

PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

ANDERSON ANTUNES DE PAULO

ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES E CONSUMO ESPECÍFICO DE UM GRUPO MOTOR-
GERADOR ABASTECIDO COM MISTURAS DIESEL, BIODIESEL E ETANOL

Porto Alegre
2019

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



**ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES E CONSUMO ESPECÍFICO DE
UM GRUPO MOTOR-GERADOR ABASTECIDO COM MISTURAS
DIESEL, BIODIESEL E ETANOL**

ANDERSON ANTUNES DE PAULO

ENGENHEIRO MECÂNICO

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

Março, 2019

Ficha Catalográfica

D278a de Paulo, Anderson Antunes

Análise das emissões de gases e consumo específico de um grupo motor-gerador abastecido com misturas diesel, biodiesel e etanol / Anderson Antunes de Paulo . – 2019.

81 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio Mazzini Fontoura.

1. Biodiesel. 2. Diesel. 3. Etanol. 4. Grupo Motor-Gerador. 5. Emissões. I. dos Santos, Carlos Alexandre. II. Fontoura, Luiz Antonio Mazzini. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Salete Maria Sartori CRB-10/1363



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES E CONSUMO ESPECÍFICO DE
UM GRUPO MOTOR-GERADOR ABASTECIDO COM MISTURAS
DIESEL, BIODIESEL E ETANOL**

ANDERSON ANTUNES DE PAULO
ENGENHEIRO MECÂNICO

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ ANTONIO MAZZINI FONTOURA

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Porto Alegre
Março, 2019



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

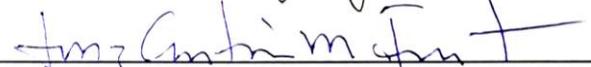
**ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES E CONSUMO
ESPECÍFICO DE UM GRUPO MOTOR - GERADOR
ABASTECIDO COM MISTURAS DIESEL, BIODIESEL E
ETANOL**

CANDIDATO: ANDERSON ANTUNES DE PAULO

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - ORIENTADOR



DR. LUIZ ANTONIO MAZZINI FONTOURA - CO-ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA



**DR. LUIZ CARLOS GERTZ - PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
MATERIAIS E PROCESSOS - ULBRA**



DR. FELIPE DALLA VECCHIA - PGETEMA - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 505 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br
www.pucrs.br/politecnica

“Fazer, todos os dias, as mesmas coisas e esperar resultados diferentes é a maior prova de insanidade.”

(Albert Einstein)

DEDICATÓRIA

Dedicar, agradecer, oferecer, todos sinônimos demasiadamente simples para descrever a importância dela neste mestrado e em minha vida! A minha esposa, Dra. Aline, sempre estivemos lado a lado, mas geralmente ela estava atrás, me empurrando, me motivando, abrindo meus olhos e me descrevendo o caminho, suas belezas e dificuldades. Sem ela não estaria hoje aqui. Muito, muito obrigado meu amor.

A minha família, Fernando (pai) e Mara (mãe) por toda a educação, carinho e auxílio incondicional que me deram em todas as etapas de minha vida e neste mestrado.

Aos meus filhos Sofia e Benício que são o real motivo de meus esforços e a motivação em busca de um mundo melhor, mais sustentável.

AGRADECIMENTOS

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

Agradeço ao professor Dr. Carlos Alexandre dos Santos, orientador acadêmico e de vida, pela ajuda, pelo esforço e paciência dedicados.

Ao professor Dr. Luiz Antônio Mazzini Fontoura, co-orientador, amigo e mentor em biocombustíveis, pelo apoio e parceria em projetos e eventos.

Ao professor Dr. Felipe Dalla Vecchia, um amigo feito ao longo de minha carreira acadêmica e um tutor nos momentos de aperto.

À Sra. Cláudia Maria P. Meira e Silva, pelo apoio e excelente trabalho realizado junto aos alunos do PGETEMA da PUCRS.

Ao Sr. Anderson Cardoso, por toda atenção e colaboração, impar, dedicados em auxiliar nas etapas do projeto.

À empresa Autogeradora por disponibilizar os equipamentos e o local utilizado nos ensaios realizados.

Ao Engenheiro Matheus Sansoni Krabe, pelo suporte e auxílio em todos os ensaios de campo.

Ao Coordenador do SENAI, Sr. Sergio Flor, pela ajuda na disponibilidade e adaptação de horários para execução de testes e conclusão das disciplinas.

Ao Professor Joel de Oliveira e demais colegas do SENAI Automotivo pelas horas de discussões e devaneios sobre a combustão em motores diesel.

Aos amigos e familiares que me motivaram e contribuíram ao longo desta jornada.

À empresa Bianchini S.A pelo fornecimento do Biodiesel utilizado nos ensaios realizados.

À universidade PUCRS, pela infraestrutura e corpo técnico disponibilizados no desenvolvimento do trabalho.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	7
AGRADECIMENTOS	8
SUMÁRIO	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS	15
RESUMO	16
ABSTRACT	17
1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	21
2.1. Objetivos Específicos	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1. Grupo Motor-Gerador	23
3.2. Biodiesel	27
3.3. Etanol	29
3.4. Principais Propriedades Dos Combustíveis	30
3.4.1 Massa Específica.....	30
3.4.2 Poder Calorífico	30
3.4.3 Número de Cetano.....	31
3.4.4 Viscosidade.....	33
3.4.5. Lubricidade.....	33
3.5. Emissões de Gases: Diesel e Misturas Ternárias Diesel-Biodiesel-Etanol	34
3.5.1 Monóxido de Carbono (CO).....	36
3.5.2. Dióxido de Carbono (CO ₂).....	36
3.5.3. Óxidos de Nitrogênio (NO _x).....	37
3.6. Avaliação Estequiométrica das Reações de Combustão do Diesel, do Biodiesel e do Etanol	38
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	43
4.1. Grupo Motor-Gerador	43

4.2. Combustíveis Analisados.....	44
4.3. Metodologia dos Testes	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1. Emissões dos Gases de Exaustão	51
5.2. Temperatura dos Gases de Exaustão	52
5.1.1. Análise da Blenda B8.....	55
5.1.2. Análise da Blenda B20.....	57
5.1.3. Análise da Blenda B100.....	58
5.1.4. Comparativo por Gases, CO	61
5.1.5. Comparativo por Gases, CO ₂	63
5.1.6. Comparativo por Gases, Hidrocarbonetos	64
5.1.7. Comparativo por Gases, O ₂	68
5.3. Consumo de Combustível	71
6. CONCLUSÕES	74
7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Reação de transesterificação real para produção de biodiesel.	28
Figura 3.2. Equações de combustão do etanol (superior), diesel fóssil (intermediário) e biodiesel (inferior).....	39
Figura 3.3. (a) Variação dos volumes (V) de diesel fóssil (DF), biodiesel etílico (BD Et) e etanol (EtOH) na composição das blendas e de O ₂ consumido, e de CO ₂ e H ₂ O produzidos na queima de 1 L do combustível, (b) Variação dos volumes (V) de diesel fóssil (DF), biodiesel metílico (BD Me) e etanol (EtOH) na composição das blendas e de O ₂ consumido, e de CO ₂ e H ₂ O produzidos na queima de 1 L do combustível.....	41
Figura 4.1. Grupo motor-gerador utilizado (Autogeradora).	43
Figura 4.2. Banco de cargas resistivas para simular a demanda energética.	44
Figura 4.3. Fluxograma resumido das rotinas de ensaios no GMG.	46
Figura 4.4. Balança de precisão gravimétrica.	47
Figura 4.5. Embalagens individuais dos combustíveis.	47
Figura 4.6. Painel de controle do banco de cargas.	48
Figura 4.7. Posicionamento da sonda de medição dos gases de exaustão.	49
Figura 4.8. Central de controle do analisador de gases.....	49
Figura 5.1. (a) Emissões dos gases de exaustão para o B8 ao longo do tempo, sem carga; (b) B20e com carga de 15 kW, (c) B100E10m com carga de 30 kW.....	52
Figura 5.2. Temperatura dos gases de exaustão, sem carga.	53
Figura 5.3. Temperatura dos gases de exaustão, carga 15 kW.	54
Figura 5.4. Temperatura dos gases de exaustão, carga 30 kW.	54
Figura 5.5. Emissões médias dos gases de exaustão para o B8, sem carga.	55
Figura 5.6. Emissões médias dos gases de exaustão para o B8, carga 15 kW.	56
Figura 5.7. Emissões médias dos gases de exaustão para o B8, carga 30 kW.	56

Figura 5.8. Emissões médias dos gases de exaustão para o B20, sem carga.	57
Figura 5.9. Emissões médias dos gases de exaustão para o B20, carga 15 kW.	58
Figura 5.10. Emissões médias dos gases de exaustão para o B20, carga 30 kW. ...	58
Figura 5.11. Emissões médias dos gases de exaustão para o B100, sem carga.	59
Figura 5.12. Emissões médias dos gases de exaustão para o B100, carga 15 kW.	60
Figura 5.13. Emissões médias dos gases de exaustão para o B100, carga 30 kW.	61
Figura 5.14. Comparativo das emissões de CO para todas as blendas, sem carga.	62
Figura 5.15. Comparativo das emissões de CO para todas as blendas, carga 15 kW.	62
Figura 5.16. Comparativo das emissões de CO para todas as blendas, carga 30 kW.	63
Figura 5.17. Comparativo das emissões de CO ₂ para todas as blendas, sem carga.	63
Figura 5.18. Comparativo das emissões de CO ₂ para todas as blendas, carga 15 kW.	64
Figura 5.19. Comparativo das emissões de CO ₂ para todas as blendas, carga 30 kW.	64
Figura 5.20. Comparativo das emissões de H _x C _y para o B20, sem carga.	65
Figura 5.21. Comparativo das emissões de H _x C _y para o B20, carga 15 kW.	66
Figura 5.22. Comparativo das emissões de H _x C _y para o B20, carga 30 kW.	66
Figura 5.23. Comparativo das emissões de H _x C _y para o B100, sem carga.	67
Figura 5.24. Comparativo das emissões de H _x C _y para B100, carga 15 kW.	67
Figura 5.25. Comparativo das emissões de H _x C _y para o B100, carga 30 kW.	68
Figura 5.26. Comparativo das emissões de O ₂ , sem carga.	68
Figura 5.27. Comparativo das emissões de O ₂ , carga 15 kW.	69
Figura 5.28. Comparativo das emissões de O ₂ , carga 30 kW.	69
Figura 5.29. (a) Comparativo das emissões de NO _x , sem carga, (b) Comparativo das emissões de NO _x , carga 15 kW.	70
Figura 5.30. Comparativo das emissões de NO _x , carga 30 kW.	71
Figura 5.31. Consumo específico de combustível para carga de 15 kW.	73

Figura 5.32. Consumo específico de combustible para carga de 30 kW.73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Massas molares (MM), massas específicas (d) do biodiesel metílico (BD Me), etílico (BD Et), diesel fóssil (DF) e etanol anidro (EtOH) e os volumes (V) de O ₂ consumido, e de CO ₂ e H ₂ O produzidos na queima de 1 L do combustível.	39
Tabela 3.2. Volumes (V) de diesel fóssil (DF), biodiesel metílico (BD Me) e etanol (EtOH) na composição das blendas e de O ₂ consumido, e de CO ₂ e H ₂ O produzidos na queima de 1 L do combustível.....	40
Tabela 3.3. Volumes (V) de diesel fóssil (DF), biodiesel etílico (BD Et) e etanol (EtOH) na composição das blendas e de O ₂ consumido, e de CO ₂ e H ₂ O produzidos na queima de 1 L do combustível.....	40
Tabela 4.1. Características técnicas do motor diesel (fabricante MWM modelo 3.0).	44
Tabela 4.2. Características técnica do gerador (Cramaco G2R).	44
Tabela 4.3. Combustíveis e proporções das misturas ternárias.	45
Tabela 4.4. Características técnicas do analisador de gases (Testo, 2013).....	50
Tabela 5.1. Consumo médio de combustível por mistura.	72

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
BX	Percentual de Biodiesel Adicionado ao Diesel Fóssil
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CD	Combustível Diesel
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
EAC	Etanol Anidro Combustível
EHC	Etanol Hidratado Combustível
EGR	Recirculação Gás de Exaustão (<i>Exhaust Gas Recirculation</i>)
EX	Percentual de Etanol Adicionado ao Diesel Fóssil
GEE	Gases de Efeito Estufa
GMC	Grupo Motor-Gerador
HC	Hidrocarboneto
H ₂ O	Água
IPCC	Painel Intergovernamental para Mudanças do Clima
LMCA	Laboratório de Motores e Combustíveis Alternativos
NC	Número de Cetano
PCR	Principal Combustível De Referência
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
O ₃	Ozônio
NO _x	Óxido Nitroso
TC	Transformadores de Corrente
TP	Transformadores de Potência

RESUMO

ANTUNES DE PAULO, ANDERSON. *Análise das Emissões de Gases e Consumo Específico de um Grupo Motor-Gerador Abastecido Com Misturas Diesel, Biodiesel e Etanol*. Porto Alegre. 2019. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O objetivo do presente trabalho foi analisar o desempenho de um Grupo motor-gerador diesel referente as emissões de gases de exaustão e ao consumo de combustível, abastecido com misturas diesel-biodiesel-etanol, simulando uma demanda energética variável em banco de cargas resistivas. Foram utilizados os combustíveis diesel comercial com adição de 8% de biodiesel (B8), biodiesel puro (B100) produzido a partir de óleo de soja obtido por reações de transesterificação metílica e etílica, uma blenda com 20% destes biodieseis (B20), e misturas com acréscimo de 5% (E5) e 10% (E10) de etanol hidratado comercial. Foram realizados ensaios sem carga e com cargas aplicadas de 15 kW e 30 kW, simulando demandas de 30% e 60% da capacidade nominal do gerador, para cada mistura de combustível. O grupo motor-gerador utilizado é composto por um motor de combustão interna tipo diesel, 4 cilindros, capacidade volumétrica de 2940 cm³, com sistema de injeção forçada de combustível, acoplado à um gerador de energia elétrica de 40 kVA de potência nominal, fator de potência entre 0,95 e 0,99, de uso comercial. Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura controlada, nas instalações da empresa Autogeradora, Porto Alegre, RS. Os resultados obtidos salientaram, no ponto de vista econômico, a blenda B20 como a melhor opção na redução de gases e no consumo específico. Na proposta de geração de energia renovável, a introdução de etanol na blenda com biodiesel demonstrou reduções de emissões sem comprometer a entrega de potência, e não foram encontradas variações no comparativo dos biodieseis produzidos por diferentes álcoois na transesterificação, ficando clara a opção pela rota etílica na produção puramente renovável.

Palavras-Chaves: Diesel, Biodiesel, Etanol, Grupo Motor-Gerador, Emissões.

ABSTRACT

ANTUNES DE PAULO, ANDERSON. **Gas Emissions and Fuel Consumption of a Motor-Generator Group Fueled with Diesel, Biodiesel and Ethanol Blends.** Porto Alegre. 2019. Master Dissertation. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The objective of the present work was to analyze the performance of a Diesel Engine-Generator Group regarding to exhaust emissions and fuel consumption, fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends, simulating a variable energy demand in a resistive load bank. The following fuels were analyzed: B8 (commercial fossil diesel with 8%v/v biodiesel added), pure biodiesel (B100) produced from soybean oil by the transesterification process using the methylic and ethylic routes, B20 blend, with additions of 5% and 10% content (%v/v) of the commercial hydrated ethanol. Unloaded tests were performed as well as with applied loads of 15 kW and 30 kW, simulating demands of 30% and 60% of the nominal capacity of the generator, for each fuel. The motor-generator group consists in a diesel internal combustion engine, 4 strokes, 2940 cc, with a forced fuel injection system coupled to a 40 kVA nominal power generator, and power factor between 0.95 and 0.99. The tests were carried out with controlled temperature at the facilities of Autogeradora Company, Porto Alegre, RS. The results obtained showed that the B20 blend is the best option in terms of gas emission and specific fuel consumption reductions. In the proposal for renewable energy generation, the introduction of ethanol into the blends with biodiesel showed emission reductions without compromising the delivery of power and no changes were found in the comparison of the biodiesel produced by different alcohols in the transesterification.

Key-words: Diesel, Biodiesel, Ethanol, Motor-Generation Group, Emissions.

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global vem sendo um desafio enfrentado pelas nações. O último relatório do Grupo de Trabalho II do Painel Intergovernamental para Mudanças do Clima (**IPCC, 2014**) afirma, com 90% de confiança, que a humanidade é a principal causadora do aumento dos níveis dos gases de efeito estufa nos últimos 60 anos, tais como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos nitrosos (NO_x), cujas concentrações atmosféricas são as mais altas em pelo menos 650 mil anos de história do planeta. O relatório projeta que até o final do século XXI, a temperatura média global pode subir de 2º C a mais de 4º C, e o nível médio do mar aumentar entre 28 cm e 59 cm.

Já o Relatório do Grupo de Trabalho III (**IPCC, 2014**) mostra que o maior aumento das emissões de gases de efeito estufa deu-se no setor de oferta de energia. A maior contribuição para esse aumento veio das emissões diretas do setor de transporte, resultantes do uso de combustíveis fósseis. Entre as múltiplas opções de mitigação, o relatório aponta para o aumento da participação dos biocombustíveis na oferta de energia, como uma medida fundamental no tratamento das emissões e seus efeitos sobre a segurança alimentar e sobre a redução da pobreza.

O Brasil é pioneiro na aplicação de biocombustíveis no mundo. O Decreto nº 22.789, de 1º de junho de 1933 em seu artigo 4º parágrafo “j” estipulava a obrigatoriedade da mistura de álcool anidro em todo combustível gasolina importada. Durante a crise mundial de petróleo na década de 1970, o país lançou o Programa Nacional do Álcool (PROACOOOL), criado em 1975, e mais recentemente, iniciou-se uma nova caminhada para o desenvolvimento do biodiesel no país, conforme a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997 que se refere a “Biodiesel: biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores à combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustível de

origem fóssil”. Atualmente, o Brasil acrescenta 27% de etanol anidro à gasolina fóssil, e 10% de biodiesel ao diesel fóssil vendidos em postos de combustíveis **(ANP, Lei nº 3.834/2015)**.

Para a produção de biodiesel é necessária certa quantidade de álcool e os mais utilizados são o metanol, de origem fóssil, e o etanol. No Brasil, a produção de biodiesel utiliza o metanol, por motivos econômicos, devido ao metanol apesar de importado, apresentar um custo menor que o etanol de cana de açúcar, indo em contra ao esperado, uma vez que o Brasil detém tecnologia e tradição na produção desse álcool a partir da cana-de-açúcar. Portanto, a produção de biodiesel no Brasil teria um ciclo fechado de carbono, apresentando um saldo líquido nulo nas emissões de CO₂ para a atmosfera. Outra característica, única dos processos de produção de energia da biomassa, é a devolução de oxigênio (O₂) para a atmosfera que ocorre na fotossíntese, durante o crescimento das plantas, na fase agrícola das cadeias de produção.

Está-se vivendo, em nível nacional, um excelente momento para a implementação de micro geração de energias de fontes renováveis, desde a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da Agência Nacional De Energia Elétrica **(ANEEL, 2012)**, que estabelece as condições gerais para o acesso aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Através desta regulação ocorreu um aumento crescente de instalações fotovoltaicas em residências, comércios e indústrias, pois, a obtenção da energia elétrica a partir desta tecnologia, células solares, é de fácil instalação e pode-se adequar a demanda (por ser modular). Contudo, foi observado por Sarmiento (2016), a necessidade de garantir estabilidade, tanto de carga, como na frequência fornecida, sendo a energia solar fotovoltaica considerada uma fonte inconstante, podendo apresentar grande variação ao longo do dia e, até mesmo ao longo de horas. Assim foi sugerida, analisada e implementada a geração de energia em sistemas híbridos Solar–Diesel, onde o grupo gerador movido à diesel garante a estabilidade e o suporte desejado ao sistema, sendo este já considerado como o futuro das instalações ligadas à rede elétrica **(SARMENTO, 2016)**.

Os motores térmicos são máquinas que convertem energia química armazenada nas moléculas de combustível em trabalho mecânico, e por sua vez motores alternativos a pistão são baseados no mecanismo pistão-biela-virabrequim que permite converter o movimento linear de um pistão dentro de um cilindro em

movimento rotativo de um eixo (virabrequim). O movimento do pistão é obtido pela variação de pressão do fluido de trabalho dentro do cilindro. Os motores diesel são descendentes diretos das máquinas à vapor utilizadas na Europa a partir do fim do século 18, iniciada pela apresentação da máquina rotativa de James Watt em 1782.

Com relação à utilização de óleos vegetais nos motores Diesel, o Dr. Rudolf manifestou-se da seguinte maneira, ao prefaciar o livro: Termodinâmica, de Chalkey, em 1911, **(SÁ, 1979)**:

“O motor Diesel pode ser alimentado com óleos vegetais e pode ajudar consideravelmente o desenvolvimento da agricultura nos países onde ele funcionar. Isto parece um sonho do futuro, mas eu posso predizer, com inteira convicção, que esse modo de emprego do motor Diesel pode, num dado momento, adquirir grande importância.”

