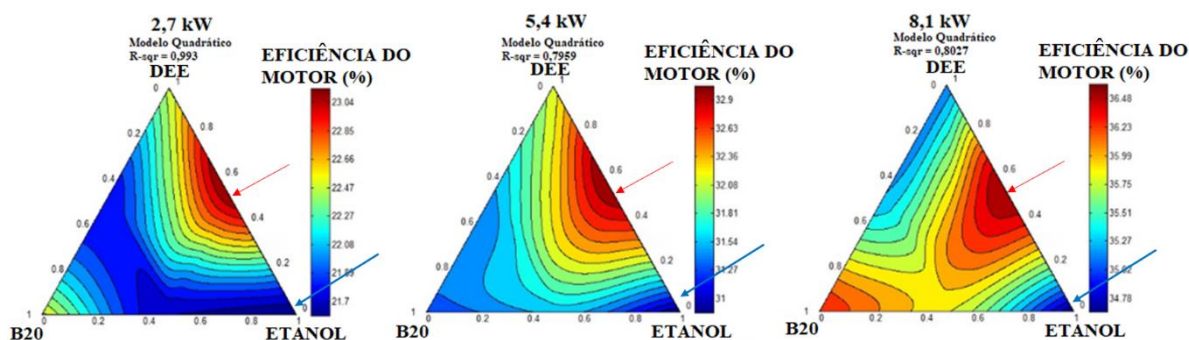


Fonte: O autor

Observa-se na figura 5.16 que a mistura B70E24D6 apresenta a eficiência do motor mais elevada em relação aos demais combustíveis, nas três condições de carga.

Os resultados de eficiência do motor podem ser melhor avaliados por meio das superfícies de resposta geradas no estudo estatístico de análise multivariada. A figura 5.17, apresenta as superfícies de resposta em relação à eficiência do motor.

Figura 5.17 Superfícies de resposta referentes à eficiência do motor



Fonte: O autor

Na figura 5.17, observa-se que nas três condições de carga do motor as regiões de maior eficiência aparecem em localizações semelhantes, próximas da aresta do triângulo entre o DEE e o etanol (destacadas pelas setas vermelhas). Essas regiões corresponderiam a frações volumétricas de B20 entre 70% a 70,8%, etanol entre 22,6% e 24,3% e DEE entre 4,2% e 6,8%. A figura 5,18 (a, b e c) exemplifica a forma de obtenção desses resultados.

Por meio das superfícies de resposta, pode-se verificar uma interação sinérgica entre o etanol e o DEE nas frações consideradas. Uma das misturas dos ensaios que estaria nessa região é a B70E24D6⁹, que no gráfico da figura 5.16, se destacou em relação aos demais combustíveis, em relação à eficiência do motor. Esse resultado pode ser atribuído ao teor de oxigênio elevado da mistura devido ao etanol e DEE (tabela 4.10). Além disso, como o DEE possui NC elevado, infere-se que houve a melhoria dessa propriedade na mistura.

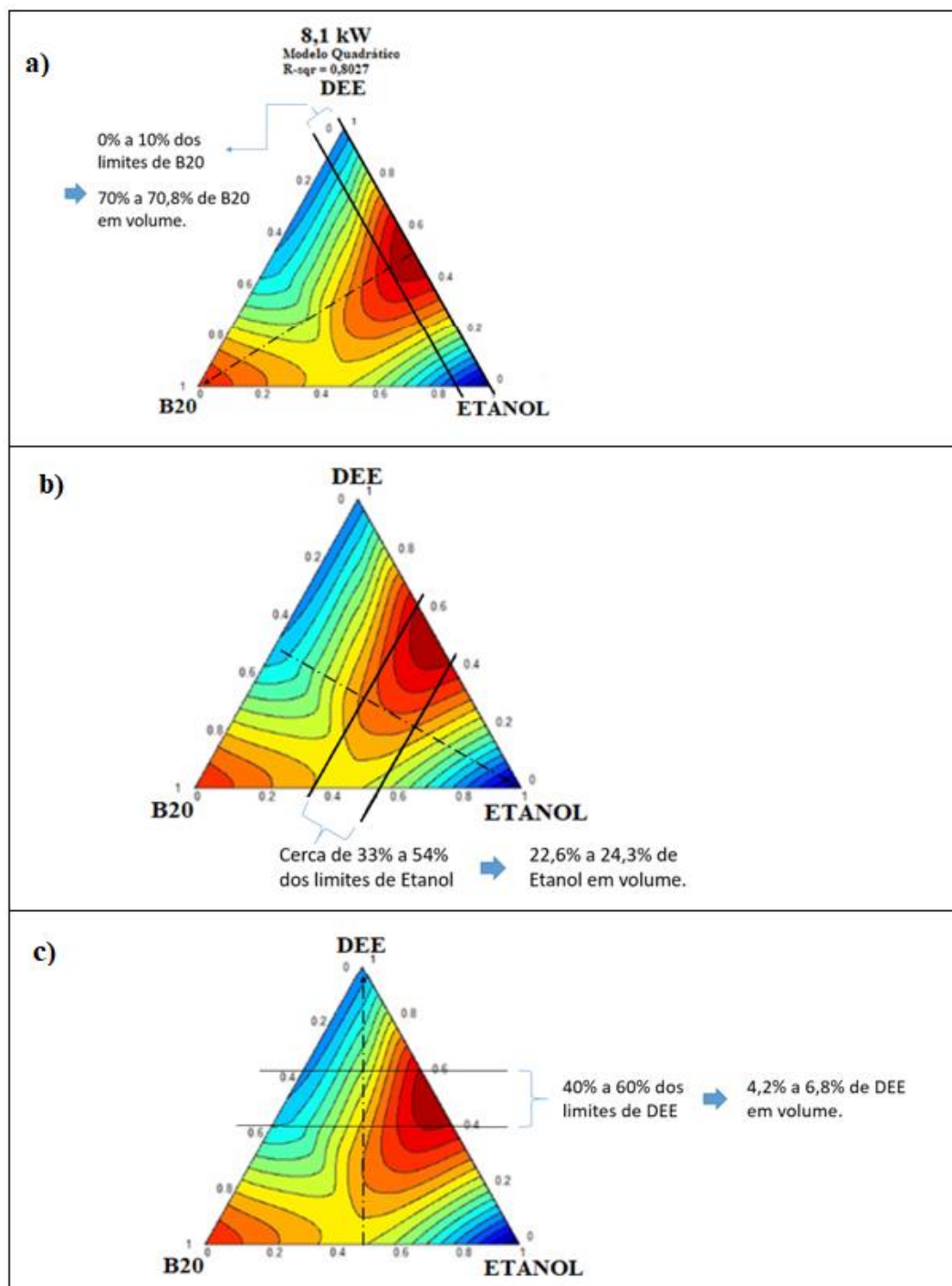
As regiões de menor eficiência do motor, por sua vez, localizavam-se próximas ao vértice do etanol, destacadas em azul na superfície de resposta. Exemplo de mistura dentro dessa região é a B70E28D2¹⁰; ou seja, as frações de etanol no limite máximo do estudo, 28%, enquanto B20 e DEE em seus limites mínimos, 70% e 2%,