O Brasil é um país privilegiado economicamente, e com enorme potencial para a produção de energia da biomassa e biocombustíveis, principalmente devido à sua grande extensão de terras agricultáveis, abundância de água doce, elevada incidência da radiação solar, disponibilidade de mão-de-obra rural e experiência adquirida com programas voltados à redução no consumo de combustíveis fósseis. Estudos mostram que a redução da emissão de monóxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados, partículas nocivas à saúde e gases do efeito estufa, podem ser alcançados usufruindo destes biocombustíveis renováveis, em sua forma natural ou mesclados, formando blends binárias ou ternárias **(ANDREW, 2018)**. O biodiesel consiste em uma mistura de ésteres graxos obtidos a partir de óleos ou gorduras de origem animal ou vegetal, e pode ser utilizado como substituto parcial ou integral ao diesel fóssil em motores de ciclo diesel **(AGARWAL, 2007)**, requerendo pequenas ou nenhuma modificação no motor **(ANDREW, 2018)**, e o etanol resulta da fermentação da cana de açúcar e outros cereais como milho, o qual pode ser adicionado em pequenas proporções às misturas diesel-biodiesel, aumentando assim a contribuição dos biocombustíveis na matriz brasileira de combustíveis.

Para analisar esta contribuição, o presente trabalho está dividido da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta uma breve introdução ao tema, sendo que o Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura nos principais tópicos abordados na pesquisa. O Capítulo 3 se dedica ao procedimento experimental, cujos resultados e discussão são apresentados no Capítulo 4. As conclusões são compiladas no Capítulo 5, e o Capítulo 6 apresenta as propostas para os trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação do desempenho de um grupo motor-gerador referente a emissões de gases de exaustão e ao consumo de combustível, abastecido com diferentes misturas de diesel, biodiesel e etanol. Para tanto, foram utilizados os combustíveis: diesel comercial (B8), comparado com biodiesel de soja etílico (B100e), biodiesel de soja metílico (B100m), e variantes acrescidas de 5% (E5) e 10% (E10) de etanol hidratado comercial (Petrobras).

2.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar o desempenho do motor ciclo diesel de um grupo motor-gerador em diferentes condições de carga (0%, 30% e 60%) e percentuais de etanol adicionados nas misturas de diesel-biodiesel e biodiesel puro em relação às emissões dos gases CO, NO_x, O₂, CO₂, H_xC_y, temperatura dos gases de exaustão e consumo de combustível;
- Comparar e determinar qual das misturas obtém o melhor comportamento termodinâmico e ambiental, sem comprometer o motor em termos de eficiência;
- Analisar a viabilidade de geração de energia elétrica utilizando a mistura diesel-biodiesel-etanol e as proporções adequadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O chamado “efeito estufa” é a forma com que o planeta mantém sua temperatura constante. A atmosfera é altamente transparente à luz solar, porém cerca de 35% da radiação que a Terra recebe vai ser refletida de volta ao espaço, ficando os outros 65% retidos na crosta terrestre. Isto se deve principalmente ao efeito sobre os raios infravermelhos de gases como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrogênio (NO_x) e ozônio (O₃) presentes na atmosfera (totalizando menos de 1% desta), que irão reter esta radiação na Terra. Nos últimos anos, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera tem aumentado cerca de 0,4% anualmente, e este aumento, entre outros fatores, se deve à utilização de petróleo, gás, carvão mineral e à destruição das florestas tropicais. A concentração de outros gases que contribuem para o efeito estufa, tais como o metano e os clorofluorcarbonos também aumentaram rapidamente. O efeito conjunto de tais substâncias pode vir a causar um aumento da temperatura global (aquecimento global) estimado entre 2°C e 4°C nos próximos 100 anos (**IPCC, 2014**). Um aquecimento desta ordem de grandeza não só irá alterar o clima em nível mundial, como também irá aumentar o nível médio das águas do mar em, pelo menos, 28 cm, o que poderá interferir na vida de milhões de pessoas que habitam áreas costeiras mais baixas. Se a Terra não fosse coberta por um manto de ar, a atmosfera seria demasiado fria para a vida. Desde a época pré-histórica que o dióxido de carbono tem tido um papel determinante na regulação da temperatura global do planeta. Com o aumento da utilização de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), a concentração de dióxido de carbono na atmosfera duplicou nos últimos cem anos (**BATTIST e NAYLOR, 2009**).

Atualmente está se vivenciando uma crescente movimentação em torno da alteração da matriz energética dos principais países do mundo. Este tem sido motivado por dois aspectos, hoje considerados estratégicos: o primeiro é a dependência da importação de recursos energéticos por parte de algumas nações, e o segundo é a necessidade de redução dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. **OMENA (2013)** destaca que a inter-relação entre as alterações climáticas, a segurança nacional e a dependência de energia situaram a segurança energética como tema prioritário dos responsáveis políticos, organizações

internacionais e empresas na virada do século XX. Destaca-se o exemplo da União Europeia (UE), que apresenta o seguinte panorama **(OMENA, 2013)**:

- Dinamarca: Independente em termos energéticos.
- Polônia e Reino Unido: Baixa dependência das importações (cerca de 20 por cento).
- Irlanda, Itália, Portugal e Espanha: Dependência de importação superior a 80 por cento.
- Pequenos países insulares, como Malta e Chipre, juntamente com Luxemburgo: totalmente dependentes das importações de energia.

Portanto, o desenvolvimento de novos combustíveis, cuja origem seja renovável, é de fundamental importância. Nesse sentido, os biocombustíveis surgem como uma alternativa eficaz. Os biocombustíveis são fontes de energia renováveis oriundas de produtos vegetais e animais, colocando em destaque e vantagem nessa corrida energética países com características agropecuárias, levando desenvolvimento econômico e social, alterando as configurações geopolíticas mundiais.

3.1. Grupo Motor-Gerador

Um grupo motor-gerador (GMC) é um equipamento que possui um motor de combustão interna de ignição por centelha ou por compressão (Ciclo Otto ou Ciclo Diesel), acoplado a um gerador de energia elétrica e montado sobre base metálica, com acionamento manual ou automático. Estes equipamentos podem ser usados de forma isolada ou em paralelo com outros grupos geradores, formando usinas de até 30 MVA. O grupo gerador conta com proteção opcional contra intempéries, possuindo ou não, carenagem silenciadora, sendo este, disponível tanto em unidades móveis como estacionárias. O motor de combustão interna converte a energia química proveniente da combustão interna em energia mecânica, e o transformador acoplado no motor converte energia mecânica em energia elétrica. Existem diversas utilidades para estes grupos, tais como: fonte de energia principal ou auxiliar em indústrias, supermercados, shoppings, hospitais, edifícios residenciais e comerciais, hotéis e outros. Seu princípio de funcionamento pode ser explicado pelas das leis dos campos elétricos e magnéticos e da Segunda Lei de Newton, segundo a Equação 3.1 **(HEYWOOD, 1988)**:

$$\left[\frac{\text{Entrada de Energia}}{\text{Mecânica}} \right] = \left[\frac{\text{Saída de Energia}}{\text{Elétrica}} \right] + \left[\frac{\text{Energia Armazenada}}{\text{Magnética}} \right] + \left[\frac{\text{Energia Convertida}}{\text{Calor}} \right] \quad (3.1)$$

Os grupos motor-gerador podem ser utilizados para suprir energia em caso de falha no fornecimento da concessionária, com a possibilidade de utilização em teatros, hospitais, shoppings, refinarias, sistemas de telecomunicações; por sua confiabilidade; tempo de entrada em operação; acionamento manual e automático; podendo substituir o fornecimento da concessionária em horários de ponta. Conforto, segurança e confiabilidade são algumas das garantias que um GMC pode oferecer quando uma empresa necessita de energia de fora da rede. Essa necessidade pode durar horas, dias ou mesmo semanas, até que o fornecimento de eletricidade seja estabilizado.

Atualmente, com a inserção de micro e pequenos geradores de energia renovável (eólica, biomassa e fotovoltaica), em residências e empresas, o grande desafio passa a ser administrar a rede elétrica local (distribuição) em função da demanda e da produção instantânea, dado que estas fontes de energia podem sofrer grande variação de produção ao longo do dia, devido a mudanças climáticas. Nestes casos, os GMC podem ser utilizados para suprir a demanda instantânea até a operadora regular a demanda na rede elétrica.

3.1.1 Motores Diesel

Os motores diesel tiveram o início de seu desenvolvimento com a introdução do conceito de queima isobárica (a volume constante) por George Bayle Brayton (1872) e pelo conceito de vaporização de hidrocarbonetos parafínicos como combustível apresentado por Herbert Akroyd Stuart (1890), cujo motor tinha queima isocórica (a volume constante). Mas foi Rudolf Christian Karl Diesel (1892), quem efetivamente construiu um motor com alta taxa de compressão volumétrica, com injeção de combustível parafínico, com queima isobárica e ignição espontânea. Estas são características dos motores diesel atuais. Os motores diesel são também designados como motores de ignição por compressão (CI), principalmente nos textos em língua inglesa (**BOSCH, 2005**).

3.1.2 Combustão em Motores Diesel

O funcionamento dos motores de ignição por compressão se baseia na capacidade do combustível se volatilizar em alguns milissegundos, quando injetado em um meio oxidante, a pressões da ordem de 20 a 50 bar e a uma temperatura de 500°C a 700°C (**BOSCH, 2005**). Nestas condições, o combustível sob a forma de pequenas gotas, deve se inflamar rapidamente em contato com o oxigênio necessário à sua combustão. Assim, este é caracterizado pelo número de cetano (NC) dos hidrocarbonetos fósseis. Para os combustíveis oriundos da biomassa, da mesma maneira, se utilizam produtos cujas propriedades de volatilização se aproximem daquelas dos combustíveis fósseis. Também se deve aproveitar da habilidade do biocombustível ao se decompor, liberar muito rapidamente os primeiros compostos capazes de queimar na mesma base de tempo que aqueles emitidos pelos hidrocarbonetos do petróleo. O desenrolar da combustão começa com a sua ignição, que será fortemente influenciada pela natureza dos compostos restantes após a liberação dos mais voláteis. Isto significa que a natureza química e as propriedades físicas das moléculas de biocombustível são de interesse daqueles que desejam utilizar um motor de ignição por compressão sem realizar modificações técnicas nestes. O retardo de ignição e a qualidade da combustão estarão sempre ligados às características físico-químicas do biocombustível estudado.

A reação química no caso de uma combustão completa do diesel resultaria em Energia, Dióxido de carbono e água, o nitrogênio passaria pelo sistema, por se tratar de um gás inerte: $H_xC_y + Ar \Rightarrow CO_2 + H_2O + N_2 + \text{Entalpia de combustão}$.

3.1.3 Gerador Elétrico

O gerador elétrico é acionado pelo motor à combustão por meio de acoplamento direto, sendo sua função transformar trabalho mecânico em energia elétrica. O princípio eletrodinâmico baseia-se em um condutor elétrico que “corta” as linhas de força de um campo magnético, induzindo uma tensão elétrica (força eletromotriz- FEM), sendo indiferente que o campo magnético fique estacionário e o condutor elétrico em movimento ou, vice-versa, o condutor estacionário e o campo magnético móvel. No gerador, o condutor elétrico (representado pelo enrolamento do estator) é estacionário e o campo magnético efetua um movimento de rotação.

Por isso dá-se o nome de “rotor”. Como os polos do campo magnético modificam constantemente a sua posição em virtude da rotação, forma-se no condutor uma tensão com valores e direção que se alternam, ou seja, uma tensão alternada. A força eletromotriz induzida é tanto maior quanto mais forte for o campo magnético (quanto mais concentradas forem as linhas de força) e quanto mais alta for a velocidade, com a qual as linhas de força forem cortadas (**BOSCH, 2005**).

O gerador pode ser dividido em vários componentes que tem diversas funções, os principais componentes serão descritos a seguir:

- MÁQUINA PRINCIPAL, constituída pelo estator e rotor.

Estator: A carcaça com o estator, geralmente é confeccionada em uma estrutura de aço soldado. O núcleo magnético com o bobinado se aloja na carcaça. Os fios das bobinas estatóricas são introduzidos um a um nas ranhuras de forma semifechadas. As bobinas se fixam firmemente em sua posição, estando estreitamente ligadas para resistir a vibrações, tensões mecânicas e impactos. Os terminais das bobinas se conectam aos bornes sem condutores intermediários, evitando que a junção e a possibilidade de contatos errados.

Rotor: O rotor polar aloja as bobinas de excitação. Os núcleos polares estão formados por laminações finas. Uma gaiola induz o efeito amortecedor para o caso de cargas desequilibradas e trabalhos em paralelo. As bobinas estão apoiadas em suas extremidades por barras axiais e nas cavidades entre os polos apoiadas com mordaças especiais, projetadas para resistir ao efeito da força centrípeta.

- EXCITATRIZ

Estator: É um gerador de corrente alternada, trifásico, com armação giratória. A proteção está fixada ao lado da excitatriz do gerador. O estator laminado forma os polos que mantêm as bobinas de campo da excitatriz.

Rotor: A armação da excitatriz está montada no eixo da máquina, fabricada com laminações de chapas finas de metal. O bobinado em arame esmaltado é trifásico, com neutro não acessível e alimenta um conjunto retificador composto por seis diodos conectados em ponte estrela. Estes diodos estão montados em três, em duas placas dissipadoras, uma positiva e outra negativa, isoladas eletricamente entre elas e a massa. Cada placa se conecta aos terminais dos bobinados de excitação do rotor polar e em paralelo entre elas se instala um protetor de sobre tensão.

- BOBINADO AUXILIAR DE EXCITAÇÃO

Dispõe-se de um bobinado auxiliar, cuja tensão gerada serve para alimentar o regulador de tensão em velocidades normais e curtos-circuitos (**CRAMACO G2R, 2017**).

3.2. Biodiesel

O biodiesel é definido como um combustível composto de ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de gorduras de origem vegetal ou animal (**ANP n°45, 2014**). O biodiesel foi desenvolvido em trabalhos realizados na Bélgica e em sua antiga colônia, o Congo Belga, conhecido como Zaire depois de sua independência. A patente belga 422.877, concedida em 31 de agosto de 1937 ao pesquisador Charles G. Chavanne (Universidade de Bruxelas, Bélgica), representa o primeiro relato do que hoje é conhecido como biodiesel. Ele descreve o uso de ésteres etílicos de óleo de palma como combustível análogo ao petrodiesel. Estes ésteres foram obtidos do óleo de palma por transesterificação em meio ácido, e maiores detalhes destas pesquisas foram publicados posteriormente (**CHAVANNE, 1938**). A partir dos anos 1990, vários países no mundo começaram a apresentar significativas ações e avanços na produção e uso de biodiesel, motivados pela consolidação do conceito de desenvolvimento sustentável e pela pressão internacional em reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Nesta mesma linha, o Brasil, em Decreto da Presidência da República, instituiu um Grupo de Trabalho Interministerial encarregado de apresentar estudos sobre a viabilidade da utilização do biodiesel como fonte de energia no país. No ano de 2004, o Governo Federal lançou o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), com o objetivo de implementar, de forma técnica e economicamente sustentável, a produção e uso do biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, via geração de renda e empregos (**PORTAL DO BIODIESEL, 2010**). A Lei n° 11.097, de 13 de janeiro de 2005, que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética do país, com o fortalecimento da participação das fontes renováveis, adquire caráter de política pública e estratégia energética (**BRASIL, 2005**). No momento presente, o país vive uma nova fase com o RenovaBio, uma política de Estado que objetiva traçar uma estratégia conjunta para reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis na matriz energética

brasileira, tanto para a segurança energética quanto para mitigação de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa.

As características principais do biodiesel são: praticamente isentos de aromáticos e enxofre; biodegradáveis; possuem número de cetano equivalente e ou superior ao diesel; possuem ponto de fulgor e viscosidade altos; redução nas emissões de gases que produzem efeito estufa; fontes renováveis de energia e levam à diminuição de dependência de petróleo (**ANDRADE, 2009**).

O biodiesel pode ser produzido através da reação de transesterificação, onde um glicerídeo (óleo vegetal ou gordura animal) reage com um álcool primário na presença de um catalisador usualmente básico. Após esta reação, a mistura é fracionada isolando os ésteres de glicerídeos de massa molecular elevada. A reação ideal está esquematizada na Figura 3.1.

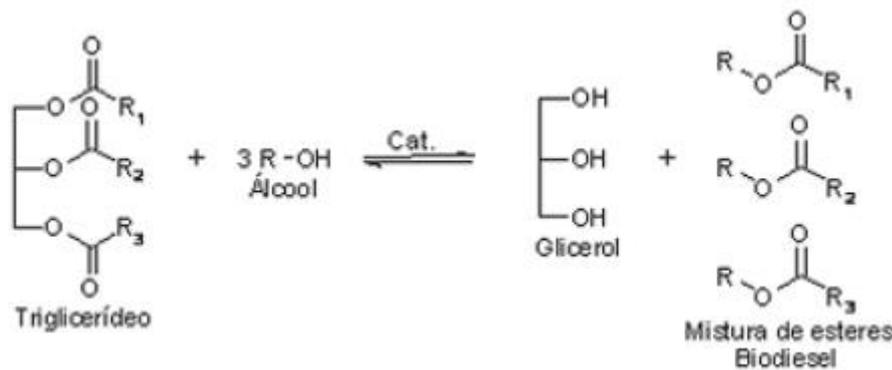


Figura 3.1. Reação de transesterificação real para produção de biodiesel.

Fonte: Samios *et al.* (2009).

A transesterificação se define pela reação de um éster com um álcool para formar outro éster, através de um catalisador. Esta reação pode ser feita com a utilização de diversos tipos de álcoois como reagentes e, catalisadores geralmente ácidos ou básicos. A alcoolize com metanol é tecnicamente mais viável do que a alcoolize com etanol e é a mais utilizada no Brasil devido ao baixo custo do metanol, mesmo este sendo importado e derivado de petróleo. Os catalisadores para a reação de transesterificação podem ser homogêneos ou heterogêneos. Entre os homogêneos, pode-se citar os catalisadores alcalinos, KOH, NaOH (baixo custo e alto rendimento) e metóxidos, e os catalisadores ácidos, H₂SO₄, H₃PO₄, HCl e H₂SO₄. Entre os catalisadores heterogêneos, pode-se citar óxidos metálicos e carbonatos. O biodiesel pode ser produzido por uma grande variedade de matérias

primas, entre estas se incluem a maioria dos óleos vegetais comuns (por exemplo, **soja**, algodão, palma, canola, amendoim, girassol) e gorduras animais (mais comuns, sebos) e gorduras residuais (exemplo óleo de fritura usado) (**MAZZINI, 2013**).

3.3. Etanol

O etanol (álcool etílico) é um álcool derivado do processo de fermentação de amidos e açúcares, apresentando um elevado poder antidetonante, razão pela qual é misturado à gasolina tipo A. No Brasil, utiliza-se a cana-de-açúcar para a produção do etanol, enquanto nos Estados Unidos e México é utilizado o milho.

Conforme determinado na resolução ANP n°. 36, o EAC (Etanol Anidro Combustível) que é adicionado à gasolina leva corante laranja, já o EHC (Etanol Hidratado Combustível) deve apresentar-se límpido e incolor.

O EHC utilizado para queima direta em motores de combustão tipo Otto, possui um teor alcóolico especificado entre 92,6° a 93,8°. O etanol, ao contrário da gasolina, é considerado uma substância pura, cuja fórmula é C_2H_5OH , por conter oxigênio em sua formulação, faz com que a molécula apresente polaridade. Isso determina que o etanol seja líquido. O álcool é um líquido incolor, de odor aromático, de sabor ardente e, por ser higroscópico, retira umidade das mucosas.

O EHC é considerado um álcool de baixa qualidade por ser um produto menos elaborado, normalmente produzido em colunas que não visam à extração de impurezas e tem a aplicação final menos nobre, não recomendada para uso humano. Apesar de a revisão bibliográfica recomendar, para misturas com diesel-biodiesel, a utilização de Álcool Etílico Absoluto 99,8% P.A., CH_3CH_2OH , pois a presença de água (H_2O) poderia provocar modificações físico-químicas no biodiesel e misturas binárias (**BUCKER, 2009**), devido ao processo de degradação por oxidação, que acarreta em aumento de acidez e do potencial de corrosividade, sujeitando o combustível a biodeterioração, optou-se utilizar o etanol hidratado combustível, EHC, que por se tratar de um combustível comercial (Petrobrás) de fácil acesso e custo reduzido, torna a produção das blends ternárias simples e ao alcance de operadores e usuários de GMG.

- DIESEL S500 10277 kcal/kg
- BODIESEL METÁLICO 8963 kcal/kg
- BODIESEL ETÍLICO 8891 kcal/kg
- ETANOL 6453 kcal/kg

3.4.3 Número de Cetano

O número de cetano (NC) geralmente é um indicativo adimensional da qualidade da ignição de um combustível. Como tal, representa um excelente indicador da qualidade do combustível diesel (CD). Uma escala, denominada NC, conceitualmente similar à escala de octanagem utilizada para gasolina, foi estabelecida para descrever a qualidade de ignição de petrodiesel e seus componentes. O hexadecano ($C_{16}H_{34}$); designado por cetano e que dá à escala o seu nome, um hidrocarboneto longo de cadeia linear, é considerado o padrão de alta qualidade de PCR (principal combustível de referência); e a ele é atribuído um NC de 100 (**PUCKETT, 1948**). No outro lado da escala, há o 2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 heptametilnonano (HMN, também $C_{16}H_{34}$), um composto altamente ramificado com péssima qualidade de ignição em motores diesel, com NC de 15, sendo este também considerado um PCR. O NC de um CD é determinado pelo tempo de retardo da ignição, isto é, pelo tempo que passa entre a injeção do combustível nos cilindros e a ocorrência da ignição. Quanto menor o tempo de retardamento da ignição, maior o valor de NC e vice-versa. Se o NC for muito alto, a combustão pode ocorrer antes do combustível e o ar estarem apropriadamente misturados, resultando em combustão incompleta e na emissão de fumaça. Se for muito baixo, podem ocorrer falhas no motor, trepidação, aumento excessivo da temperatura do ar, aquecimento lento do motor ao ser acionado e também, fenômeno de combustão incompleta. Padrões têm sido estabelecidos em todo mundo para determinação do NC, por exemplo, a norma ASTM D613 (ASTM D613) nos Estados Unidos, e internacionalmente a norma ISO 5165 (ISO 5165) da Organização Internacional da Padronização (ISO). Na norma ASTM, hexadecano e HMN são os compostos de referência. A norma ASTM D975 (ASTM D975) para CD convencionais exige um NC mínimo de 40, enquanto as especificações de biodiesel prescrevem um mínimo de 47 (ASTM D6751) ou 51 (EN 14214), o biodiesel pode ter um NC entre 8 a 10 % maior que o diesel fóssil dependendo da matéria (**LADOMMATOS, 1996**). No Brasil,

o diesel S10 é uma mistura de diesel A (combustível isento de biodiesel) com biodiesel no teor de 8%, em volume, este atende a especificação conforme método utilizado pela norma ASTM D613, ASTM D6890, ASTM D7170 e D7668, e exige o NC mínimo de 48, segundo a resolução ANP n° 30, (2016).

- DIESEL S500 48
ASTM D613, D6890 e D7170
- BIODIESEL METÍLICO 56
ASTM D613
- BIODIESEL ETÍLICO 56
ASTM D613
- ETANOL 5

Segundo **ROCHA (2014)**, à medida que se aumenta a proporção de etanol em misturas ternárias o NC diminui radicalmente, chegando a valores que impedem a utilização deste combustível em motores de ignição por pressão, como por exemplo, na blenda com 20 % de biodiesel e 15 % de etanol, o NC chegou a 38,1 e de acordo com as normas brasileiras, o número mínimo de cetano do óleo combustível diesel são de 42 e 48, para aplicações rurais e metropolitanas, respectivamente. O índice de cetano de 5 indica que o etanol não é adequado para autoignição nas condições tecnológicas atuais dos motores Diesel. A ignição e o processo de combustão serão iniciados e controlados, quer por outro combustível (dual-mode de combustível) ou por um aditivo específico, ou por um sistema de descarga elétrica convencional (modo de ignição assistida). O poder calorífico de misturas ar/combustível estequiométrica, indica uma menor potência esperada de etanol em relação ao óleo Diesel. A baixa viscosidade cinemática de etanol pode ser uma restrição, não pela formação de gotas pequenas, mas devido a lubrificação deficiente dos órgãos de injeção para níveis elevados. O fabricante Scania oferece ônibus movidos a etanol em sua gama de produtos na Suécia. Mais de 600 desses ônibus estão operando atualmente nas cidades suecas. Eles usam o etano, aditivado a 5% em peso de um produto de "procetano" fabricada pela Akzo Nobel. Os desempenhos são idênticos aos dos ônibus rodando a óleo Diesel e as emissões de gases nocivos ao meio ambiente são significativamente menores (**BARROS, 2013**).

3.4.4 Viscosidade

A viscosidade é definida como a propriedade que descreve como se comporta a resistência do fluido ao seu escoamento. Esse parâmetro exerce grande influência sobre a forma como o combustível é pulverizado na câmara de combustão. **BOSCH (2005)** indica que a viscosidade baixa provoca perda de potência e eficiência do motor, pois ocorrerão vazamentos internos no sistema de injeção de combustível; por outro lado, uma viscosidade alta causa mudança no padrão de pulverização, devido à formação de gotículas maiores, atomização pobre e alta penetração do jato do combustível na câmara de combustão. Esse efeito dificulta a mistura do ar com o combustível, acarretando uma combustão pobre, acompanhada de perda de potência e desperdício de combustível, sendo este o caso quando se utiliza o biodiesel, onde geralmente as viscosidades tendem a ser mais altas que o óleo diesel. Os valores utilizados para viscosidade cinemática (relação da viscosidade absoluta e a densidade do fluido) utilizados são:

- DIESEL S500 á 40°C 2 a 5 mm²/s
Resolução ANP N°42
- BODIESEL METÁLICO 3,6 a 6 mm²/s
Resolução ANP N° 07, 2008
- BODIESEL ETÁLICO 3,6 a 6 mm²/s
Resolução ANP N° 07, 2008
- ETANOL 1,2 mm²/s
ABNT-NBR 14725:2012.

3.4.5. Lubricidade

A definição de lubricidade é a capacidade que um combustível possui de evitar a fricção e o desgaste entre superfícies metálicas sob carga. A lubricidade do diesel petroquímico tem se tornado fonte crescente de preocupação para as indústrias desde o advento da diminuição do percentual de enxofre do combustível, iniciado na década de noventa. Em 1993, a lubricidade do diesel caiu significativamente nos Estados Unidos quando foi exigido o uso de combustíveis diesel que apresentassem valores inferiores a 500 ppm de enxofre. Diversos automóveis na Califórnia apresentaram desgastes excessivos no sistema da bomba

injetora, a qual é lubrificada apenas pelo próprio combustível. Desde então, grupos de estudos na Europa e EUA desenvolveram metodologias para fazer a avaliação do desempenho do diesel comercializado (**COLUCCI, 2003**). A lubricidade do combustível está relacionada aos compostos orgânicos que contêm uma parte polar, sulfurada ou não, que formam uma camada limite na superfície do metal, protegendo-o contra o desgaste. A etapa de hidrotratamento além de reduzir o teor de enxofre, acaba ocasionando a remoção de compostos aromáticos policíclicos com grupos polares de nitrogênio e oxigênio (**WADUMESTHRIGE et al., 2009; KNOTHE et al., 2005**). Os compostos nitrogenados, oxigenados e di/poliaromáticos, seguidos pelos compostos sulfurados, mesmo em baixas concentrações, atuam como precursores naturais que conferem lubricidade necessária ao bom desempenho do óleo diesel (**GOMES et al., 2005**). Vários autores relatam estudos referentes às propriedades dos componentes do biodiesel como aditivo de lubricidade em diesel petroquímico de baixa quantidade de enxofre.

Por sua vez o etanol tem efeito contrário, reduzindo a lubricidade e podendo, como citado anteriormente, aumentar o desgaste de todas as partes móveis em contato com o combustível, demandando estudos de desgaste e corrosão afim de gerar um plano de manutenção preventiva em função da quantidade de etanol na blenda utilizada.

3.5. Emissões de Gases: Diesel e Misturas Ternárias Diesel-Biodiesel-Etanol

A fuligem é reconhecida como a principal razão por trás da opacidade da fumaça emitida por motores tipo diesel. Compostos oxigenados têm efeitos notáveis sobre a redução de fumaça, quando adicionado ao óleo diesel. Assim, quantidades de biodiesel e etanol adicionados ao diesel fóssil reduzem a fuligem. A sua formação ocorre principalmente na zona rica de combustível, onde a temperatura e a pressão são elevadas e a redução de ar é extrema, na região do núcleo de cada pulverizador de combustível. A formação de fuligem depende fortemente da carga do motor e à medida que a carga do motor aumenta, a relação ar-combustível diminui devido à elevada taxa de injeção de combustível que resulta em maior fumaça (**CAN, 2004**). Quando as misturas de diesel-biodiesel-etanol são utilizadas, normalmente, observa-se que a emissão de fumaça é reduzida em comparação com o diesel. Isto ocorre devido ao vínculo atômico do oxigênio, encontrado no

EHC, que satisfaz o equilíbrio químico positivo sobre a formação de fuligem. Quando é comparada a emissão de fumaça de diesel-biodiesel-etanol com a de diesel fóssil, alguns pesquisadores relatam pequena redução (**SUBBAIAH, 2010**), enquanto outros relatam uma redução significativa com estas misturas, mesmo quando a mistura contém apenas uma pequena parcela de biodiesel (**AGARWAL, 2007**). Também notaram que a emissão de fumaça apresenta diminuição de até 50% para misturas de combustíveis em todas as cargas, especialmente em médias e pequenas (**BARABÁS, 2010**). Estes pesquisadores observaram um mínimo de 27,6% e um máximo de 50,3% de diminuição em cargas mais elevadas. Hulwan e Joshi (**2011**) estudaram a emissão de fuligem e fumaça a partir de misturas diesel-biodiesel-etanol, alterando os tempos de injeção, e descobriram que a emissão de fumaça é constante e desprezível com o motor a baixa carga, mas aumenta lentamente com o aumento da carga em todos os tempos e velocidades. Embora eles tenham observado um aumento de emissão de fumaça com o aumento da carga, ressaltaram que a emissão é sempre menor do que a do combustível diesel fóssil. Também notaram que a fumaça diminui consideravelmente quando o tempo de injeção é avançado, em cargas mais elevadas.

Tempo avançado de injeção resulta em uma maior pressão dentro do cilindro, aumentando assim o tempo de oxidação e diminuindo a formação de partículas de fuligem, antes da válvula de escape se abrir. Devido ao teor de oxigênio em excesso e uma melhor capacidade de combinação, as misturas podem utilizar o tempo adicional de forma mais eficaz do que o combustível diesel (**HULWAN, 2011**). Alguns pesquisadores (**PARK, 2012; BARABÁS, 2010**) relataram redução na emissão de fuligem e fumaça, mas observaram que sua emissão é quase idêntica ao do combustível diesel. Mas se a taxa de recirculação de gases de escape (*Exhaust Gas Recirculation* - EGR) é aumentada ou o tempo de injeção é avançado, as emissões de fuligem e fumaça apresentam elevação, podendo-se concluir que uma redução de 60-80% de fuligem e fumaça podem ser obtidas quando misturas ternárias são utilizadas (**PIDOL, 2012**).

Além da fuligem produzida durante a combustão, outros gases são emitidos pelo sistema de exaustão do motor, e entre os principais destacam-se os monóxido e dióxido de carbono, e os óxidos nitrosos.

3.5.1 Monóxido de Carbono (CO)

A combustão rica em combustível é a razão por trás da formação de CO e aumenta quase linearmente com o desvio da estequiometria (HEYWOOD, 1988). A adição de biodiesel e etanol ao diesel fóssil pode resolver este problema. À medida que a proporção destes dois biocombustíveis é aumentada nas misturas ternárias, em troca, há um aumento do teor de oxigênio, o que leva a uma inflamação completa e a uma redução no teor de CO emitido (LI, 2005; SUBBAIAH, 2010; CAN, 2004). O baixo valor de aquecimento, o efeito de resfriamento e o alto calor latente do etanol resultam em baixa temperatura de combustão e velocidade de propagação de chama (WANG, 1997) que levam a combustão incompleta do etanol resultando em menores temperaturas e velocidade da frente de chama, o que favorece à combustão incompleta e uma emissão superior de CO. Outra razão por trás da elevada emissão de CO pode ser o atraso da ignição, isso se deve ao alto teor de oxigênio encontrado nestes combustíveis (CAN, 2004). Embora algumas investigações tenham observado uma redução das emissões de CO usando misturas de diesel-biodiesel-etanol (LI, 2005; MASUM, 2004; BHALE, 2009), alguns resultados opostos também foram observados (HE, 2003; XING-CAI, 2004). Quando se consideram as emissões de CO em geral, encontra-se pouca diferença ou emissão reduzida em comparação com diesel. Assim, a parcela de etanol nas misturas ternárias deve ser mantida baixa para controlar a emissão de CO.

3.5.2. Dióxido de Carbono (CO₂)

A combustão completa de hidrocarbonetos produz, exclusivamente, CO₂ e H₂O. A queima de combustíveis oxigenados, por sua vez, provoca uma diminuição na formação de CO₂, visto que apresentam um ou mais carbonos parcialmente oxidados em sua estrutura (KOWALEWICZ, 2005). Entretanto, em altas velocidades (rotações por minuto – rpm) e alta carga de motor, quanto mais combustível é queimado, sem ar em excesso, este efeito não é observado em lugar visível, o que gera um aumento nas emissões de CO₂ (CHEENKACHORN, 2009). Alguns pesquisadores relataram elevada porcentagem de emissão de CO₂ na mistura de diesel-biodiesel-etanol comparado com o diesel (SUBBAIAH, 2010; BARABÁS, 2010; SHI, 2006), embora alguns deles tenham encontrado emissão de CO₂ em

misturas ternárias quase semelhante ao diesel (**PENG, 2006**). Há também muitos investigadores que relataram diminuição da emissão de CO₂ (**GUARIEIRO, 2009; RANDAZZO, 2011**). **SUBBAIAH (2010)** assinalou um aumento na emissão de CO₂ de misturas ternárias, pois a parcela de etanol nas misturas aumenta, enquanto **HE (2013)** observou que, ao aumentar a proporção de etanol nas misturas, a emissão de CO₂ diminui. Este fenómeno pode ser explicado pela baixa relação carbono-hidrogênio da molécula de etanol. Novamente observa-se que o efeito do aumento do teor de etanol na blenda sobre os níveis de emissão de CO₂ não é consensual.

3.5.3. Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

De todos os gases emitidos por motores de ignição por compressão, os mais preocupantes são os óxidos de nitrogênio (NO_x). As emissões de escape contêm óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). A formação de NO_x depende fortemente da temperatura no interior do cilindro, da concentração de oxigênio, do tempo de inflamação para a reação acontecer e da razão de equivalência ar-combustível, alterações estas provocadas por variação na estequiometria, tornando a mistura pobre ou rica de combustível em função da vazão fornecida pela bomba, visto que a entrada de ar é constante, em motores diesel clássico (**CHALLEN, 1999**). Os fatores que podem influenciar a formação de NO_x são a densidade do combustível, o número de cetano, ou a composição aromática. A razão de equivalência de ar-combustível pode ser deslocada pelos combustíveis oxigenados para um nível de emissões de NO_x mais baixos, segundo Cheenkachorn e Fungtammasan (**2009**). Outra possibilidade para diminuir a emissão de NO_x a partir de etanol adicionado ao combustível pode ser o seu efeito de refrigeração da evaporação, o que conduz a uma reduzida temperatura da chama (**CHEENKACHORN, 2009**). Por outro lado, a diminuição do número de cetano, devido à adição de combustível oxigenado ao combustível fóssil, leva a um aumento do atraso da ignição o que resulta em emissões de NO_x mais elevadas (**CHALLEN, 1999**). Outra razão estudada para o aumento de emissões de NO_x a partir do biodiesel é o módulo de volume de compressibilidade mais elevado do biodiesel, que resulta em pequeno avanço na regulação do tempo de injeção (**SZYBIST, 2003**). O módulo volumétrico é um parâmetro que descreve a elasticidade volumétrica, ou seja, a tendência de um material em se deformar em todas as

direções quando uniformemente carregado em todas as direções (hidrostaticamente). Esse módulo é definido como a razão entre a tensão volumétrica e a deformação volumétrica, e é o inverso da compressibilidade **(WOLFGANG, 2013)**. Sugere-se que, retardando o tempo de injeção pode-se reduzir as emissões de NO_x. Assim, pode-se verificar que o efeito de misturas de biocombustível/misturas de combustível oxigenado na emissão de NO_x é complexo e não conclusivo. O fato é que, o resultado de emissões de NO_x é notado como variável por diferentes pesquisadores. Alguns deles relataram aumento de emissões de NO_x para a utilização de misturas de biocombustíveis **(SUBBAIAH, 2010; BARABÁS, 2010; CHEENKACHORN, 2009)**, enquanto outros relataram que elas sejam menores do que o combustível diesel **(AJAV, 1999; PARK, 2012)**. Assim, pode-se dizer que a emissão de NO_x pela queima de combustíveis oxigenados no motor diesel convencional não é conclusivo e depende do motor específico e suas condições de funcionamento.

3.6. Avaliação Estequiométrica das Reações de Combustão do Diesel, do Biodiesel e do Etanol

Como em qualquer processo de combustão, a reação exotérmica ocorre com o consumo do combustível rico em carbono e de oxigênio, tendo como produtos vapor de água e dióxido de carbono gasoso. Os volumes do comburente consumido e dos gases de combustão dependem da composição elementar de cada combustível. O etanol é uma substância pura comercializada na forma anidra ou hidratada **(ANP, 2006)**. Sua fórmula molecular é C₂H₆O e sua massa molar 46 g mol⁻¹. O diesel fóssil, por outro lado, é composto por uma mistura de hidrocarbonetos majoritariamente de cadeias lineares, com menores teores de ramificados e aromáticos. As cadeias apresentam de 14 a 22 carbonos, com maior incidência do octadecano, C₁₈H₃₈. Como a distribuição de massas é aproximadamente gaussiana ao redor do octadecano, sua massa molar pode ser tomada como a média ponderada representativa do todo **(BAI, 2018)**. O biodiesel, por fim, também é formado por misturas bastante mais simples que a do diesel fóssil e cuja composição depende da matéria-prima do qual se origina. O biodiesel metílico de soja é o mais utilizado no país, e é constituído por palmitato (11%), C₁₇H₃₄O₂, estearato (2%), C₁₉H₃₈O₂, oleato (26%), C₁₉H₃₆O₂, linoleato (56%),

$C_{19}H_{34}O_2$, e linolenato (5%), $C_{19}H_{32}O_2$. Baseado em sua composição, pode-se atribuir ao biodiesel a massa molar média 295 g mol^{-1} e a fórmula $C_{19}H_{35}O_2$ (BRAUN, 2017). Baseado nas fórmulas moleculares propostas, as equações químicas podem ser balanceadas e são apresentadas na Figura 5.32.

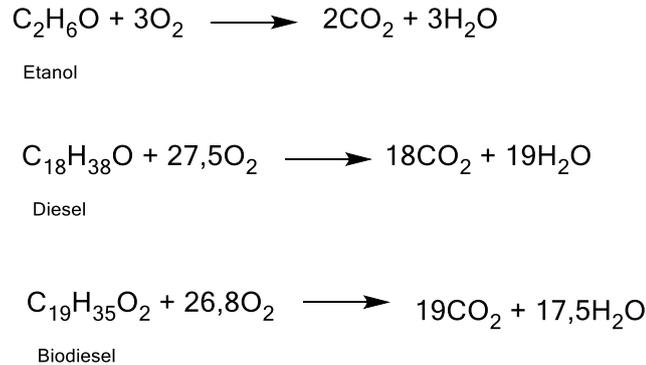


Figura 3.2. Equações de combustão do etanol (superior), diesel fóssil (intermediário) e biodiesel (inferior).

Os coeficientes das equações químicas permitem a estimativa dos volumes de O_2 consumido e de CO_2 e H_2O produzidos na combustão. A Tabela 3.1 apresenta as massas molares e as massas específicas do biodiesel metílico, etílico, diesel fóssil e etanol anidro e os volumes de gases calculados para a queima de 1 L do combustível.

Tabela 3.1. Massas molares (MM), massas específicas (d) do biodiesel metílico (BD Me), etílico (BD Et), diesel fóssil (DF) e etanol anidro (EtOH) e os volumes (V) de O_2 consumido, e de CO_2 e H_2O produzidos na queima de 1 L do combustível.

	$M_M \text{ (g mol}^{-1}\text{)}$	$d \text{ (g mL}^{-1}\text{)}$	$V O_2 \text{ (L)}$	$V CO_2 \text{ (L)}$	$V H_2O \text{ (L)}$
BD Me	295	0,87	1770	1255	1156
BD Et	309	0,87	1785	1261	1167
DS	254	0,83	2013	1318	1391
EtOH	46	0,789	1153	768	1153

Nas blendas estudadas, a contribuição de cada combustível nos volumes dos gases é proporcional à sua participação na composição da mistura. As Tabelas 3.2 e 3.3 apresentam as composições das blendas e os volumes de gases calculados para a queima de 1 L do combustível com biodieseis metílico e etílico,

respectivamente. Os volumes de gases em percentual são calculados usando o B8, diesel comercializado na época, como referência.

Tabela 3.2. Volumes (V) de diesel fóssil (DF), biodiesel metílico (BD Me) e etanol (EtOH) na composição das blendas e de O₂ consumido, e de CO₂ e H₂O produzidos na queima de 1 L do combustível.

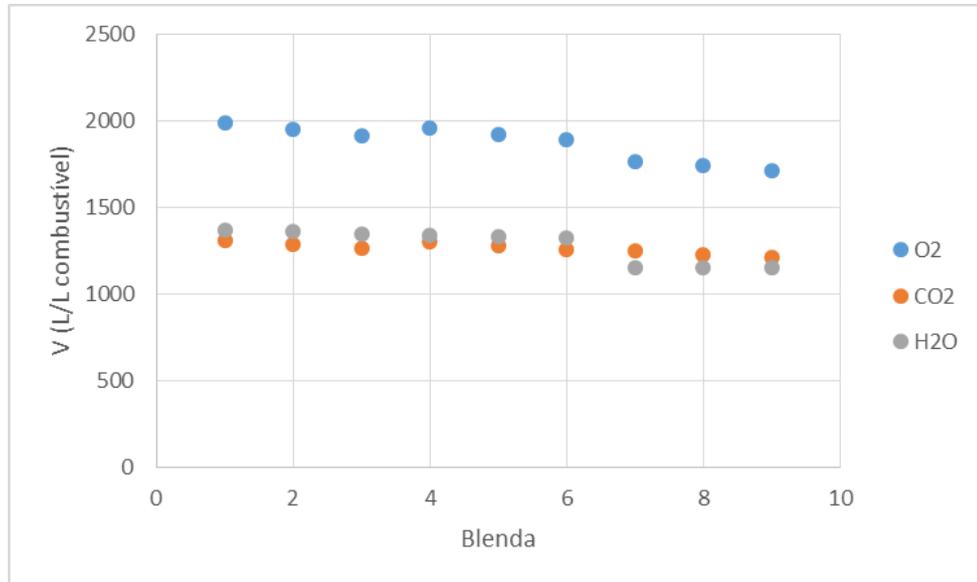
	V (%)			V (L)			V (%)		
	DF	BD Me	EtOH	O ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	CO ₂	H ₂ O
1	92,0	8,0	0,0	1994	1313	1372	100	100	100
2	87,6	7,6	4,8	1953	1287	1362	98	98	99
3	83,6	7,3	9,1	1917	1263	1352	96	96	99
4	80,0	20,0	0,0	1964	1305	1344	99	99	98
5	76,2	19,0	4,8	1926	1280	1335	97	97	97
6	72,7	18,2	9,1	1891	1256	1326	95	96	97
7	0,0	100,0	0,0	1770	1255	1156	89	96	84
8	0,0	95,2	4,8	1741	1232	1156	87	94	84
9	0,0	90,9	9,1	1714	1211	1156	86	92	84

Tabela 3.3. Volumes (V) de diesel fóssil (DF), biodiesel etílico (BD Et) e etanol (EtOH) na composição das blendas e de O₂ consumido, e de CO₂ e H₂O produzidos na queima de 1 L do combustível.