⁹ (70% de B20 + 24% de Etanol + 6% de DEE)

¹⁰ (70% de B20 + 28% de Etanol + 2% de DEE)

respectivamente. A explicação da menor eficiência do motor é em função da redução do NC e do PCI devido à maior proporção de etanol na mistura.

Figura 5.18 Identificação das frações dos componentes de mistura em relação à eficiência do motor; a) B20; b) Etanol; c) DEE.



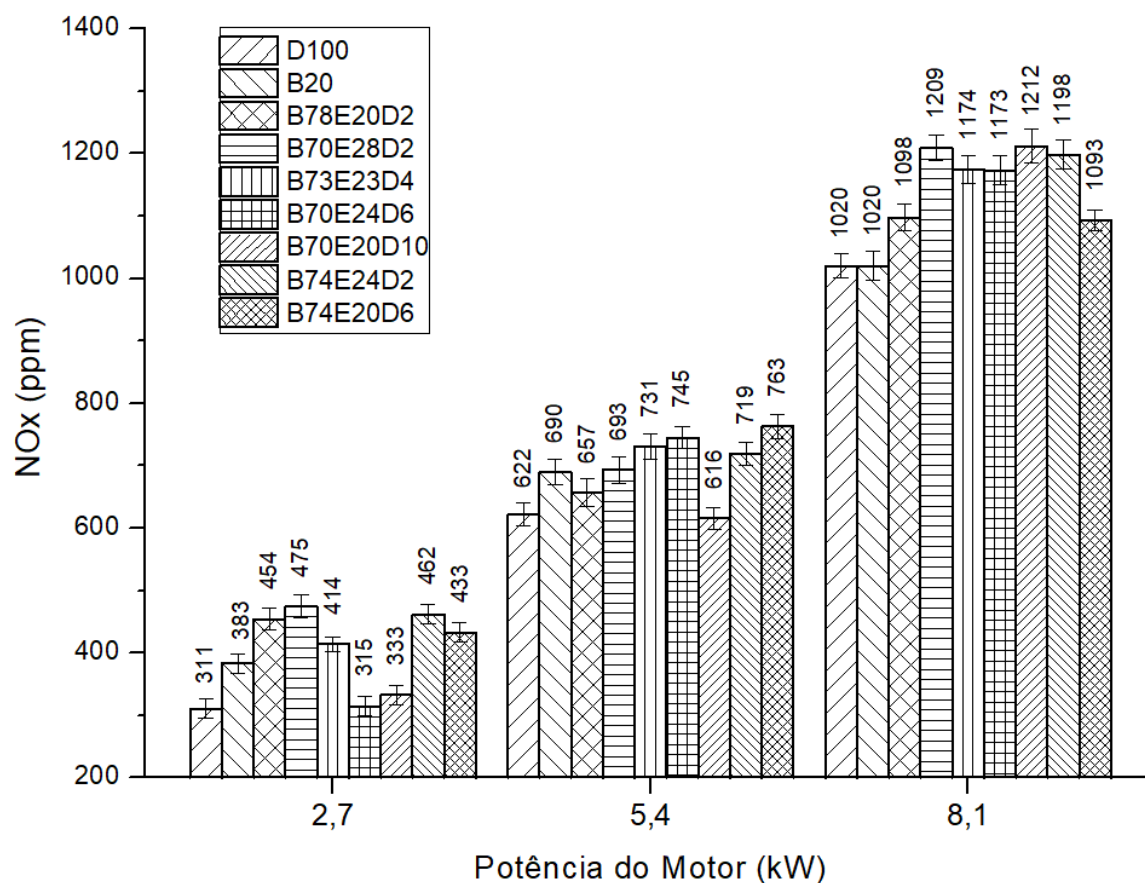
Fonte: O autor

5.3.2 Resultados de emissões

5.3.2.1 Emissões de NOx

A Figura 5.19 mostra os resultados das emissões de NOx obtidos nos ensaios. Observam-se maiores níveis de emissões em cargas mais elevadas, devido às maiores temperaturas da combustão nessas condições, levando ao aumento da formação de NOx pelo mecanismo térmico.

Figura 5.19 Emissões de NOx



Fonte: O autor

O uso do D100, mostrou os menores níveis de emissões de NOx, nas três condições de cargas. Uma das explicações é que as misturas ternárias continham elevado percentual de etanol, entre 20% e 28%. Embora a combinação com DEE tenha mitigado os níveis de emissões em algumas composições, as misturas com frações elevadas de etanol diminuíam bastante o NC e elevavam a entalpia de

vaporização, causando o aumento do ID e a tendência de elevação das emissões de NOx.