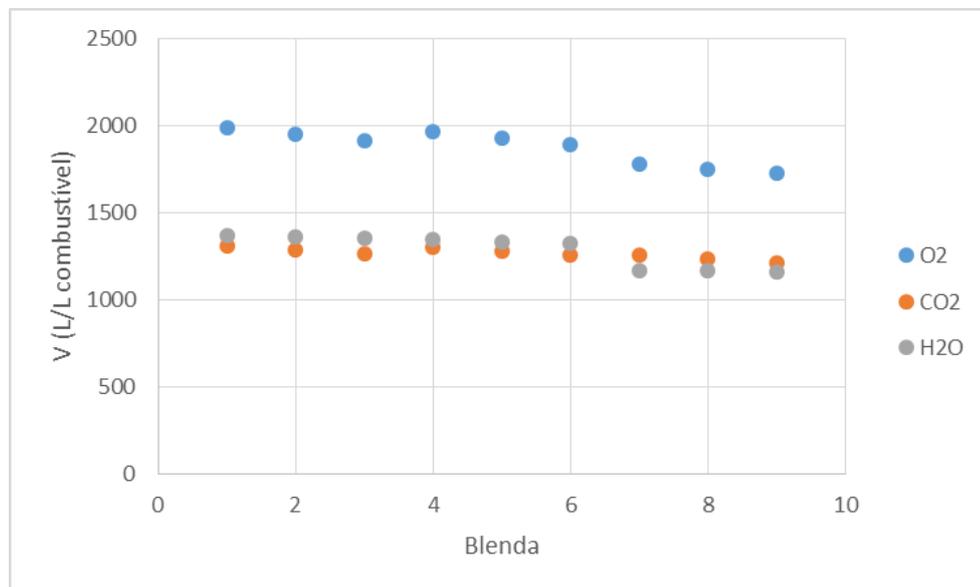
	V (%)			V (L)			V (%)		
	DF	BD Et	EtOH	O ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	CO ₂	H ₂ O
1	92,0	8,0	0,0	1995	1313	1373	100	100	100
2	87,6	7,6	4,8	1955	1287	1362	98	98	99
3	83,6	7,3	9,1	1918	1264	1353	96	96	99
4	80,0	20,0	0,0	1967	1306	1346	99	99	98
5	76,2	19,0	4,8	1929	1281	1337	97	98	97
6	72,7	18,2	9,1	1893	1257	1328	95	96	97
7	0,0	100,0	0,0	1785	1261	1167	89	96	85
8	0,0	95,2	4,8	1755	1238	1166	88	94	85
9	0,0	90,9	9,1	1727	1217	1165	87	93	85

À medida que o combustível comercial (blenda 1) é parcialmente substituído por biodiesel ou etanol, combustíveis oxigenados, há uma estimativa de diminuição de até 14% no consumo de O₂ e de até 8% na emissão de CO₂. Diferenças de

apenas 1% são esperadas quando o biodiesel metílico é substituído pelo etílico. Os dados das tabelas foram lançados em gráficos e são apresentados nas Figuras 3.3 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 3.3. (a) Variação dos volumes (V) de diesel fóssil (DF), biodiesel etílico (BD Et) e etanol (EtOH) na composição das blendas e de O₂ consumido, e de CO₂ e H₂O produzidos na queima de 1 L do combustível, (b) Variação dos volumes (V) de diesel fóssil (DF), biodiesel metílico (BD Me) e etanol (EtOH) na composição das blendas e de O₂ consumido, e de CO₂ e H₂O produzidos na queima de 1 L do combustível.

As discussões pertinentes recorreram a explicações em relação à mistura ar/combustível (A/F), para esclarecimento cabe salientar que os motores diesel trabalham com uma faixa ampla, de 20:1 até 50:1, sendo o limite inferior tratado como mistura rica e o superior como mistura pobre (**COSTA, 2017**). Cabe salientar que:

- Limite de mistura pobre: Trata-se de uma mistura com falta excessiva de combustível, de maneira que esta carência dificulte a propagação da chama na câmara de combustão. É uma situação indesejada para o motor. Durante o funcionamento, a chama é excessivamente lenta, e se mantém durante grande parte do ciclo de expansão, podendo se conservar até o início da admissão da mistura do próximo ciclo. Isso provoca o superaquecimento da câmara de combustão e pode acarretar em uma ignição da mistura admitida já no próximo processo de admissão (**BOSCH, 2005**).
- Limite de mistura rica: Trata-se de uma situação indesejada para o motor. Esta é a condição no qual o excesso de combustível dificulta a propagação da chama. Parte do combustível evapora sem a respectiva queima, resfriando a câmara de combustão, de maneira que ocorra a extinção da chama. Outra parcela do combustível pode condensar nas paredes do cilindro e diluir o óleo lubrificante do motor (**BOSCH, 2005**).

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Grupo Motor-Gerador

Os ensaios foram realizados nas dependências da empresa Autogeradora, localizada na Avenida das Indústrias 275, bairro São João, na cidade de Porto Alegre. A Figura 4.1 apresenta uma foto do grupo motor-gerador utilizado nos testes.



Figura 4.1. Grupo motor-gerador utilizado (Autogeradora).

Utilizou-se um grupo motor-gerador (GMG) da marca STEMAC, de 40 kVA de capacidade nominal, composto por um motor ciclo diesel tipo ignição por compressão, da marca MWM, modelo D3, com características técnicas apresentadas na Tabela 4.1, acoplado a um gerador síncrono G2R, quatro polos sem escovas, com especificações apresentadas na Tabela 4.2, utilizado comercialmente, na modalidade aluguel, de propriedade da empresa Autogeradora. O grupo motor-gerador foi escolhido devido ao volume do motor diesel, consumo e disponibilidade, sendo este destinado ao trabalho de início ao fim das medições e testes. O mesmo foi adaptado para o monitoramento das emissões da descarga (gases de exaustão e temperaturas), e o desempenho elétrico (potência efetiva) usando um banco de cargas resistivas, como mostrado na Figura 4.2.

Tabela 4.1. Características técnicas do motor diesel (fabricante MWM modelo 3.0).

Descrição	Modelo D229-3
Tipo de construção	Diesel – 4 tempos – em linha
Tipo de injeção	Direta
Diâmetro e curso	102 x 120 mm
Número de cilindros	3
Cilindrada total	2940 cm ³
Aspiração	Natural
Taxa de compressão	16,6 ; 1
Sistema de refrigeração	Líquida

Tabela 4.2. Características técnica do gerador (Cramaco G2R).

Tensão (V)	Corrente (A)	Frequência (hz)	Cos ϕ	Rotação (rpm)
220	97	60	0.8	1800
380	56	60	0.8	1800
440	49	60	0.8	1800



Figura 4.2. Banco de cargas resistivas para simular a demanda energética.

4.2. Combustíveis Analisados

Com base no referencial teórico e em estudos anteriores de misturas diesel-biodiesel (Paulo et al., 2016), optou-se por testar os combustíveis citados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Combustíveis e proporções das misturas ternárias.

Combustível	Composição
B8	92% diesel fóssil + 8% Biodiesel (S500, comercial, marca Petrobras)
B8E5	92% diesel fóssil + 8% Biodiesel + 5% (do volume total) Etanol
B8E10	92% diesel fóssil + 8% Biodiesel + 10% (do volume total) Etanol
B20m	80% diesel fóssil + 20% Biodiesel Metílico
B20mE5	80% diesel fóssil + 20% Biodiesel Metílico + 5% (do volume total) Etanol
B20mE10	80% diesel fóssil + 20% Biodiesel Metílico + 10% (do volume total) Etanol
B20e	80% diesel fóssil + 20% Biodiesel Etílico
B20eE5	80% diesel fóssil + 20% Biodiesel Etílico + 5% (do volume total) Etanol
B20eE10	80% diesel fóssil + 20% Biodiesel Etílico + 10% (do volume total) Etanol
B100m	100% Biodiesel Metílico
B100mE5	100% Biodiesel Metílico + 5% (do volume de biodiesel) Etanol
B100mE10	100% Biodiesel Metílico + 10% (do volume de biodiesel) Etanol
B100mE20	100% Biodiesel Metílico + 20% (do volume de biodiesel) Etanol
B100mE30	100% Biodiesel Metílico + 30% (do volume de biodiesel) Etanol
B100e	100% Biodiesel Etílico
B100eE5	100% Biodiesel Etílico + 5% (do volume de biodiesel) Etanol
B100eE10	100% Biodiesel Etílico + 10% (do volume de biodiesel) Etanol

As misturas dos combustíveis foram realizadas no LMCA (Laboratório de Motores e Combustíveis Alternativos da PUCRS), a temperatura ambiente, em embalagens poliméricas e agitadas manualmente por 3 min, método repetido para todas as combinações utilizadas neste trabalho. Segundo estudos realizados pela Fundação de Ciência (CIENTEC), existe miscibilidade completa, a temperatura ambiente (20°C), entre a mistura ternária diesel-biodiesel-etanol.

Foram utilizados dois tipos diferentes de biodiesel, ambos derivados de óleo de soja, mas obtidos por diferentes rotas de transesterificação, metílica e etílica, as quais diferenciam em relação ao tipo de álcool utilizado: metanol ou etanol.

Os experimentos foram realizados com biodiesel metílico obtido junto a Empresa BIANCHINI S/A, biodiesel etílico produzido em laboratório da CIENTEC, ambos de soja, com diesel comercial (Petrobras) e etanol combustível hidratado (Petrobras).

4.3. Metodologia dos Testes

A Figura 4.3 apresenta de forma resumida o método empregado na rotina de ensaios, realizados com tréplica para cada blenda ensaiada. As tréplicas foram feitas de forma sequencial, para um mesmo combustível, objetivando assim monitorar o grupo motor-gerador em condições idênticas de operação.

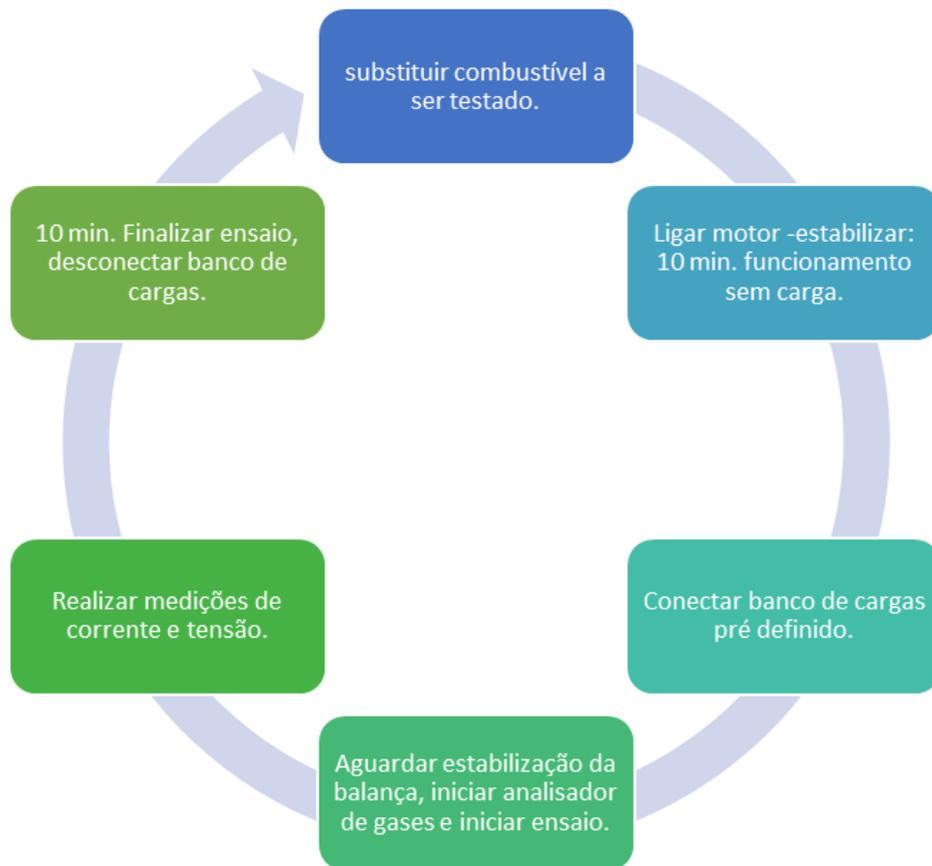


Figura 4.3. Fluxograma resumido das rotinas de ensaios no GMG.

Os testes consistiram em alimentar a bomba de combustível com a mistura a ser ensaiada, operar o grupo motor-gerador por um tempo de 10 min, coletar os dados de emissões dos gases de exaustão, avaliar a potência entregue pelo grupo motor-gerador, em função da demanda do banco de resistências, e o consumo específico de combustível, repetindo a rotina variando a carga e as misturas de combustíveis.

O consumo de combustível foi determinado pela variação de massa, monitorado por uma balança de precisão gravimétrica, mostrada na Figura 4.4, da marca Toledo, modelo 2098/38, capacidade máxima de 140,00 (+/- 0,02) kg, mínima

de 0,4 (+/- 0,02) kg, e para tal, substituiu-se o tanque de combustível do GMG por embalagens de polímero individuais, mostradas na Figura 4.5, para cada combustível, utilizando as mesmas diretamente sobre a balança, evitando contaminação entre amostras. Para determinação do consumo de combustível, os valores de volume foram calculados pela conversão dos valores de massa obtidos nos testes usando a massa específica para cada mistura de combustível.



Figura 4.4. Balança de precisão gravimétrica.



Figura 4.5. Embalagens individuais dos combustíveis.

O motor é operado em rotação constante de 1800 rpm. O desempenho elétrico do gerador foi obtido usando bancos resistivos trifásicos como carga de simulação de demanda elétrica. A carga elétrica aplicada foi de aproximadamente 40% e 80% da potência máxima do GMG (15.000 W e 30.000 W), devido ao GMG

ser de uso comercial, se encontrava com limitador de potência à 80% de sua capacidade nominal. A corrente elétrica e a diferença de potencial foram monitoradas para determinar a potência total e a potência em cada fase, diretamente no painel de controle do banco de cargas apresentado na Figura 4.6. Este dispositivo digital tem uma frequência de 1 Hz e funções como transformadores de corrente (TC) e transformadores de potenciais (TP), que analisam os parâmetros globais e os parâmetros separados por fases. O fator de potência é igualmente informado pelo painel de controle.



Figura 4.6. Painel de controle do banco de cargas.

As condições ambientais foram monitoradas por um termômetro e um barômetro. Antes de cada ensaio, o motor foi operado durante 20 min para estabilização, e os resultados foram coletados depois deste período durante 15 min, sendo este procedimento repetido por mais duas vezes. Após cada ensaio, o motor foi operado por 5 min com o novo combustível para limpar qualquer resíduo de combustível anterior restante no sistema de alimentação.

Para medições de emissões dos gases da combustão utilizou-se um analisador de gases da marca TESTO, modelo 350 (**Testo-350, 2014**), com sonda de medição montada na saída do abafador de ruídos dos gases do escapamento, conforme apresenta a Figura 4.7.



Figura 4.7. Posicionamento da sonda de medição dos gases de exaustão.

O analisador (Figura 4.8) é capaz de mensurar os seguintes gases: CO, CO₂, NO_x, O₂ e SO₂ pelo sistema infravermelho não dispersivo (NDIR) e sensores eletroquímicos, sendo as especificações apresentadas na Tabela 4.4.



Figura 4.8. Central de controle do analisador de gases.

De acordo com as especificações do equipamento, a sonda responsável pela aquisição dos gases emitidos deve ser posicionada na região central da tubulação por onde fluem os gases (escapamento), perpendicularmente ao fluxo. Os gases absorvidos pela sonda são enviados à central de controle do analisador responsável pelas análises quantitativas dos diferentes gases por uma mangueira específica, sendo os dados apresentados em tempo real e armazenados em um arquivo *.dat, que pode ser exportado para aplicativos de planilhas eletrônicas.

Tabela 4.4. Características técnicas do analisador de gases (Testo, 2013).

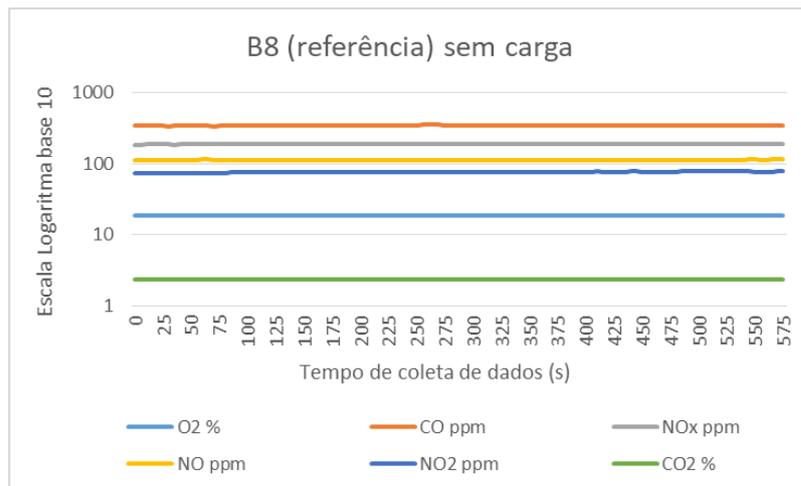
Parâmetro de medição	Faixa de medição	Resolução
O ₂	0...25 vol.%	0,01 vol.%
CO, H ₂ - comp.	0...10000 ppm	1 ppm
CO low, H ₂ -comp.	0...500 ppm	0,01 ppm
NO	0...4000 ppm	1 ppm
NO low	0...300 ppm	0,01 ppm
NO ₂	0...500 ppm	0,1 ppm
SO ₂	0...5000 ppm	1 ppm
CO ₂ -(IR)	0...50 vol.%	0,01 vol.% (0...25 vol.%) 0,1 vol.% (25 vol.%)
HC 1,2	Gás Natural 100...40000 ppm Propano:100...21000 ppm Butano: 100...18000 ppm	10 ppm 10ppm 10ppm
Pressão Diferencial 1	- 40...40 hPa	0,01 hPa
Pressão Diferencial 2	- 200...200 hPa	0,1 hPa
NTC (permanente)	- 20 a 50°C	0,1°C
Pressão Absoluta	600...1150 hPa	1 hPa
Velocidade do Fluxo	0...40 m/s	0,1 m/s
Tipo K (NiCr-Ni)	-200 a 1370°C	0,1°C

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

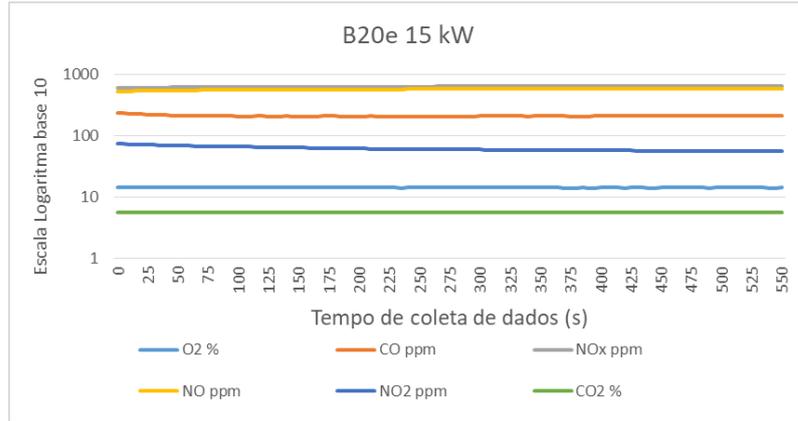
Para a apresentação dos resultados e discussões pertinentes, organizou-se este capítulo da seguinte forma: Análises dos gases de exaustão, análises das temperaturas dos gases de exaustão, e por fim, análises dos consumos de combustíveis.

5.1. Emissões dos Gases de Exaustão

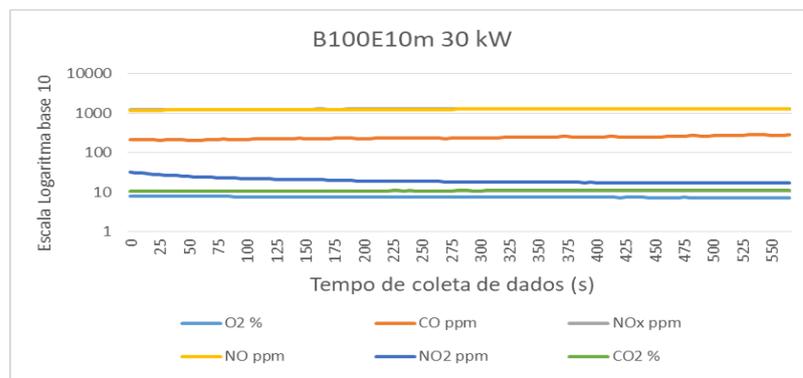
Inicialmente, é apresentada a forma global de como os dados foram obtidos em relação às emissões dos gases de exaustão, mostrando como exemplo o teste realizado com o B100 metílico com carga máxima de 30 kW. Em seguida será indicado as análises divididas por combustíveis base: B8, B20 e B100, e por fim, comparações entre os gases (Figura 5.1). A figura 5 apresenta as concentrações de O₂, CO, CO₂, NO, NO₂ e NO_x na mistura de gases do escapamento em função do tempo ao longo do ensaio. Pode-se observar que a composição não varia de forma significativa durante todo o ensaio e comprovam a constância das análises dos gases de exaustão, com um pequeno desvio padrão e boa confiabilidade dos resultados obtidos, comparando 3 blendas distintas e nas 3 situações de carga.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.1. (a) Emissões dos gases de exaustão para o B8 ao longo do tempo, sem carga; (b) B20e com carga de 15 kW, (c) B100E10m com carga de 30 kW.