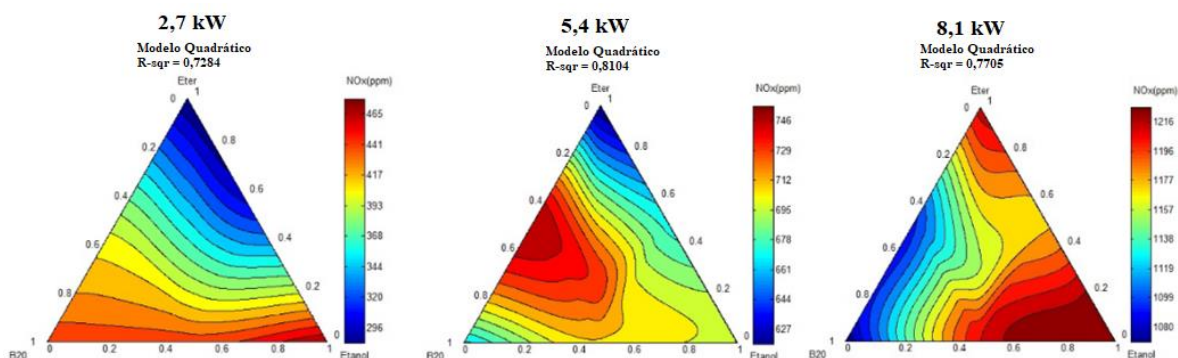
O uso da mistura B20 elevou as emissões nas cargas de 2,7 kW e 5,4 kW em relação ao D100; na carga de 8,1 kW, as emissões foram similares. Esses resultados são atribuídos a fatores como maior quantidade de combustível injetada (devido ao menor PCI), menor ID e presença de oxigênio no biodiesel. Esses resultados estão em consonância com os resultados apresentados e discutidos na seção 5.1.2.1.

No caso das misturas ternárias, as emissões de NOx foram maiores nas composições com o etanol em valores próximos a seu limite superior. Como exemplo, a composição B70E28D2.

Uma das formas de avaliação dos resultados é por meio de comparação de misturas com proporções fixas de certos componentes. Por exemplo, mantendo a proporção de etanol fixada no limite inferior estabelecido dos experimentos, 20%, e variando as proporções de B20 e DEE, observou-se a redução das emissões de NOx com o uso de DEE em seu limite superior, 10%, correspondente à mistura B70E20DEE10, em relação às composições B78E20D2 e B74E20D6.

Embora tenha havido uma percepção de diminuição das emissões de NOx com o aumento do DEE e com menores frações de etanol, os resultados não se confirmaram em todas as condições de cargas. Dessa forma, a proposta do estudo de análise multivariada foi uma forma interessante de avaliação das interações de combustíveis nas diferentes cargas. A Figura 5.20 apresenta as superfícies de respostas em relação às emissões de NOx .

Figura 5.20 Superfície de resposta em relação às emissões de NOx



Fonte: O autor

Observa-se que na carga de 2,7 kW, a região do espaço simplex de menores emissões de NOx estão localizadas em regiões próximas ao vértice superior do espaço simplex. Essas regiões correspondem a misturas com frações de DEE acima de 5%, etanol abaixo de 25% e B20 abaixo de 73%. A região azulada corresponde ao atendimento simultâneo dessas três condições especificadas. Exemplo de mistura que foi utilizada nos ensaios e que se encontra nessa região é a composição B70E24DEE6.

Ainda nessa condição de carga, as regiões avermelhadas correspondem às maiores emissões de NOx, compreendendo a região de base do triângulo, abrangendo as regiões entre os vértices do B20 e do etanol. Essa região corresponde a misturas em que a concentração de DEE é baixa, entre o limite inferior e até cerca de 4%. Logo, na condição de carga de 2,7 kW, pode-se concluir que a adição de DEE, acima de 5%, foi um fator de maior influência para diminuição das emissões de NOx.

Na carga de 5,4 kW, a região do espaço simplex de menores emissões de NOx também ocorreu mais próxima do vértice do DEE. No entanto, essa região ficou mais estreita, indicando que o B20, a partir de cerca de 71%, já elevava as emissões de NOx.

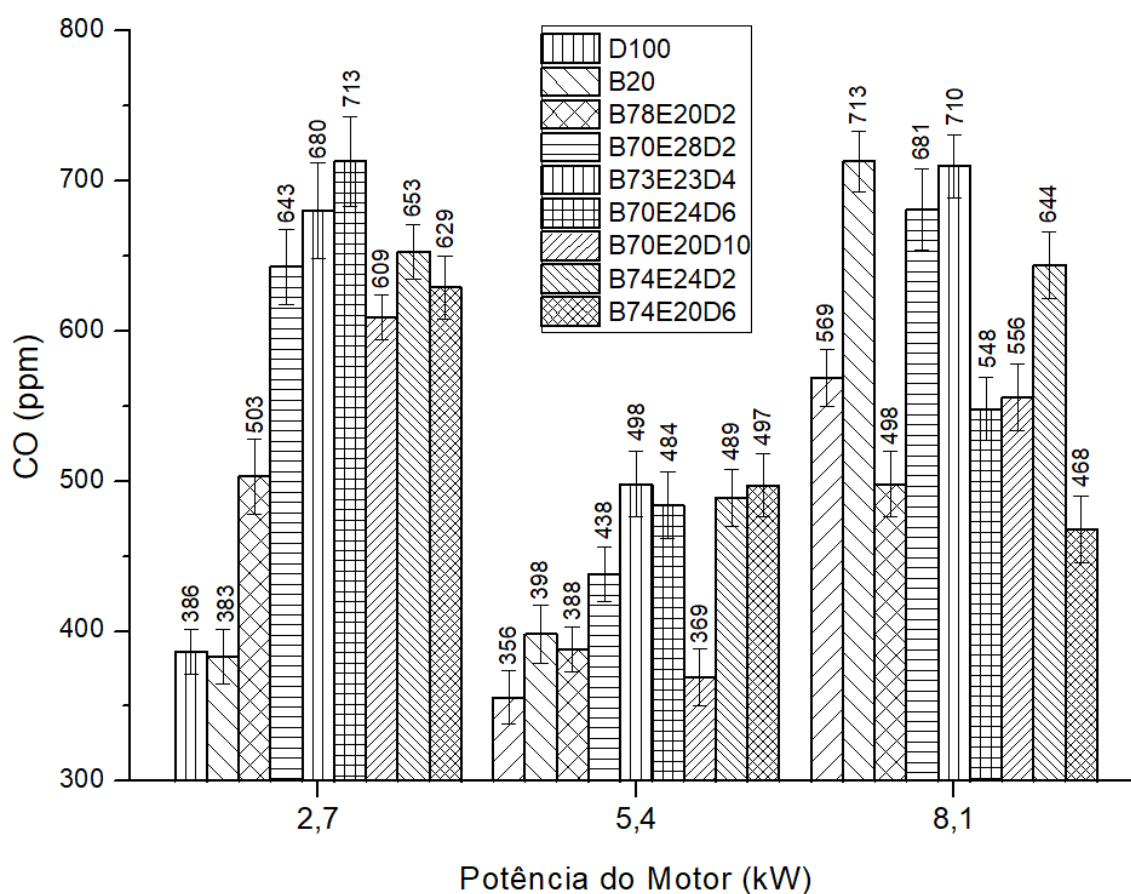
Na carga de 8,1 kW, observa-se que as menores emissões de NOx ocorreram em proporções de DEE entre 2% e 7%; etanol entre 20% e 22%; e B20 entre 72% e 78%.

As alterações no comportamento das superfícies com a variação na carga do motor acontecem devido às diferenças de temperaturas nas paredes da câmara, gases residuais e temperatura da combustão.

5.3.2.2 Emissões de CO

A Figura 5.21 apresenta os resultados dos ensaios em relação às emissões de CO.

Figura 5.21 Emissões de CO

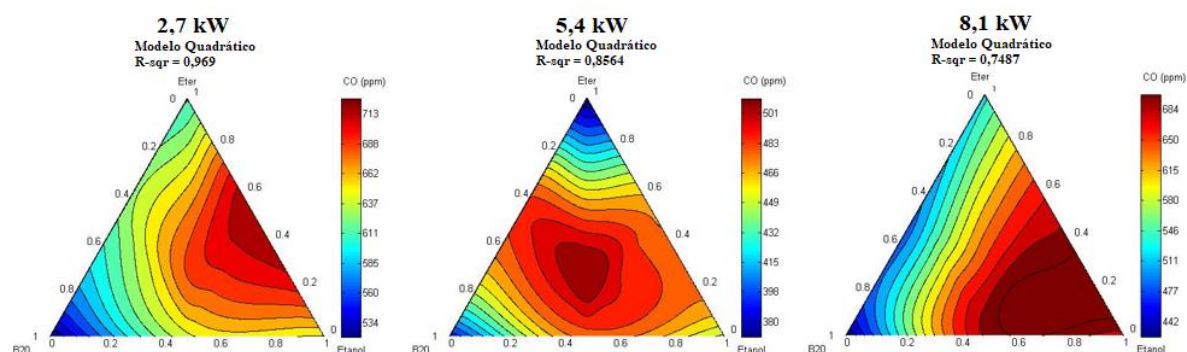


Fonte: O autor

Observa-se maior discrepância entre as misturas ternárias em relação ao diesel e ao B20 na carga mais baixa, devido às menores temperaturas na câmara e da combustão que diminuem o processo de oxidação. Nas composições ternárias (B20-etanol-DEE) os efeitos são mais perceptíveis devido ao menor NC e à maior entalpia de vaporização das misturas, que diminuem a qualidade da queima em cargas mais baixas.

A Figura 5.22 apresenta as superfícies de resposta em relação às emissões de CO.

Figura 5.22 Superfície de resposta em relação às emissões de CO



Fonte: O autor

Considerando a interseção das regiões, ou seja, condição que mostra a mesma tendência nas três condições de carga, as regiões do vértice do B20 correspondem às menores emissões de CO. Essas regiões correspondem às faixas de misturas em que o etanol e o DEE estão em seus limites inferiores e o B20 em seu limite superior. Logo, infere-se que essas misturas estão com, relativamente, baixa entalpia de vaporização e alto poder calorífico, que melhoram a qualidade do processo de queima e a oxidação dos gases, reduzindo essas emissões.

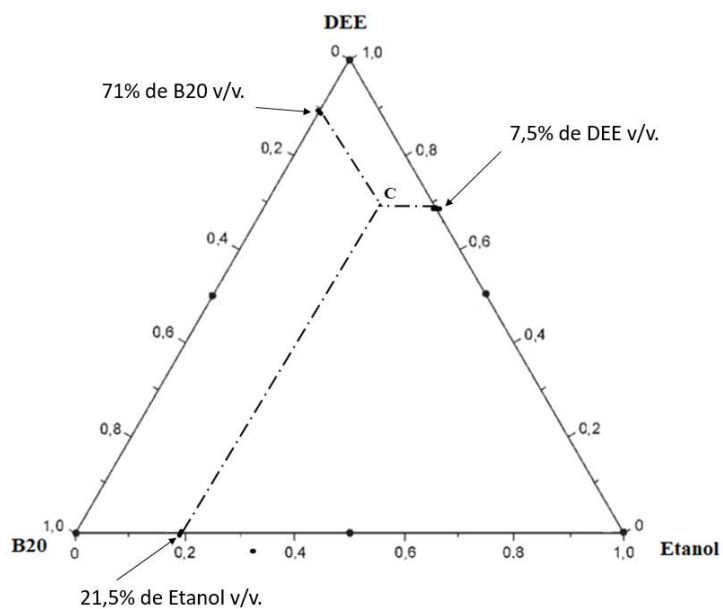
5.3.3 Compromisso em emissões de NOx e eficiência do motor

Neste trabalho os principais parâmetros observados para as análises comparativas foram as emissões de NOx e a eficiência do motor.

Em relação às superfícies de resposta das Figuras 5.17 e 5.20, eficiência do motor e emissões de NOx, respectivamente, foi possível considerar uma região que melhor atendesse aos resultados otimizados nas três condições de carga dos ensaios. Uma mistura resultante nessa região seria composta de 71% de B20, 21,5% de etanol e

7,5% de DEE em volumes e seria denominada como B71E21,5D7,5. A Figura 5.23 ilustra um ponto C, que corresponde a essa composição de mistura.

Figura 5.23 Composição de mistura otimizada



Fonte: O autor

6 CONCLUSÕES

Biocombustíveis podem ser utilizados estrategicamente em motores diesel em misturas ou como substitutos ao diesel fóssil, com as vantagens de diversificação da matriz energética e mitigação de emissões de carbono ao meio ambiente. O etanol é um dos biocombustíveis muito utilizado em pesquisas em motores diesel, porém, ainda existe uma longa distância para a homologação para uso comercial. As restrições aparecem principalmente por questões técnicas, como o baixo número de cetano (NC) e poder calorífico inferior (PCI) em relação ao diesel fóssil.