De uma maneira geral, o grupo motor-gerador não apresentou variação de entrega de potência, mantendo-se estável e linear a demanda de 0 kW, 15 kW e 30 kW com fator de potência de 0,99 para todas as blindas ensaiadas. O GMC foi configurado para trabalhar com 60% da sua capacidade nominal de 55 kVA, por se tratar de um equipamento comercial utilizado para locação. Assim o motor diesel não estava operando com carga máxima, e as variações nas especificações das blindas, como número de cetano, viscosidade, poder calorífero e massa específica não apresentaram oscilação significativa notável neste regime de funcionamento nos testes.

5.2. Temperatura dos Gases de Exaustão

A importância em acompanhar a temperatura dos gases de escapamento está diretamente relacionada ao tempo de injeção da mistura. Se a temperatura for

elevada, indica um atraso na injeção, ou se for muito baixa, um adiamento. Em ambos casos, perde-se eficiência térmica pois gera-se uma força contrária a subida do embolo ou perde-se energia com o fim da combustão ocorrendo com o pistão em descida. As temperaturas típicas de escapamento em motores diesel são de 100°C a 200°C em marcha lenta, e entre 550°C e 800°C em plena carga (**BOSCH, 2005**).

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram que, durante os experimentos, a temperatura comportou-se de forma semelhante à descrita na literatura. Quando a blenda B20E10m foi usada como combustível no motor sem carga, entretanto, a temperatura ultrapassou 200°C, o que pode ser atribuído à menor velocidade de propagação da chama. Similar resultado foi observado para o B100E5m com carga de 15 kW, ficando acima da média. A inserção de EHC teve reflexos variados e inconclusivos. Algumas misturas apresentaram queda na temperatura, como em B20E10e e B100E5m, mas outras chegaram a elevar a temperatura como em B20E10m, B8E10, B100E10m e B100E10e (Figura 5.3).

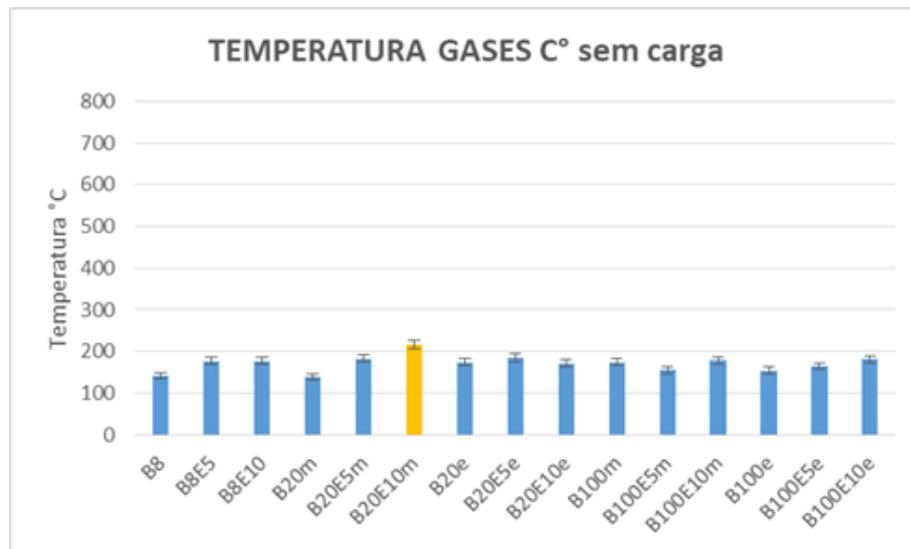


Figura 5.2. Temperatura dos gases de exaustão, sem carga.

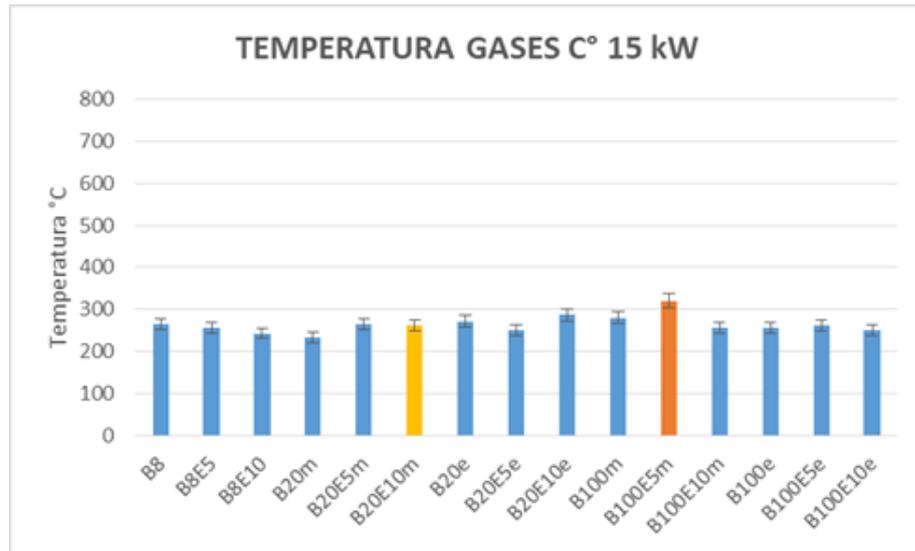


Figura 5.3. Temperatura dos gases de exaustão, carga 15 kW.

Analisando a Figura 5.4, com carga plena de 30 kW, percebe-se que as blendas com picos de temperatura nas condições anteriores, sem carga e com carga de 15 kW, seguem sendo as mais altas nas suas blendas B20m e B100m. Em termos de eficiência térmica, destaca-se o B20m e B20e pois uma vez que não houve queda de performance do GMC, todas as blendas entregaram ,30 kW, estas assinalaram as menores temperaturas de trabalho, estando abaixo do padrão para este tipo de motor (**BOSCH, 2005**) e abaixo do diesel referência, o B8 comercial S500 Petrobrás. Todas as demais blendas mantiveram-se dentro dos valores padrão.

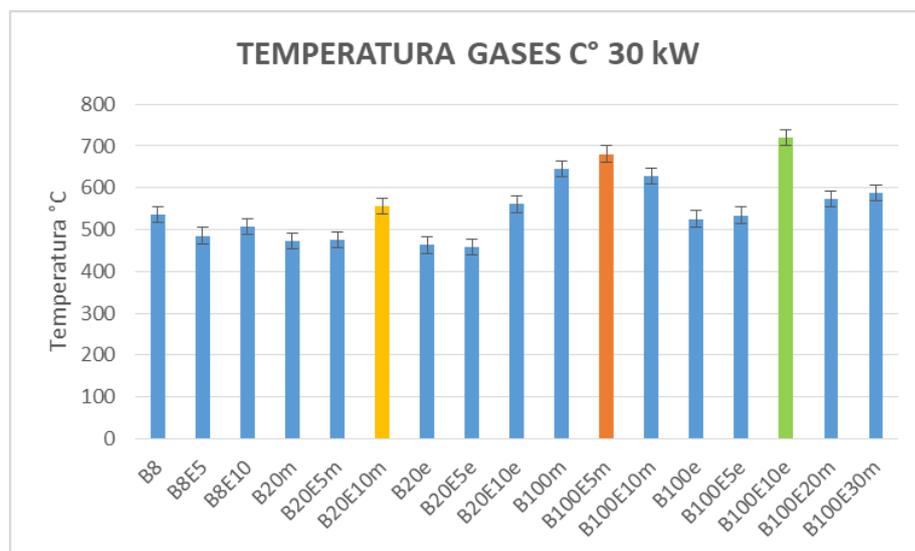


Figura 5.4. Temperatura dos gases de exaustão, carga 30 kW.

5.1.1. Análise da Blenda B8

A composição da mistura de exaustão na queima do combustível B8 está de acordo com dados da literatura **ROCHA (2014)**. Ao acrescentar 5% (E5) e 10% (E10) de EHC ao B8 não se percebeu variação significativa para os valores médios de CO₂ e NO_x em todos os regimes de carga, conforme apresentado nas Figuras 5.5 a 5.7, estando as variações dentro da margem de erro dos equipamentos e do desvio padrão.

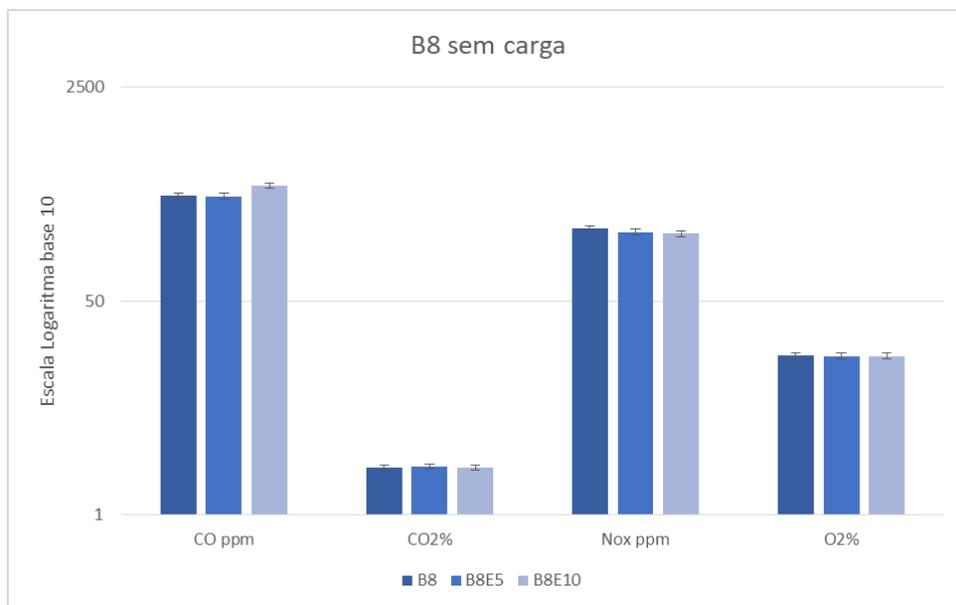


Figura 5.5. Emissões médias dos gases de exaustão para o B8, sem carga.

Quando operando sem carga (0 kW), Figura 5.5, o CO apresentou um pequeno acréscimo de 48 ppm comparando o B8 com o B8E10. O que pode ser justificado pela redução do número de cetano gerado pela introdução de 10% de etanol, baixando a temperatura da câmara de combustão e a qualidade da inflamação da mistura ternária. Deixando combustível sem queimar na câmara de compressão, resultado este comprovado por uma pequena redução nas emissões de NO_x, na faixa de 18 ppm.

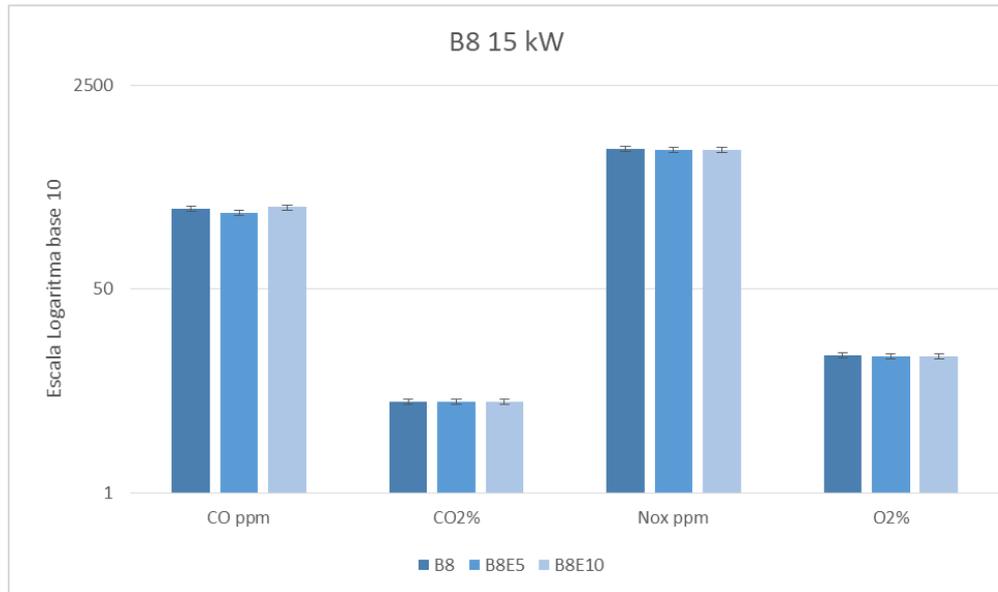


Figura 5.6. Emissões médias dos gases de exaustão para o B8, carga 15 kW.

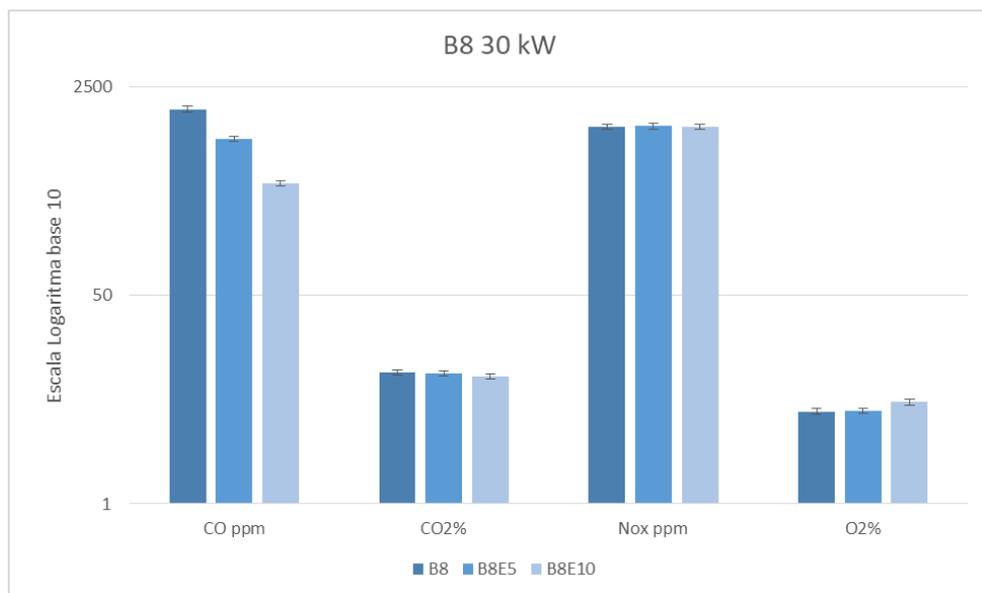


Figura 5.7. Emissões médias dos gases de exaustão para o B8, carga 30 kW.

Com o motor a plena carga (30 kW) de demanda, Figura 5.7, e com a adição de 10% de EHC, observa-se uma redução de CO em torno de 75%, resultado de uma combustão pobre em combustível. A reduzida, quase linearmente, nas emissões de CO observada de B8 a B8E10, deve-se ao desvio da relação ar/combustível, consequência das características oxigenadas do etanol. Variações significativa na concentração dos demais gases não foram observadas.

5.1.2. Análise da Blenda B20

Blendas B20 foram preparadas por adição de biodieseis metílico (B20m) e etílico (B20e). Além destas, novas blendas foram preparadas por adição etanol em volumes correspondentes a 5 e 10 % com relação à mistura inicial. Para o B20 tem-se duas variações significativas nas misturas analisadas. Observou-se oscilações quase nulas para os gases CO_2 e O_2 nas condições sem carga 0 kW e carga intermediária 15 kW, assim como na alternância das misturas binárias e ternárias para B20 (Figuras 5.8 a 5.10). Pode-se dizer que os resultados eram esperados devido à pouca variação, em massa, da quantidade de carbono e oxigênio encontrada na formulação das blendas.

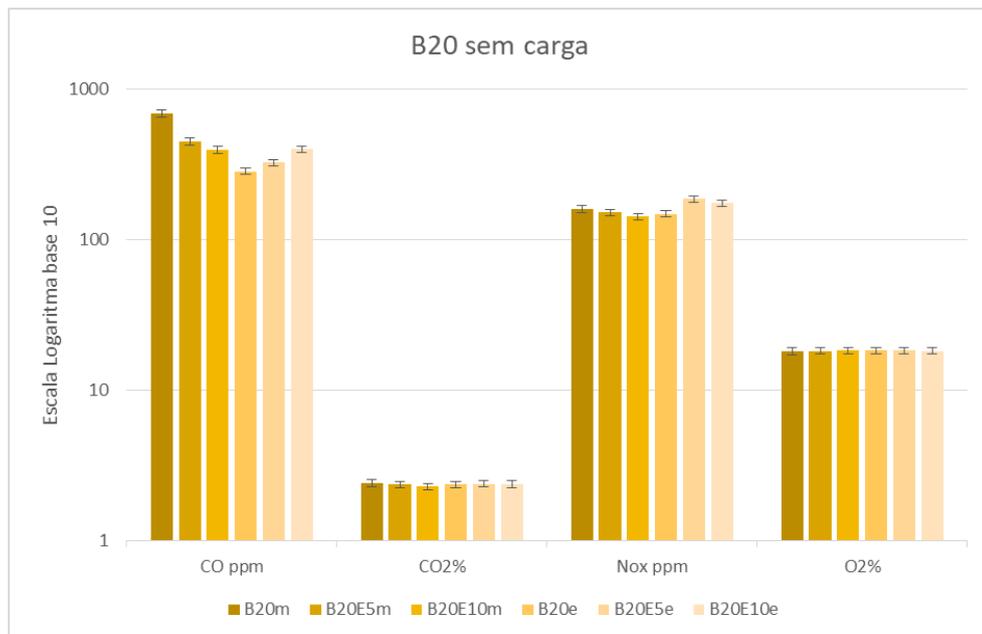


Figura 5.8. Emissões médias dos gases de exaustão para o B20, sem carga.

Quando se analisam as emissões de CO, nota-se uma redução para o B20m ao se adicionar EHC, nas três condições de carga, evidenciando o empobrecimento de combustível como consequência da adição de etanol. Contudo, para o B20e o comportamento foi oposto quando operando sem carga e com 15 kW de demanda, apresentando um leve aumento de CO com a adição de etanol (Figuras 5.9 e 5.10). Entretanto, a plena carga de 30 kW demandada, B20e e B20m apresentam a mesma lógica de excesso de oxigênio e queda de CO com a elevação da proporção de etanol na mistura ternária.

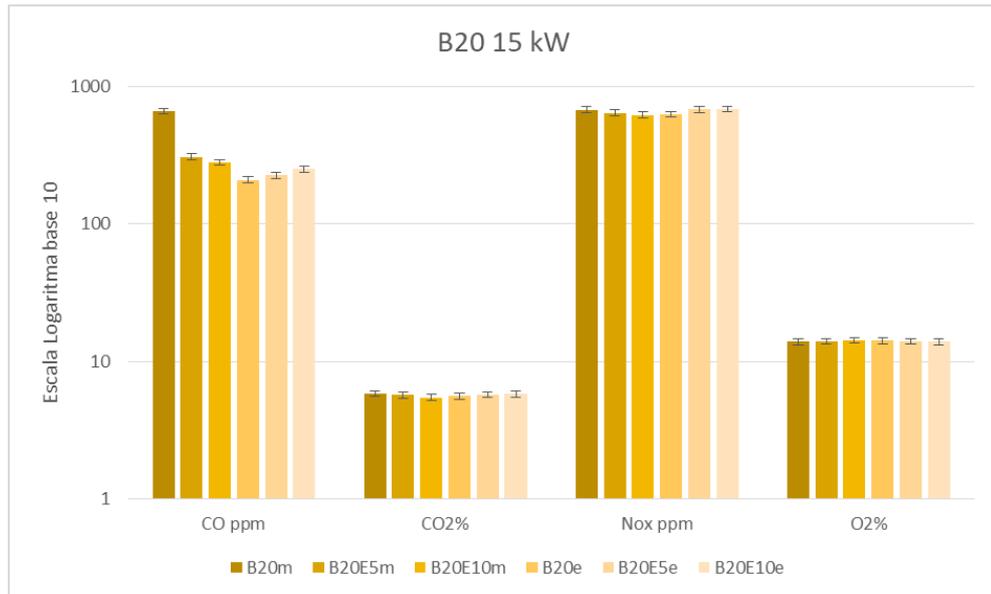


Figura 5.9. Emissões médias dos gases de exaustão para o B20, carga 15 kW.