O uso de aditivos modificadores do NC é uma das formas de se viabilizar o uso do etanol, principalmente em frações elevadas. O dietil éter (DEE) foi identificado na literatura como um biocombustível utilizado em pesquisas em motores diesel com o principal atrativo de possuir um NC bastante elevado (>120). Algumas restrições aparecem em relação à alta volatilidade (pressão de vapor), característica que exige cuidados especiais em relação ao transporte e armazenamento do produto, entre outras.

Por meio da revisão da literatura pôde-se observar que as pesquisas ainda não são conclusivas em relação às proporções de DEE para os melhores resultados em termos de redução de poluentes e eficiência do motor. Em relação às interações do DEE com outros combustíveis, foi identificado que as emissões de NO_x reduziram de forma mais expressiva com o uso de misturas que continham o etanol e o DEE simultaneamente, resultados explicados pela combinação de propriedades como teor de oxigênio elevado (em ambos), alta entalpia de vaporização (etanol) e NC elevado (DEE).

Nesse contexto, três diferentes planejamentos experimentais foram realizados neste trabalho com o intuito de responder a esses e outros questionamentos em relação ao uso do DEE em misturas com o etanol, biodiesel e o diesel.

No planejamento experimental de misturas por análise multivariada, foram avaliadas as interações entre o etanol, DEE e a mistura B20 (20% de biodiesel + 80% de diesel). Com o estabelecimento de limites mínimos previamente estabelecidos para os três componentes: 20% para o etanol, 2% para o DEE e 70% para o B20, o estudo

definiu sete combinações de misturas para ensaios. Com os resultados experimentais obtidos, os dados foram tratados e compilados utilizando o software Statistica®, no qual foram geradas as superfícies de resposta que mostraram os efeitos das interações entre os componentes e as regiões otimizadas para cada parâmetro e em cada condição de carga do motor.

Foi possível verificar que o aumento das frações de etanol mostrava a tendência de aumento das emissões de NOx e a redução da eficiência do motor. O aumento na proporção de DEE, por sua vez, mostrava a tendência de redução das emissões de NOx. No entanto, para cada condição de carga, as superfícies mostraram variações da região otimizada para cada parâmetro.

Considerando o padrão de referência de eficiência do motor, foi possível identificar a melhoria desse parâmetro com o aumento simultâneo das proporções de etanol e DEE, com a otimização na região dos limites intermediários desses componentes. Uma mistura nessa região foi a B70E6D24 (70% de B20, 6% de etanol e 24% de DEE); essa foi utilizada nos ensaios experimentais e esteve dentro das regiões de maior eficiência do motor nas três condições de carga.

O estudo destacou uma proporção de mistura que atendeu simultaneamente as regiões das superfícies de resposta de alta eficiência do motor e baixa emissão de NOx. Essa mistura foi composta de 71% de B20, 21,5% de etanol e 7,5% de DEE em volumes; essa mistura foi denominada como B71E21,5D7,5 e proporcionaria resultados otimizados, considerando as três condições de carga dos ensaios.

Os outros dois aparatos experimentais serviram para o embasamento e melhor avaliação dos resultados. No primeiro aparato, o DEE foi adicionado em 5% de volume a uma mistura contendo diesel (72% v/v), biodiesel (18% v/v) e etanol (10% v/v), denominada B20E. Os resultados da adição de DEE, mistura B20E+DEE, mostraram o aumento da eficiência do motor (1% a 3,7%) e a redução das emissões de NOx (9,6% a 11%), nas cargas intermediária (16 kW) e elevada (24kW) dos ensaios. As emissões de MP, diminuíram significativamente com o uso do DEE, tanto em relação à mistura B20E (45% a 64%) como em relação ao diesel puro (D100) e ao B20.

No segundo aparato experimental, o DEE foi adicionado em fração volumétrica de 5% em uma mistura de biodiesel (80%) com o etanol (20%), denominada BE20. Os resultados mostraram a redução das emissões de NOx (3% a 13%) e aumento da eficiência do motor (0,5% a 2%) em todas as condições de carga.

Os efeitos do uso do etanol e do biodiesel puderam também ser avaliados nos aparatos 1 e 2, embora menor foco foi dado a esses estudos.

O etanol, quando utilizado em fração volumétrica de 10% ao B20 (aparato 1), mostrou redução das emissões de NOx (5,3% a 13%) e MP (20% a 48%). Já no aparato 2, em que o etanol foi utilizado em 20% v/v ao biodiesel puro (B100), as emissões de NOx aumentaram em relação ao B100 (2,4% a 19%). As diferenças nos resultados foram atribuídas às frações de etanol utilizadas; em concentrações elevadas, a redução expressiva do NC ocasiona o aumento do tempo de início da ignição (ID); além disso, existe a maior disponibilização de oxigênio pelo combustível para a reação com o nitrogênio do ar.

O biodiesel foi utilizado como referência nos ensaios e serviu como um agente tensoativo para melhoria da miscibilidade das misturas do etanol com o diesel. Os resultados mostraram uma pequena redução na eficiência do motor com o B100 e o B20, em relação ao D100, atribuída principalmente à maior viscosidade. As emissões de NOx elevaram discretamente em relação ao diesel; resultados previstos com base na literatura.

Os resultados encontrados estavam em consonância com os obtidos no estudo de análise multivariada (aparato 3), reforçando os argumentos anteriormente mencionados; e vice-versa.

É importante a consideração de que os motores utilizados mantiveram as características originais do projeto, pois modificações nos ângulos de injeção de combustível poderiam alterar o perfil dos resultados obtidos.

Nos três aparatos experimentais foi possível comprovar que as condições de carga do motor influenciaram nos resultados. As misturas com etanol e DEE apresentaram maior eficiência do motor e menor emissão de NOx nas cargas

moderadas e elevadas; na carga baixa, essa tendência chegou a inverter. Esses resultados são explicados em função das maiores temperaturas do sistema em cargas mais elevadas, como nas paredes da câmara de combustão e temperatura da chama, em resposta ao efeito de resfriamento causado pela alta entalpia de vaporização das misturas com etanol e etanol-DEE.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Instrumentação da pressão da câmara de combustão para avaliação do comportamento da combustão

Controle de pressão, avanço e número de injeções do jato de combustível para melhoria dos parâmetros de desempenho e emissões.