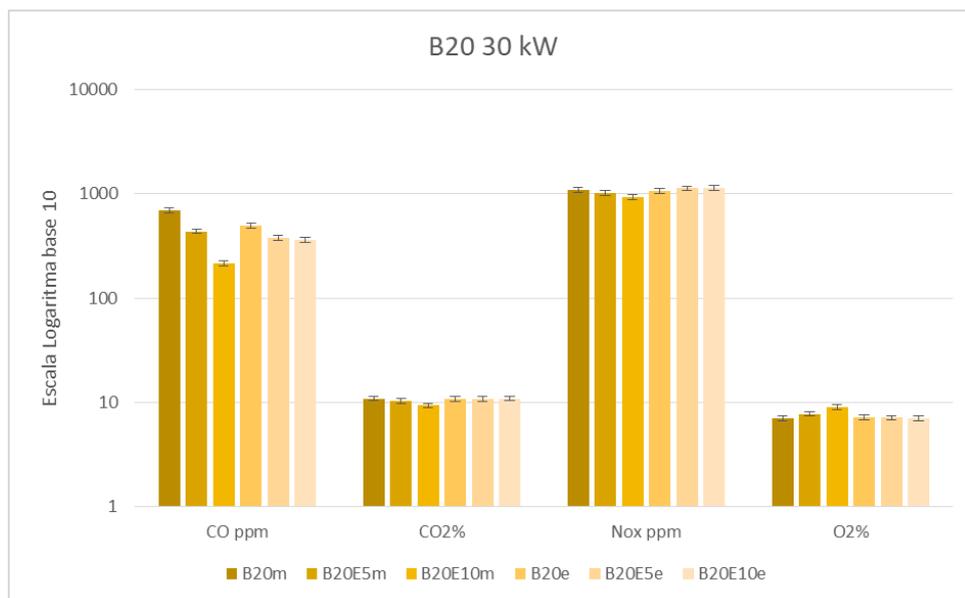


Figura 5.10. Emissões médias dos gases de exaustão para o B20, carga 30 kW.

Para os gases CO_2 , NO_x e O_2 , as variações observadas em todas as condições de carga e diferentes misturas foram mínimas, demonstrando um comportamento bastante similar nas condições analisadas.

5.1.3. Análise da Blenda B100

Biodieseis de soja metílico e etílico na ausência de diesel fóssil (B100) foram ensaiados. O primeiro é o mais usado comercialmente, mas faz uso de MeOH

obtido a partir de fontes fósseis na sua produção. O segundo usa bioetanol e, portanto, ao contrário do primeiro, é totalmente obtido de fontes renováveis. Ambos não apresentaram diferenças significativas nas emissões de CO, CO₂, NO_x e O₂, (Figuras 5.11 a 5.13), sendo que as variações seguem dentro do desvio padrão, e apresentando a mesma tendência relatada na literatura (**SUBBAIAH, 2010; BARABÁS, 2010; SHI, 2006**)

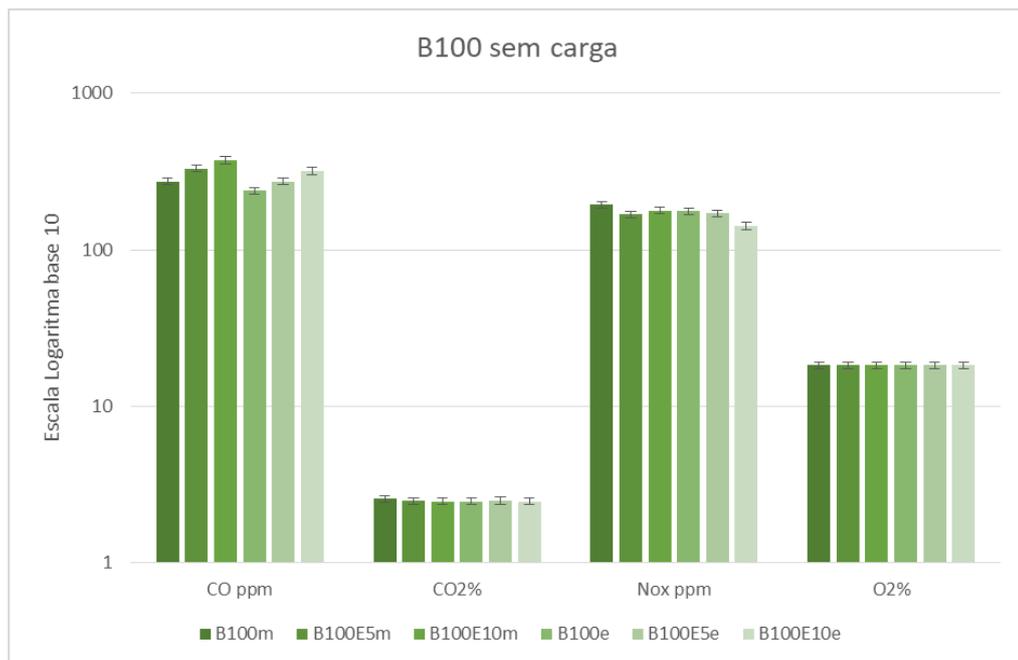


Figura 5.11. Emissões médias dos gases de exaustão para o B100, sem carga.

Com a inserção de EHC nas blendas de B100e e B100m, observa-se um aumento progressivo nas emissões de CO nas condições sem carga e com demanda de 15 kW, conforme visto nas Figuras 5.11 e 5.12, com valores aproximados de 50 ppm de CO para cada 5% de etanol acrescido ao volume de B100e e B100m. Não houve queda de demanda em 15 kW, dados contrários aos estudos anteriores que atribuem uma redução de CO com a adição de etanol e biodiesel (**LI, 2005; SUBBAIAH, 2010; CAN, 2004**). A combustão incompleta apontada pelo aumento da concentração do CO, da mesma forma que a diminuição da concentração de NO_x, é atribuída à redução da temperatura na câmara de combustão.

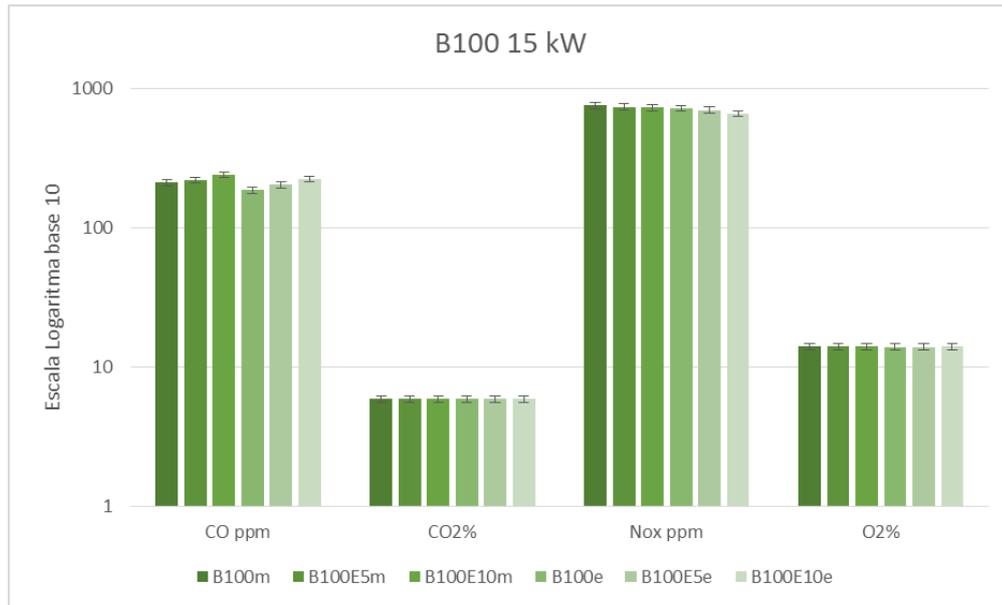


Figura 5.12. Emissões médias dos gases de exaustão para o B100, carga 15 kW.

Quando se detém na análise a plena carga 30 kW (Figura 5.13), mais uma vez não foi notada variação nas emissões provocadas em função da classe do biodiesel, etílico ou metílico. Referente ao acréscimo de EHC (B100E20m e B100E30m), percebe-se uma queda acentuada de CO, demonstrando uma melhora na qualidade da combustão e um aumento na velocidade de propagação da frente de chama, traduzido em uma estabilidade ou pequena queda nas emissões de NO_x (SUBBAIAH, 2010), tendência essa percebida nas misturas com 20% e 30 % de etanol (B100E20m e B100E30m). O objetivo foi verificar se com a maior concentração de EHC, o motor conseguiria operar sem apresentar problemas ou dificuldades, o que de fato foi constatado. Também se nota um leve aumento nas emissões de O₂, corroborando a hipótese de uma queima homogênea com estequiometria pobre de combustível, mantendo-se constantes as emissões de CO₂ em todas as blendas e misturas binárias biodiesel-etanol.



Figura 5.13. Emissões médias dos gases de exaustão para o B100, carga 30 kW.

5.1.4. Comparativo por Gases, CO

Ao se comparar todas as blendas ensaiadas e separadas por tipo de gás, pode-se notar que o B20m (metílico), na condição sem carga e com carga de 15 kW (Figuras 5.14 e 5.15), apresentou um aumento de aproximadamente 240 ppm em relação a todos os outros combustíveis, que mostra um comportamento decrescente linear de variação de CO em todas as blendas que tiveram adição de EHC. Este comportamento pode ser explicado pelo baixo aquecimento na câmara de combustão e o alto calor latente do etanol. E isso resulta em baixa temperatura de combustão e velocidade de propagação da frente da queima, que acarreta na sua combustão incompleta e no aumento da concentração de CO (BARROS, 2013).

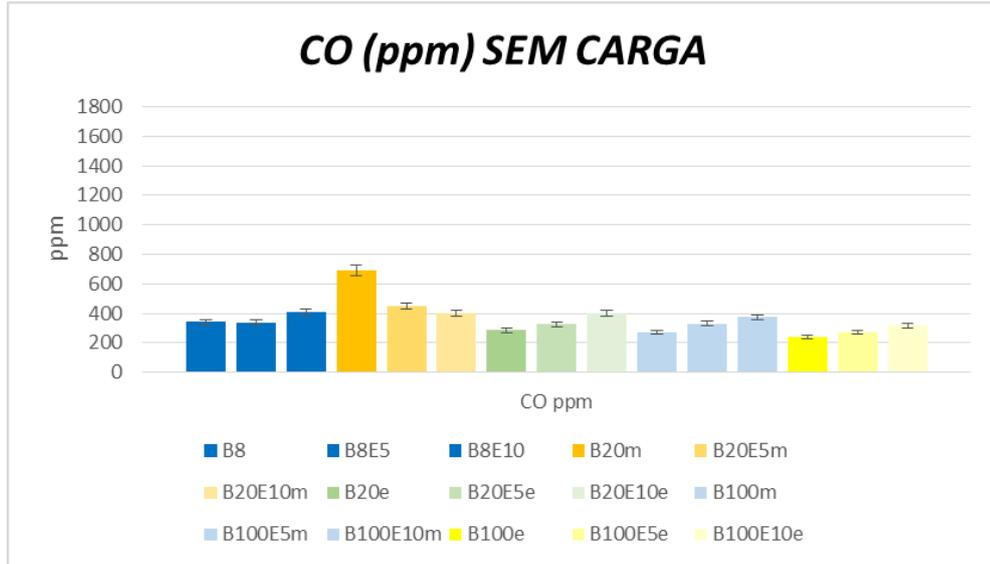


Figura 5.14. Comparativo das emissões de CO para todas as blendas, sem carga.

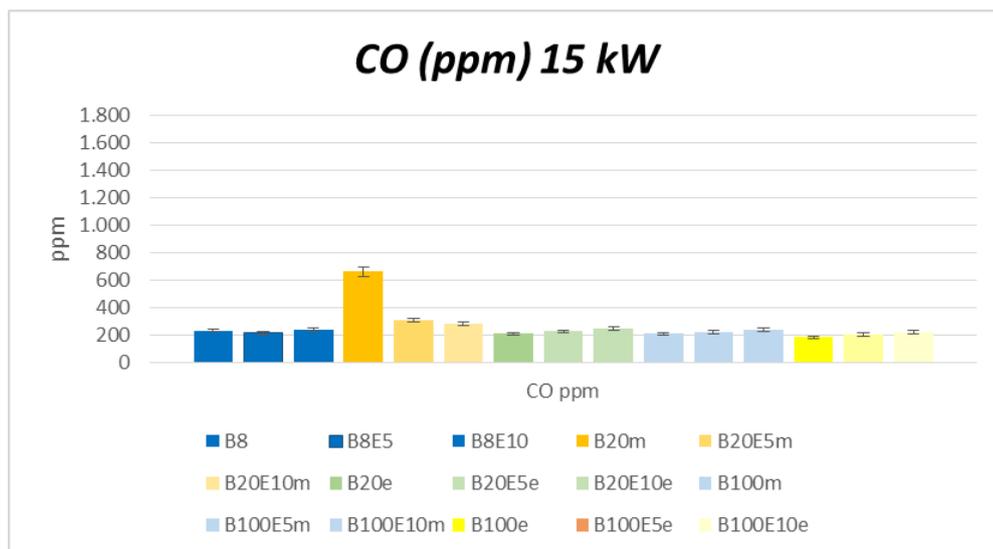


Figura 5.15. Comparativo das emissões de CO para todas as blendas, carga 15 kW.

A Figura 5.16 apresenta o motor a plena carga, 30 kW, e os resultados seguem a extensa maioria dos casos apresentados na literatura (LI, 2005; SUBBAIAH, 2010; CAN, 2004; ROCHA, 2014), relatando um decréscimo nas emissões de CO com o aumento no teor de biodiesel, seguido de uma nova queda com o acréscimo de etanol, notado nas blendas com E5 e E10. À medida que a proporção destes dois biocombustíveis é aumentada nas misturas, há um incremento do teor de oxigênio, o que leva a uma inflamação completa e a uma redução no teor de CO emitido (LI, 2005; SUBBAIAH, 2010; CAN, 2004).

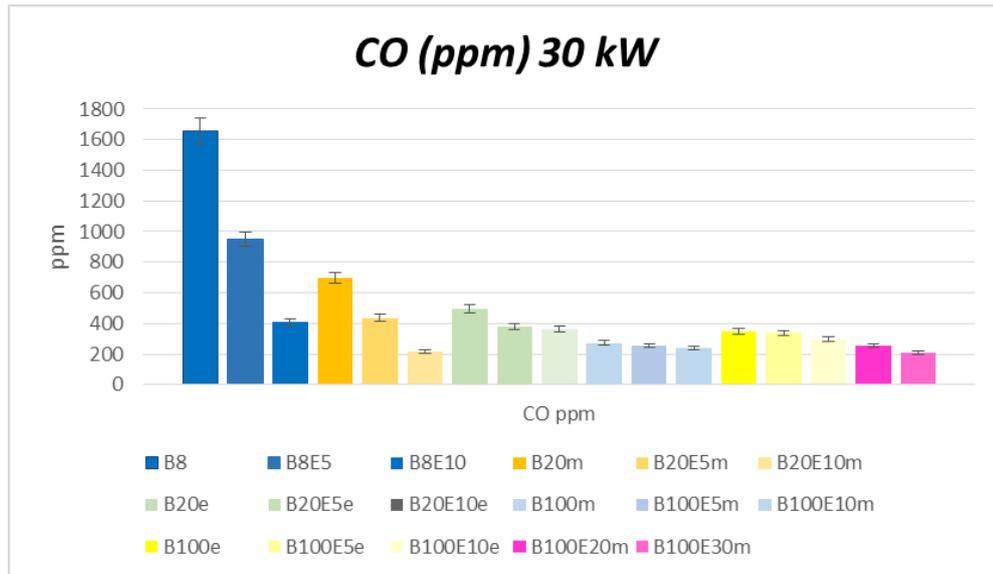


Figura 5.16. Comparativo das emissões de CO para todas as blendas, carga 30 kW.

5.1.5. Comparativo por Gases, CO₂

Referente às emissões de CO₂, percebe-se um padrão uniforme, e dentro das margens de erro, resultados que se repete tanto na condição sem carga, como com carga de 15 kW (Figuras 5.17 a 5.19). O crescimento em função do aumento da carga se deu em todos os combustíveis e variantes.

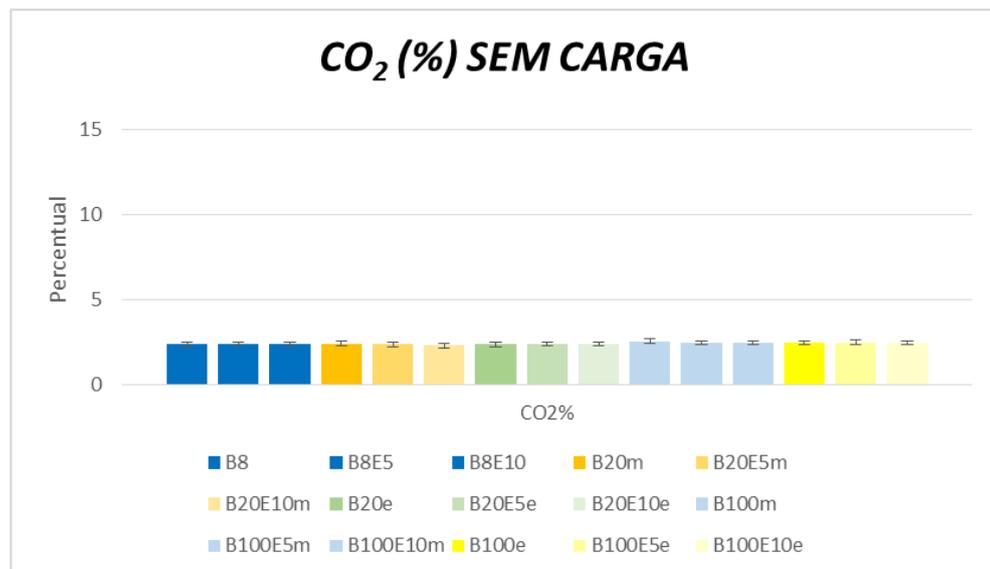


Figura 5.17. Comparativo das emissões de CO₂ para todas as blendas, sem carga.

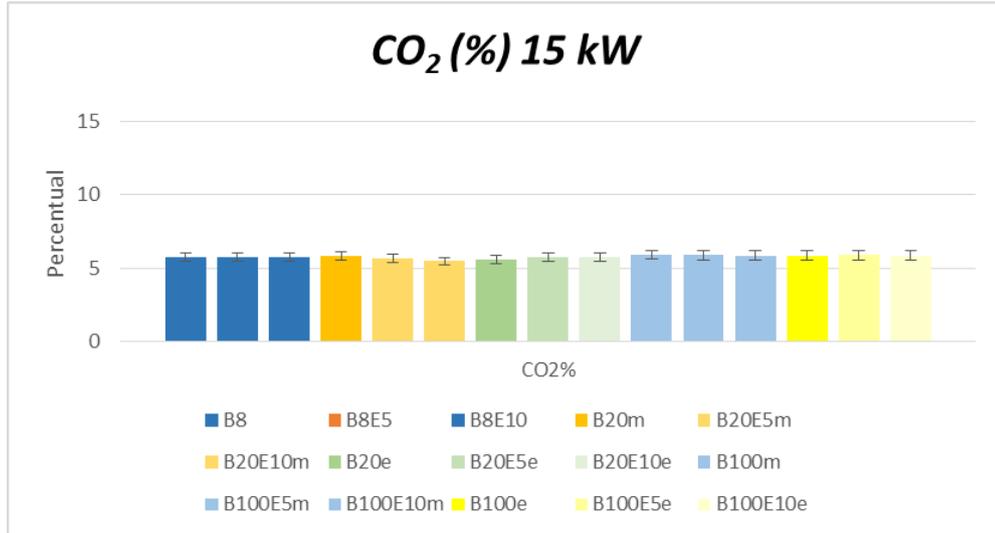


Figura 5.18. Comparativo das emissões de CO₂ para todas as blendas, carga 15 kW.

Em meio a estabilidade nas emissões, o B20E10m com adição de 10% de EHC se destaca com o menor percentual de emissão de CO₂ dentre as blendas testadas, uma redução de 20,4% se comparado ao B8 comercial. Este fenômeno pode ser explicado pela presença de carbonos parcialmente oxidados no biodiesel e, em particular, no etanol.

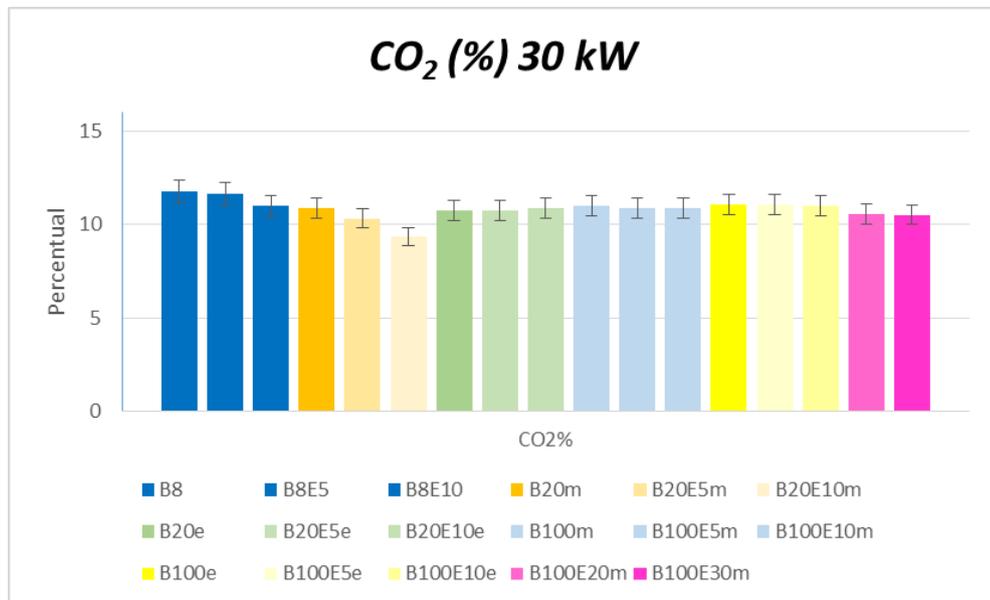


Figura 5.19. Comparativo das emissões de CO₂ para todas as blendas, carga 30 kW.