Análise de custos de propostas de misturas de combustíveis discutidas neste trabalho.

Análise do ciclo de vida de carbono para avaliação dos impactos em emissões de CO₂ ao meio ambiente.

Referências

- ABED, K. A., GAD, M. S., EL MORSI, A. K., SAYED, M. M., & ELYAZEED, S. A. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 28, n. 2, p. 183–188, 2019.
- AJAV, E. A.; SINGH, B.; BHATTACHARYA, T. K. Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, n. 4, p. 357–365, 1999.
- AL-ESAWI, N.; QUBEISSI, M. AL; KOLODNYTSKA, R. The impact of biodiesel fuel on ethanol/diesel blends. **Energies**, v. 12, n. 9, p. 1–11, 2019.
- BARIK, D.; MURUGAN, S. Effects of diethyl ether (DEE) injection on combustion performance and emission characteristics of Karanja methyl ester (KME)-biogas fueled dual fuel diesel engine. **Fuel**, v. 164, p. 286–296, 2016.
- BEDNARSKI, M. et al. Evaluation of methods for determining the combustion ignition delay in a diesel engine powered by liquid biofuel. **Journal of the Energy Institute**, v. 92, n. 4, p. 1107–1114, 2019.
- BEZAIRE, N., WADUMESTHRIGE, K., NG, K. S., & SALLEY, S. O. Limitations of the use of cetane index for alternative compression ignition engine fuels. **Fuel**, v. 89, n. 12, p. 3807–3813, 2010.
- BILDIRICI, M. E. The effects of militarization on biofuel consumption and CO₂ emission. **Journal of Cleaner Production**, v. 152, p. 420–428, 2017.
- BORETTI, A. Advantages and Disadvantages of Diesel Single and Dual-Fuel Engines. **Frontiers in Mechanical Engineering**, v. 5, n. December, p. 1–15, 2019.
- BRUNETTI, Franco. Motores de Combustão Interna. Vol. 1 e 2. **Editora Blucher**, 2012.
- CARVALHO, M. A., ACHY, A. R., JUNIOR, L. C., FERREIRA, V. P., SILVA, J. A., PEPE, I. M., e TORRES, E. A. Mechanical and emissions performance of a diesel engine fueled with biodiesel, ethanol and diethyl ether blends. **Journal of the**

Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 42, n. 4, p. 1–10, 2020.

ÇELİK, M. et al. Experimental investigation of impact of addition of bioethanol in different biodiesels, on performance, combustion and emission characteristics. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 31, n. 11, p. 5581–5592, 2017.

CHEN, C. et al. Study of the characteristics of PM and the correlation of soot and smoke opacity on the diesel methanol dual fuel engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 148, n. 92, p. 391–403, 2019.

CHEN, H. et al. NO_x emission of biodiesel compared to diesel: Higher or lower? **Applied Thermal Engineering**, v. 137, n. February, p. 584–593, 2018.

CHOTWICHIAN, A.; LUENGNARUEMITCHAI, A.; JAI-IN, S. Utilization of palm oil alkyl esters as an additive in ethanol-diesel and butanol-diesel blends. **Fuel**, v. 88, n. 9, p. 1618–1624, 2009.

COSCIONE, A. R.; DE ANDRADE, J. C.; MAY, G. M. O modelamento estatístico de misturas: Experimento tutorial usando voltametria de redissolução anódica. **Quimica Nova**, v. 28, n. 6, p. 1116–1122, 2005.

DEVARAJAN, Y., BEEMKUMAR, N., GANESAN, S., e ARUNKUMAR, T. An experimental study on the influence of an oxygenated additive in diesel engine fuelled with neat papaya seed biodiesel/diesel blends. **Fuel**, v. 268, n. December 2019, 2020.

DU, E., CAI, L., HUANG, K., TANG, H., XU, X., e TAO, R. Reducing viscosity to promote biodiesel for energy security and improve combustion efficiency. **Fuel**, v. 211, n. July 2017, p. 194–196, 2018.

EU Science Hub. Recast to 2030 (RED II). 2019. <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii>.

FERREIRA, V. P., MARTINS, J., TORRES, E. A., PEPE, I. M., e SOUZA, J. M. R. Performance and emissions analysis of additional ethanol injection on a diesel engine powered with a blend of diesel-biodiesel. **Energy for Sustainable Development**, v.

17, n. 6, p. 649–657, 2013.

GHAREHGHANI, A.; MIRSALEM, M.; HOSSEINI, R. **Effects of waste fish oil biodiesel on diesel engine combustion characteristics and emission** *Renewable Energy*, 2017.

GOMES, G., HACHE, E., MIGNON, V., e PARIS, A. On the current account-biofuels link in emerging and developing countries: do oil price fluctuations matter?. *Energy Policy*, v. 116, p. 60-67, 2018.

GÓMEZ, A., GARCÍA-CONTRERAS, R., SORIANO, J. A., e MATA, C. Comparative study of the opacity tendency of alternative diesel fuels blended with gasoline. *Fuel*, v. 264, 2020.

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. Air pollutants from the burning of fossil fuels and biofuels: A brief review. *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 5, p. 434–445, 2011.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 1988.

IBRAHIM, A. Investigating the effect of using diethyl ether as a fuel additive on diesel engine performance and combustion. *Applied Thermal Engineering*, v. 107, p. 853–862, 2016.

IMTENAN, S., MASJUKI, H. H., VARMAN, M., FATTAH, I. R., SAJJAD, H., e ARBAB, M. I. Effect of n-butanol and diethyl ether as oxygenated additives on combustion-emission-performance characteristics of a multiple cylinder diesel engine fuelled with diesel-jatropha biodiesel blend. *Energy Conversion and Management*, v. 94, p. 84–94, 2015.

JAMROZIK, A. The effect of the alcohol content in the fuel mixture on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with diesel-methanol and diesel-ethanol blends. *Energy Conversion and Management*, v. 148, p. 461–476, 2017.

JAMROZIK, A., TUTAK, W., PYRC, M., GRUCA, M., e KOCISKO, M. Study on co-

combustion of diesel fuel with oxygenated alcohols in a compression ignition dual-fuel engine. **Fuel**, v. 221, p. 329–345, 2018.