5.1.6. Comparativo por Gases, Hidrocarbonetos

Ao se analisar o diesel comercial B8 e suas variantes com 5% (B8E5) e 10% (B8E10) de etanol, assim como o B20e (etílico), o analisador de gases apresentou saturação da célula de hidrocarbonetos, e entregou valores dispares e incoerentes.

Hidrocarbonetos não consumidos na combustão do diesel apresentam-se, normalmente, em altas concentrações na mistura gasosa de emissão. Com a substituição parcial do diesel fóssil por biodiesel ou etanol, a expectativa é de que a concentração de HC diminua. De fato, nas amostras B8 ou B8 com adição de EHC (B8E5 e B8E10), a concentração de HC excedeu o limite de medição do analisador de gases e os valores não puderam ser registrados. Os resultados obtidos na queima das demais blendas são apresentados na Figura 5.20 e são coerentes com a literatura **BARROS (2013)**. A redução de HC ocasionada pela incorporação do etanol a mistura binária diesel-biodiesel, onde o B20E5e apresentou uma redução de mais de 60% quando comparado ao B20m sem etanol. Segundo **BARROS (2013)**, a emissão de hidrocarbonetos não queimados é consequência de uma combustão incompleta, o que resulta a partir de efeitos heterogêneos na mistura e na vizinhança com as paredes do cilindro, que se encontram a uma temperatura muito baixa. Sendo assim, a introdução de EHC auxiliou na formulação de uma mistura ternária homogênea e com um aumento no calor latente de pré-ignição do diesel, mantendo uma boa temperatura na câmara. Normalmente, o H_xC_y não queimado apresenta uma alta concentração de metano (CH_4), o que resulta em um gás com grande capacidade de armazenar calor e de enorme contribuição para o efeito estufa.

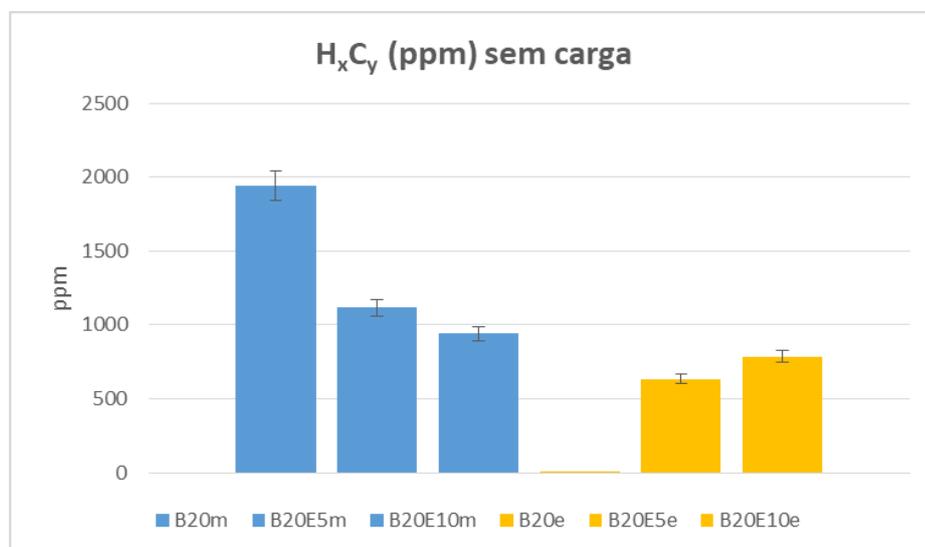


Figura 5.20. Comparativo das emissões de H_xC_y para o B20, sem carga.

Nas Figuras 5.21 e 5.22, o GMC encontra-se com meia carga e com plena carga, e percebe-se que segue a mesma tendência de redução de hidrocarbonetos, mas com uma redução mais acentuada para o B20. Também se nota que para este tipo de motor, as blendas com adição de etanol hidratado combustível se mostraram mais acertadas em termos de emissão de hidrocarbonetos. As misturas com EHC foram estáveis em qualquer regime de carga.

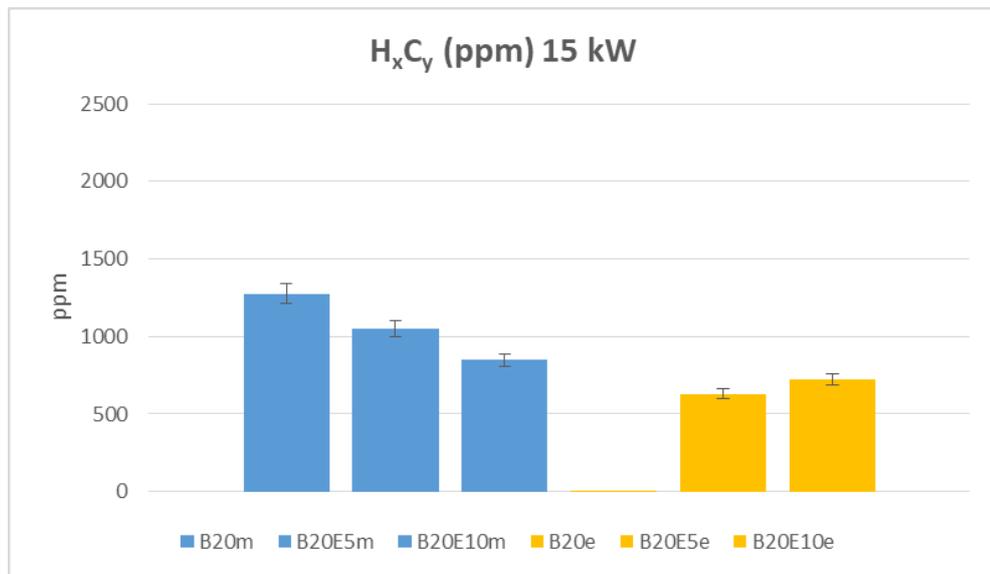


Figura 5.21. Comparativo das emissões de H_xC_y para o B20, carga 15 kW.

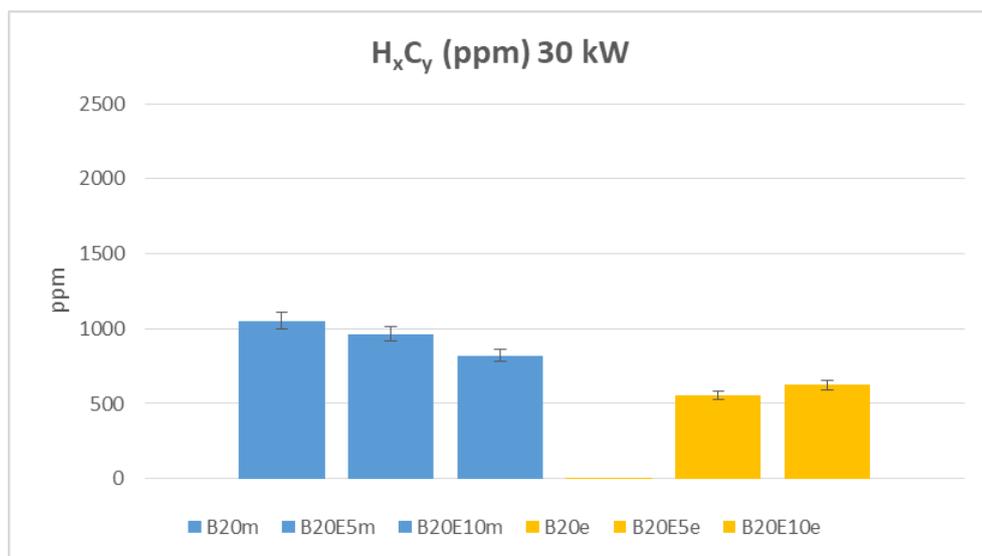


Figura 5.22. Comparativo das emissões de H_xC_y para o B20, carga 30 kW.

Nas Figuras 5.23 a 5.25 pode ser observada uma redução drástica nos hidrocarbonetos emitidos, para todas situações de carga. Os valores deveriam ser de zero emissões devido à ausência de H_xC_y no biodiesel e no etanol. Contudo, os valores são muito baixos e se devem a contaminação no sistema de escape e a queima de uma pequena quantidade de óleo lubrificante que permanece na câmara de compressão, no instante em que o embolo se desloca do ponto morto inferior ao ponto morto superior do cilindro.

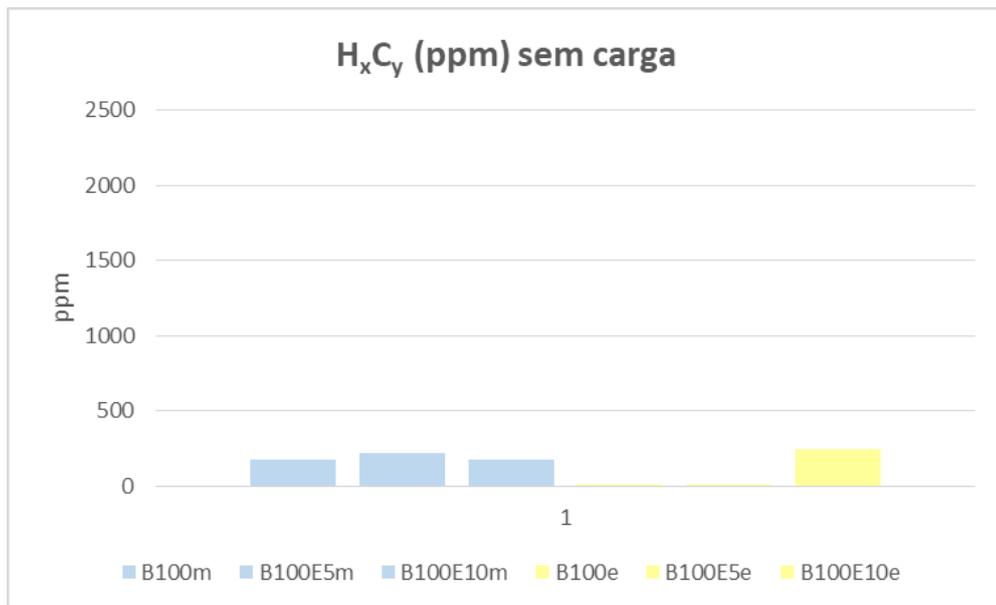


Figura 5.23. Comparativo das emissões de H_xC_y para o B100, sem carga.

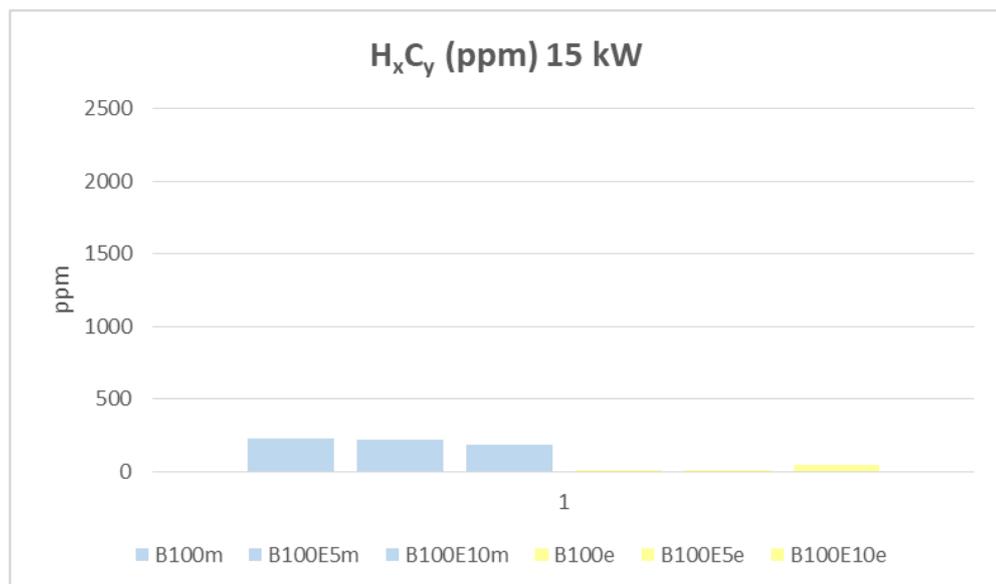


Figura 5.24. Comparativo das emissões de H_xC_y para B100, carga 15 kW.

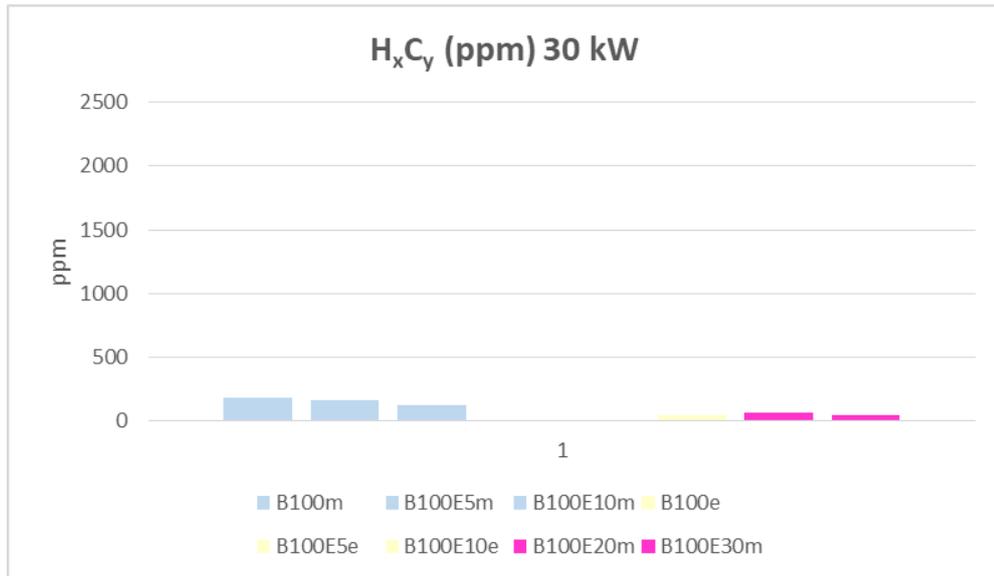


Figura 5.25. Comparativo das emissões de HxCy para o B100, carga 30 kW.

5.1.7. Comparativo por Gases, O₂

Em termos de liberação de oxigênio, observa-se uma redução conforme aumenta-se a carga demandada, resultado esperado com base no balanço estequiométrico e tabelas de **BOSCH (2005)**, um comportamento estável nas condições sem carga e com carga de 15 kW (Figuras 5.26 e 5.27).

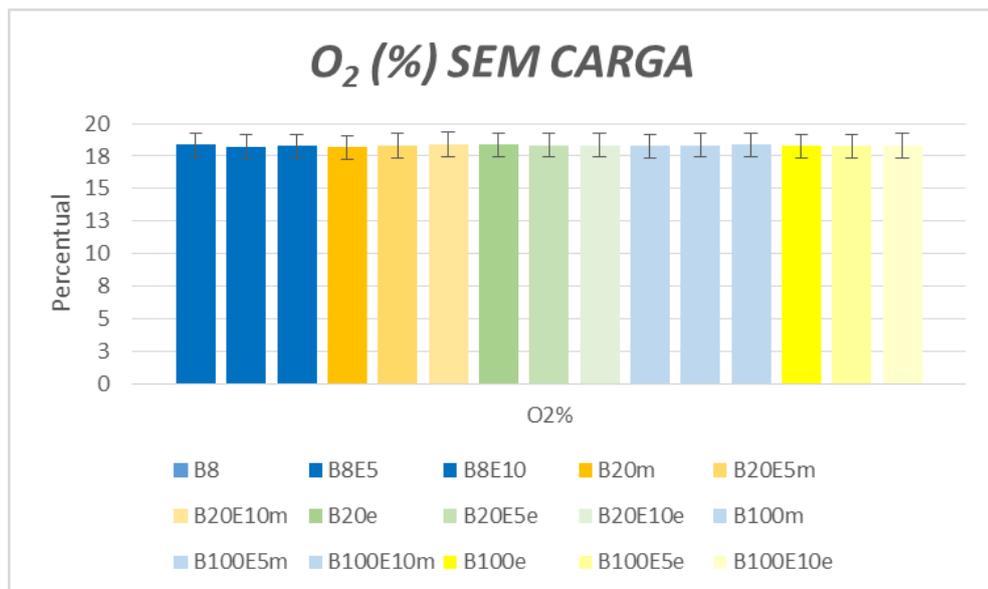


Figura 5.26. Comparativo das emissões de O₂, sem carga.

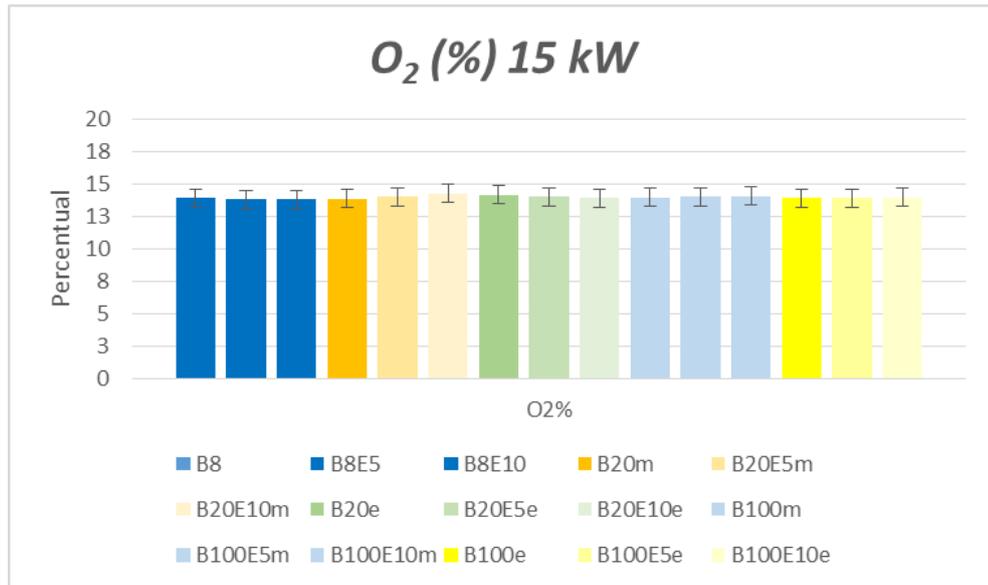


Figura 5.27. Comparativo das emissões de O₂, carga 15 kW.

Na Figura 5.28, com carga plena de 30 kW, verifica-se uma redução geral no percentual de O₂ emitido e, em comparação com as demais blendas, um aumento para B8 e B20m que representa um excesso de ar na estequiometria, oxigênio liberado pelo escapamento sem reagir com o combustível, podendo ser atmosférico, para altos teores de diesel, qualquer adição do combustível oxigenado parece provocar uma diminuição no oxigênio consumido, que não colabora com a inflamação e oxidação do diesel devido ao seu baixo NC e ao alto calor latente (BARROS, 2013). Este excesso de oxigênio visto em B8 e B20, confere com a redução de CO em plena carga, justificando ambos resultados.

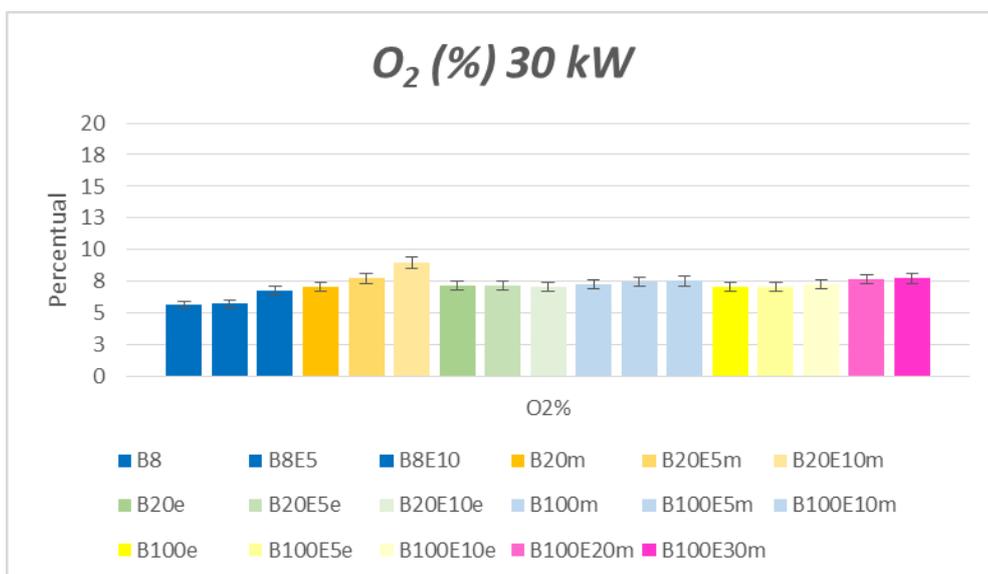
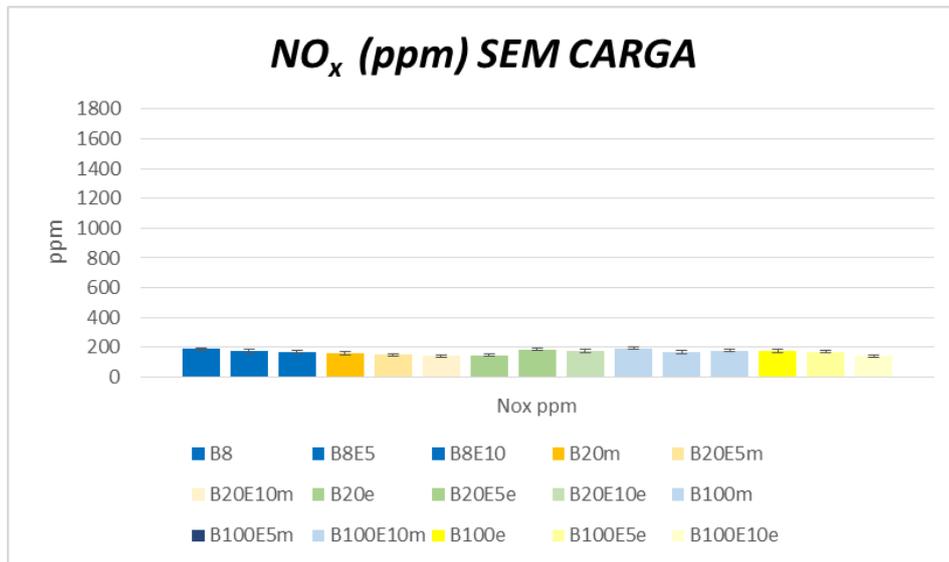


Figura 5.28. Comparativo das emissões de O₂, carga 30 kW.