KAIMAL, Viswanath K.; VIJAYABALAN, P. An investigation on the effects of using DEE additive in a DI diesel engine fuelled with waste plastic oil. **Fuel**, v. 180, p. 90-96, 2016.

KANNAN, T. K.; MARAPPAN, R. Comparative study of performance and emission characteristics of a diesel engine fueled by emulsified biodiesel/diethyl ether blended biodiesel. **Journal of Applied Sciences**, 2011.

KUMAR, S., CHO, J. H., PARK, J., e MOON, I. Advances in diesel–alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 46-72, 2013.

KUSZEWSKI, H., JAWORSKI, A., USTRZYCKI, A., LEJDA, K., BALAWENDER, K., e WOS, P. Use of the constant volume combustion chamber to examine the properties of autoignition and derived cetane number of mixtures of diesel fuel and ethanol. **Fuel**, v. 200, p. 564–575, 2017.

LAHANE, S.; SUBRAMANIAN, K. A. Impact of nozzle holes configuration on fuel spray, wall impingement and NO_x emission of a diesel engine for biodiesel-diesel blend (B20). **Applied Thermal Engineering**, v. 64, n. 1–2, p. 307–314, 2014.

LAHANE, S.; SUBRAMANIAN, K. A. Effect of different percentages of biodiesel–diesel blends on injection, spray, combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine. **Fuel**, v. 139, p. 537–545, 2015.

LAPUERTA, M., ARMAS, O., BALLESTEROS, R., e FERNÁNDEZ, J. Diesel emissions from biofuels derived from Spanish potential vegetable oils. **Fuel**, v. 84, n. 6, p. 773-780, 2005.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; HERREROS, J. M. Emissions from a diesel-bioethanol blend in an automotive diesel engine. **Fuel**, v. 87, n. 1, p. 25–31, 2008.

LAPUERTA, Magin; ARMAS, Octavio; RODRIGUEZ-FERNANDEZ, Jose. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. **Progress in energy and combustion**

science, v. 34, n. 2, p. 198-223, 2008. .

LEE, J.; LEE, S.; LEE, S. Experimental investigation on the performance and emissions characteristics of ethanol/diesel dual-fuel combustion. **Fuel**, v. 220, p. 72–79, 2018.

LI, P.; SAKURAGI, K.; MAKINO, H. Extraction techniques in sustainable biofuel production: A concise review. **Fuel Processing Technology**, v. 193, p. 295–303, 2019.

LION, S.; VLASKOS, I.; TACCANI, R. A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery. **Energy Conversion and Management**, 2020.

MAHLIA, T. M. I. et al. Patent landscape review on biodiesel production: Technology updates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 118, n. April 2019, 2020.

MARTINS, Jorge. Motores de Combustão Interna. 2006.

MIKULSKI, M.; DUDA, K.; WIERZBICKI, S. Performance and emissions of a CRDI diesel engine fuelled with swine lard methyl esters-diesel mixture. **Fuel**, v. 164, n. x, p. 206–219, 2016.

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

MME. Relatório de consolidação dos testes e ensaios para validação da utilização de Biodiesel B15 em motores e veículos. 2019.

MOLLENHAUER, Klaus; TSCHOKE, Helmut (Ed.). **Handbook of diesel engines**. Berlin, Springer, 2010.

NANTHAGOPAL, K. et al. Investigation on diethyl ether as an additive with Calophyllum Inophyllum biodiesel for CI engine application. **Energy Conversion and Management**, v. 179, p. 104–113, 2019.

NIETO GARZÓN, N. A.; OLIVEIRA, A. A. M.; BAZZO, E. An ignition delay correlation for compression ignition engines fueled with straight soybean oil and diesel oil blends. **Fuel**, v. 257, n. April, 2019.

NOUR, M. et al. Effect of ethanol/water blends addition on diesel fuel combustion in RCM and DI diesel engine. **Energy Conversion and Management**, v. 149, p. 228–243, 2017.

NOVAES, C. G., YAMAKI, R. T., DE PAULA, V. F., JÚNIOR, B. B. N., BARRETO, J. A., VALASQUES, G. S., e ALMEIDA BEZERRA, M. Otimização de Métodos Analíticos Usando Metodologia de Superfícies de Respostas - Parte II: Variáveis de Mistura. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 2, p. 393–420, 2018.

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

PALASH, S. M., MASJUKI, H. H., KALAM, M. A., MASUM, B. M., SANJID, A., e ABEDIN, M. J. State of the art of NO_x mitigation technologies and their effect on the performance and emission characteristics of biodiesel-fueled Compression Ignition engines. **Energy conversion and management**, v. 76, p. 400-420, 2013.

PARK, S. H.; YOUN, I. M.; LEE, C. S. Influence of ethanol blends on the combustion performance and exhaust emission characteristics of a four-cylinder diesel engine at various engine loads and injection timings. **Fuel**, v. 90, n. 2, p. 748–755, 2011.

PAUL, A. et al. Study of performance and emission characteristics of a single cylinder CI engine using diethyl ether and ethanol blends. **Journal of the Energy Institute**, v. 88, n. 1, p. 1–10, 2015.

PAUL, S.; SARKAR, B. An exploratory analysis of biofuel under the utopian environment. **Fuel**, v. 262, 2020.

PINTO, A. C., GUARIEIRO, L. L., REZENDE, M. J., RIBEIRO, N. M., TORRES, E. A., Lopes, W. A., e Andrade, J. B. D. Biodiesel: an overview. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 16, p. 1313-1330, 2005.

OLIVEIRA, A., MORAIS, A. M., VALENTE, O. S., e SODRÉ, J. R. Combustion characteristics, performance and emissions from a diesel power generator fuelled by B7-ethanol blends. **Fuel Processing Technology**, v. 139, n. X, p. 67–72, 2015.

OLIVEIRA, A., MORAIS, A. M., VALENTE, O. S., SODRÉ, J. R. Combustion, performance and emissions of a diesel power generator with direct injection of B7 and port injection of ethanol. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 39, n. 4, p. 1087–1096, 2017.

OLIVEIRA, F. C.; COELHO, S. T. History, evolution, and environmental impact of biodiesel in Brazil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. October 2016, p. 168–179, 2017.

OLIVEIRA, I. P., CAIRES, A. R. L., BASKAR, K., PONNUSAMY, S., LAKSHMANAN, P., e VEERAPPAN, V. Biodiesel as an additive for diesel-ethanol (diesohol) blend: physical-chemical parameters and origin of the fuels miscibility. **Fuel**, v. 263, p. 116753, 2020.

QI, D. H., CHEN, H., GENG, L. M., e BIAN, Y. Z. Effect of diethyl ether and ethanol additives on the combustion and emission characteristics of biodiesel-diesel blended fuel engine. **Renewable energy**, v. 36, n. 4, p. 1252-1258, 2011.

RAKOPOULOS, C. D.; ANTONOPOULOS, K. A.; RAKOPOULOS, D. C. Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol-diesel fuel blends. **Energy**, v. 32, n. 10, p. 1791–1808, 2007.

RAKOPOULOS, D. C. et al. Characteristics of performance and emissions in high-speed direct injection diesel engine fueled with diethyl ether/diesel fuel blends. **Energy**, v. 43, n. 1, p. 214–224, 2012.

RAKOPOULOS, D. C.; RAKOPOULOS, C. D.; KYRITSIS, D. C. Butanol or DEE blends with either straight vegetable oil or biodiesel excluding fossil fuel: Comparative effects on diesel engine combustion attributes, cyclic variability and regulated emissions trade-off. **Energy**, v. 115, p. 314–325, 2016.

RANDAZZO, M. L.; SODRÉ, J. R. Exhaust emissions from a diesel powered vehicle

fuelled by soybean biodiesel blends (B3-B20) with ethanol as an additive (B20E2-B20E5). **Fuel**, v. 90, n. 1, p. 98–103, 2011.

RESOLUÇÃO nº16, de 29 de outubro de 2018. **Conselho Nacional De Política Energética**, p. 15–16, 2018.

ROY, M. M., CALDER, J., WANG, W., MANGAD, A., e DINIZ, F. C. M. Cold start idle emissions from a modern Tier-4 turbo-charged diesel engine fueled with diesel-biodiesel, diesel-biodiesel-ethanol, and diesel-biodiesel-diethyl ether blends. **Applied Energy**, v. 180, p. 52–65, 2016.

SARAVANAN, S., NAGARAJAN, G., ANAND, S., e SAMPATH, S. Correlation for thermal NO_x formation in compression ignition (CI) engine fuelled with diesel and biodiesel. **Energy**, v. 42, n. 1, p. 401–410, 2012.

SATGÉ DE CARO, P. et al. Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines. **Fuel**, v. 80, n. 4, p. 565–574, 2001.

SCHWERDT, Christian. Modelling NO_x-formation in combustion processes. **MSc Theses**, 2006.

SOID, S. N.; ZAINAL, Z. A. Spray and combustion characterization for internal combustion engines using optical measuring techniques - A review. **Energy**, v. 36, n. 2, p. 724–741, 2011.

SRIHARI, S.; THIRUMALINI, S.; PRASHANTH, K. An experimental study on the performance and emission characteristics of PCCI-DI engine fuelled with diethyl ether-biodiesel-diesel blends. **Renewable Energy**, v. 107, p. 440–447, 2017.

SZABADOS, G. et al. Evaluation analysis of particulate relevant emission of a diesel engine running on fossil diesel and different biofuels. **Energy**, v. 161, p. 1139–1153, 2018.

TUTAK, W. et al. A comparative study of co-combustion process of diesel-ethanol and biodiesel-ethanol blends in the direct injection diesel engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 117, p. 155–163, 2017.

VARATHARAJAN, K.; CHERALATHAN, M.; VELRAJ, R. Mitigation of NO_x emissions from a jatropha biodiesel fuelled diesel engine using antioxidant additives. **Fuel**, v. 90, n. 8, p. 2721–2725, 2011a.

VENU, H.; MADHAVAN, V. Influence of diethyl ether (DEE) addition in ethanol-biodiesel-diesel (EBD) and methanol-biodiesel-diesel (MBD) blends in a diesel engine. **Fuel**, v. 189, p. 377–390, 2017.

VERMA, P.; SHARMA, M. P. Performance and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 5, n. 1, p. 245–250, 2015.

WEI, L.; CHEUNG, C. S.; NING, Z. Effects of biodiesel-ethanol and biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel engine. **Energy**, v. 155, p. 957–970, 2018.

WU, F., WANG, J., CHEN, W., e SHUAI, S. A study on emission performance of a diesel engine fueled with five typical methyl ester biodiesels. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 7, p. 1481–1485, 2009.

XING-CAI, L., JIAN-GUANG, Y., WU-GAO, Z., e ZHEN, H. Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol-diesel blend fuel. **Fuel**, v. 83, p. 2013–2020, 2004.

XUE, J.; GRIFT, T. E.; HANSEN, A. C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. v. 15, p. 1098–1116, 2011.

YASAR, F. Comparison of fuel properties of biodiesel fuels produced from different oils to determine the most suitable feedstock type. **FUEL**, v. 264, p. 116817, 2020.

YESILYURT, M. K.; AYDIN, M. Experimental investigation on the performance, combustion and exhaust emission characteristics of a compression-ignition engine fueled with cottonseed oil biodiesel/diethyl ether/diesel fuel blends. **Energy Conversion and Management**, v. 205, 2020.

YILMAZ, N. Performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with

biodiesel-ethanol and biodiesel-methanol blends at elevated air temperatures. **Fuel**, v. 94, p. 440–443, 2012.

ZHAN, C., FENG, Z., ZHANG, M., TANG, C., e HUANG, Z. Experimental investigation on effect of ethanol and di-ethyl ether addition on the spray characteristics of diesel/biodiesel blends under high injection pressure. **Fuel**, v. 218, p. 1–11, 2018.

ZHENG, Z., BADAWY, T., HENEIN, N., e SATTLER, E. Investigation of physical and chemical delay periods of different fuels in the ignition quality tester. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 135, n. 6, 2013.



UFBA

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI**

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA

CEP: 40.210-630

Telefone: (71) 3283-9800

E-mail: pei@ufba.br

Home page: <http://www.pei.ufba.br>