5.1.8. Comparativo de Gases, NO_x

Conforme os dados apresentados na Figura 5.29 (a) e (b), o aumento da demanda gera um aumento nas emissões de NO_x, provocado pela elevação da quantidade de combustível e, conseqüentemente um aumento na temperatura da câmara de combustão (CHALLEN, 1999). Nas condições sem carga e solicitação de 15 kW, as variações nas blendas não provocaram oscilações significativas nas emissões de óxidos de nitrogênio, apresentando valores próximos ao diesel comercial.



(a)

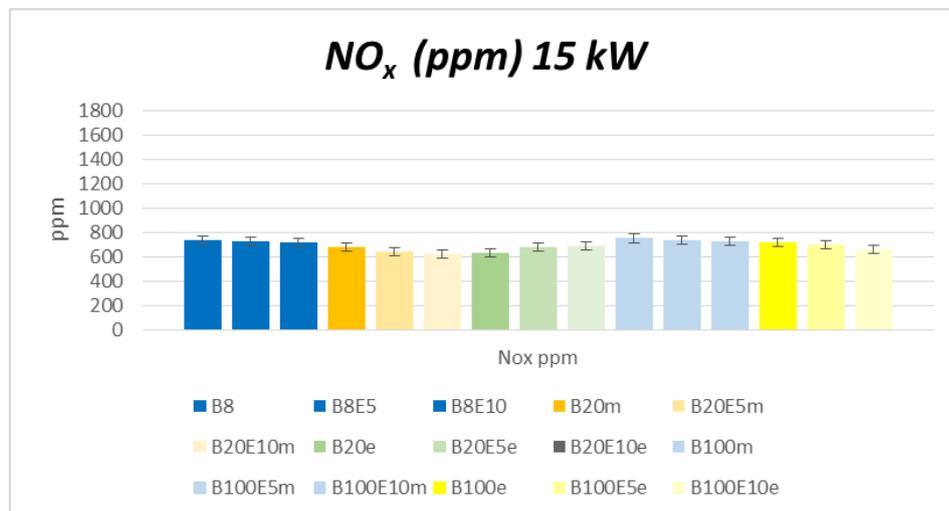


Figura 5.29. (a) Comparativo das emissões de NO_x, sem carga, (b) Comparativo das emissões de NO_x, carga 15 kW.

Com o GMC sendo exigido à 30 kW, notasse as características de cada mistura (Figura 5.30), destaque para B20E10m com a menor emissão de NO_x dentre todas blendas. Esta redução se deve à uma velocidade de frente de chama alta e ao oxigênio contido no EHC que pré-oxida a mistura ar-combustível, somado ao baixo número de cetano (**BARROS, 2013**). Em contrapartida, o biodiesel puro B100m apresenta os maiores valores, adequado ao maior NC que provoca uma redução na velocidade da queima da mistura ar-combustível, expondo os gases a temperaturas altas e por um tempo prolongado, condições ideais para formação de dióxido de nitrogênio. A situação é invertida com a adição de EHC nas misturas, a qual provoca uma redução no NC do combustível, e, conseqüentemente, maiores velocidades de chama a valores abaixo do diesel comercial (**ROCHA, 2014**).

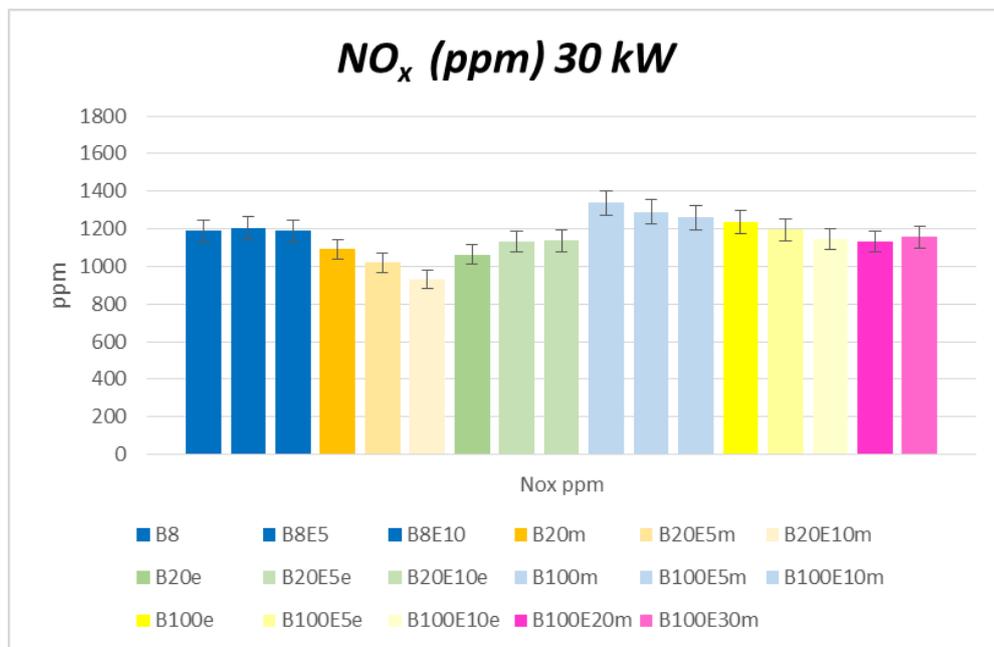


Figura 5.30. Comparativo das emissões de NO_x, carga 30 kW.

5.3. Consumo de Combustível

O consumo de combustível tem uma relação direta com a carga que o motor diesel do GMC é submetido. A Tabela 5.1 apresenta os consumos por blenda, e deixa clara uma tendência próxima a triplicar o consumo da situação sem carga passando para 15 kW e, quando dobra-se a demanda para 30 kW, o consumo acompanha a propensão e se aproxima de dobrar a quantidade consumida, seguindo a primeira lei da termodinâmica, conservação da energia: A variação da

Energia Interna (ΔU) de um sistema é expressa por meio da diferença entre a quantidade de calor (Q) trocada com o meio ambiente e o trabalho (W) realizado durante a transformação (PRITCHARD , 2015).

Tabela 5.1. Consumo médio de combustível por mistura.

Blenda	consumo kg	carga kW	Blenda	consumo kg	carga kW	Blenda	consumo kg	carga kW
B8	0,34	sem carga	B20m	0,24	sem carga	B20e	0,26	sem carga
B8	0,74	15	B20m	0,70	15	B20e	0,72	15
B8	1,42	30	B20m	1,36	30	B20e	1,40	30
B8E5	0,30	sem carga	B20mE5	0,28	sem carga	B20eE5	0,28	sem carga
B8E5	0,70	15	B20mE5	0,74	15	B20eE5	0,76	15
B8E5	1,28	30	B20mE5	1,40	30	B20eE5	1,36	30
B8E10	0,30	sem carga	B20mE10	0,28	sem carga	B20eE10	0,28	sem carga
B8E10	0,76	15	B20mE10	0,74	15	B20eE10	0,76	15
B8E10	1,40	30	B20mE10	1,46	30	B20eE10	1,42	30
B100e	0,34	sem carga	B100m	0,32	sem carga			
B100e	0,78	15	B100m	0,82	15			
B100e	1,48	30	B100m	1,50	30			
B100eE5	0,36	sem carga	B100mE5	0,32	sem carga			
B100eE5	0,84	15	B100mE5	0,86	15			
B100eE5	1,46	30	B100mE5	1,50	30			
B100eE10	0,34	sem carga	B100mE10	0,32	sem carga	B100mE20	1,58	30
B100eE10	0,84	15	B100mE10	0,84	15			
B100eE10	1,42	30	B100mE10	1,56	30	B100mE30	1,60	30

5.3.1. Consumo Específico de Combustível

Na Figura 5.31 nota-se o menor consumo específico para o B20m, seguido pelo B20e, e repetindo resultados de estudos anteriores, que colocavam o B20 como melhor opção do ponto de vista econômico (PAULO et al. 2016), e um valor crescente conforme aumenta-se o percentual de biodiesel e etanol nas misturas.

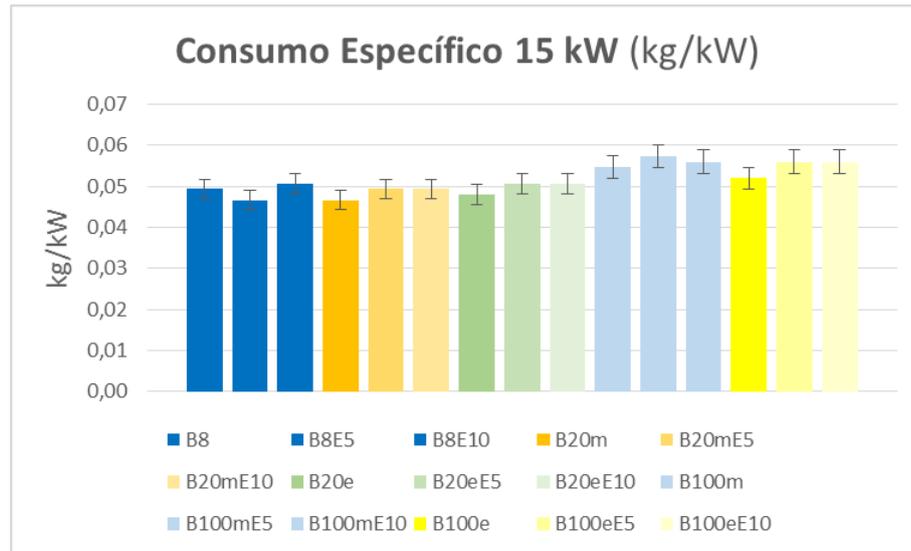


Figura 5.31. Consumo específico de combustível para carga de 15 kW.

Quando se elevou a demanda para 30 kW (Figura 5.32), verificou-se uma pequena queda no consumo específico e, analisando os desvios, pode-se dizer que existe um equilíbrio no consumo entre todas as blendas de B8 e B20, a inclusão de EHC não trouxe resultados uniformes, variando entre redução de consumo para B100e e aumento para B100m, Este aumento no consumo pode-se associar a queda no poder calorífico das blendas, dada a entrega de potência estável, o GMC demandou mais quantidade de alimentação para entregar a potência solicitada (**BARROS 2013**), contudo, faz-se necessário um estudo mais aprimorado e analítico das blendas e seu comportamento físico-químico.

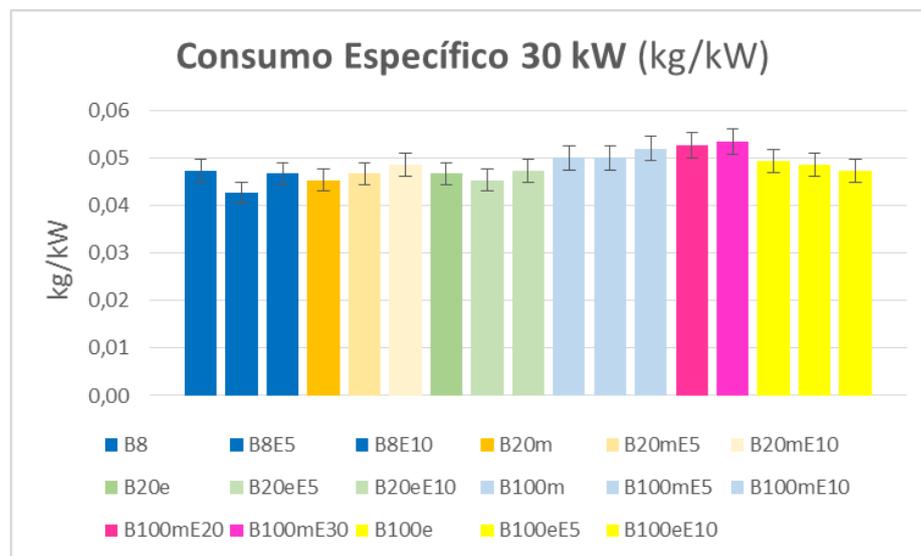


Figura 5.32. Consumo específico de combustível para carga de 30 kW.

6. CONCLUSÕES

De acordo com os aspectos apresentados nos ensaios realizados e baseado na análise das condições dos ensaios, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- Para o desempenho do motor diesel do grupo motor-gerador (GMG), não houve variação significativa de rendimento ou perda de potência (menor que 1%), atendendo sempre a quantidade demandada: 15 kW (30% da capacidade nominal do GMC) e 30 kW (60% da capacidade nominal do GMC). O conjunto motor se adaptou bem as blendas consumidas e as quantidades de EHC inseridas, não pleiteando qualquer tipo de alteração mecânica nas condições de temperatura e pressão atmosféricas ensaiadas.
- Nas emissões de monóxido de carbono (CO), foram observadas redução superior a 85% para as misturas diesel-biodiesel-etanol B20E10 metílico e B100E30 metílico, quando comparadas ao B8 comercial, com carga de 30 kW.
- Em relação às emissões de dióxido de carbono (CO₂), pequenas oscilações de 4% foram observadas, com o menor índice para a blenda B20E10 metílico, frente ao B8 diesel de referência.
- Com a inserção de etanol hidratado combustível, foram observadas quedas nas emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), com destaque para B20E10 metílico que apresentou o menor índice, e para o biodiesel metílico que mostrou valores menores que o diesel comercial com acréscimo de apenas 5% de EHC.
- As análises de O₂ revelaram um aumento no percentual para B20E10, em torno de 4%, o que corresponde a baixa de CO em ppm, apresentada na mesma blenda, evidenciando a mistura pobre, com excesso de ar.
- Para os hidrocarbonetos, os ensaios evidenciaram a redução drástica de B8 para B100, com valores muito próximos de zero para o biocombustível.
- A faixa de temperatura dos gases de exaustão para o motor analisado situa-se entre 500°C e 800°C em plena carga, sendo o melhor resultado observado para B20 e B20E5 que entregaram a potência solicitada e permaneceram abaixo dos 500°C, demonstrando uma eficiência térmica superior. O biocombustível adicionado de 5%

de EHC ficou dentro da faixa de operação, comprovando a sua utilização sem comprometer a integridade mecânica dos componentes do motor.

- O biodiesel etílico não apresentou qualquer risco ao motor ou valores de emissões distintos do biodiesel metílico, sendo ele a melhor opção em termos ambientais e de fomento à agricultura e economia nacional.
- O consumo específico de combustível apresentou pequenas variações com a demanda de 30 kW, ficando dentro da margem de erro das medições, o que atesta a utilização de biocombustíveis com um menor poder calorífico, mantendo-se o consumo equivalente ao diesel comercial.
- O B100E5 etílico se demonstrou viável para utilização em GMC para transformação de energia limpa e renovável, com valores de emissões e de temperatura abaixo do diesel comercial.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros, destacam-se:

- Investigar a variação das propriedades físico-químicas dos biodieseis, suas blends com o diesel fóssil, e com a adição de etanol hidratado;
- Propor uma metodologia de planejamento experimental que permita definir quais as variáveis mais significativas no desempenho do sistema motor-combustíveis.
- Realizar ensaios no grupo motor-gerador com instrumentação mais detalhada em relação aos parâmetros operacionais do motor, como pressões, temperaturas e condições de injeção;
- Avaliar termodinamicamente os comportamentos das misturas de combustíveis durante combustão, propondo balanços térmicos e de massas para os combustíveis analisados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP 07/2008. 2008. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 15 janeiro 2017.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP 30/2016. 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 15 janeiro 2017.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP 45/2014. 2014. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 20 agosto 2016.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP 50/2013. 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 03 Abril 2016.

AGARWAL, A. K., Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy Combustion Science*, Vol. 33, Issue 3, P. 233-271, June 2007.

AGARWAL, A. K.; SINHA, S.; AGARWAL, A., Experimental Investigation of Control of NO_x Emissions in Biodiesel-Fueled Compression Ignition Engine. *Renewable Energy*, Vol. 31, Issue 14, P. 2356-2369, November 2006.

AJAV E.; SINGH B.; BHATTACHARYA, T., Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol–diesel blends as fuel. *Biomass. Bioenergy*, Vol. 17, Issue 4, P. 357-365, October 1999.

GUEDES, A. D. M.; BRAGA, S. L.; PRADELLE, F., Performance and combustion characteristics of a compression ignition engine running on diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends. *Renewable Energy*, Vol. 136, P. 586-598, June 2019.

BARABÁS, I.; TODORUȚ, A.; BĂLDEAN, D., Performance and emission characteristics of a CI engine fuel end with diesel–biodiesel–bioethanol blends. *Fuel*, Vol. 126, P. 1059-1066, September 2017.

BARROS, JOSÉ EDUARDO MAUTONE, *Combustão em Motores Diesel*, V escola da Combustão, Belém, 2013.

BATTIST, D. S.; NAYLOR, R. I. Historical Warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science*, v. 323, p.240-244, 2009.

BAI, L.; SMUTS, J.; SCHENK, J.; COCHRAN, J.; SCHUG, K. A. Comparison Of GC-VUV, GC-FID, and Comprehensive Two-Dimensional GC–MS For The Characterization Of Weathered And Un weathered Diesel Fuels. *Fuel*, v. 214, p.521–527, 2018.

BHALE, P. V.; DESHPANDE, N. V.; THOMBRE, S. B., Improving the low temperature properties of biodiesel fuel. *Renewable Energy*, Vol. 34, Issue 3, Pages 794-800, March 2009.

BOSCH, R. *Manual de Tecnologia Automotiva*. 25ª ed. São Paulo: E. Blucher. 2005. 1232p.

BRAUN, J. V.; DOS SANTOS, V. O. B.; FONTOURA, L. A. M.; PEREIRA, E.; NAPP, A.; SEFERIN, M.; LIMA, J.; LIGABUE, R.; VAINSTEIN, M. H.; GC-FID Methodology Validation For The Fatty Esters Content Determination In Biodiesel With Hexadecyl Acetate As The Internal Standard. *Química Nova*, v. 40, p.1111-1116, 2017.

BUCKER F. *Biodeterioração de Misturas de Diesel e Biodiesel e seu Controle com Biocidas*. UFRGS 2009.

CAN, Ö.; CELIKTENI, U., Effects of ethanol addition on, performance and emissions of a turbocharged in direct injection diesel engine running at different injection pressures. *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, Issues 15–16, P 2429-2440, September 2004.

CHALLEN, B.; BARANESCU, R., Diesel engine reference book. 2nd ed. England: Butter Worth and Heinemann, 1999.

CHEENKACHORN, K.; FUNGTAMMASAN, B., Biodiesel as an additive for diesohol. International Journal of Green Energy, Vol. 6 (1):57-72 · March 2009.

COLUCCI, J.; PALMER, F., Diesel fuel lubricity. IFQC: International Fuel Quality Center Special Report. Houston: 10p. 2003.

CRAMACO G2R, Instruction Manual. Cramaco, 2017.

FREITAS, D. S. Análise de Impactos na Integração de Usinas Fotovoltaicas ao Sistema Elétrico Isolado da Ilha de Fernando de Noronha. In: XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica SENDI: 2016, Curitiba. Anais. Curitiba: SENDI, 2016, p. 11-22

GUARIEIRO, L. L. N.; DE SOUZA, A. F.; TORRES, E. A.; DE ANDRADE, J. B., Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO₂, and NO_x emitted by a diesel engine fueled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils. Atmospheric Environment, Vol. 43(17):2754–2761 · June 2009.

GOMES, H. O.; OLIVEIRA FILHO, J. F., Metodologia de Avaliação da Lubricidade de Óleo Diesel. Boletim Técnico, Petrobras, n.48, p.37-52. Rio de Janeiro: 2005.

HABIBULLAH, M. et al., Biodiesel Production and Performance Evaluation of Coconut, Palm and Their Combined Blend with Diesel in a Singer-Cylinder Engine. Energy Conversion and Management, vol. 87, pp.250-257 ref.42, 2014.

HE B-Q, SHUAI S-J, WANG J-X, HE H. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. Atmosphere and Environment, Vol. 37, Issue 35, P 4965-4971, November 2003.

HEYWOOD, J. B. Internal combustion engine fundamentals; 1988.

HULWAN, D. B.; JOSHI, S. V., Performance, emission and combustion characteristic of a multi cylinder DI diesel engine running on diesel–ethanol–biodiesel blends of high ethanol content. *Applied Energy*, Vol 88, Issue 12, P 5042-5055, December 2011.

KOWALEWICZ, A., Eco-diesel engine fueled with rapeseed oil methyl ester and ethanol. Part1: Efficiency and emission. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part DJ Automob. Eng.*, Vol. 220(9), P.1275-1282 · August 2006.

LA PUERTA, M.; ARMAS, O.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J., Effect to biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy Combustion Science*, Vol. 34, Issue 2, Pages 198-223, April 2008.

LI, D-G.; ZHEN, H.; XING CAI, L.; WU-GAO, Z.; JIAN-GUANG, Y., Physic-chemical properties of ethanol–diesel blend fuel and its effect to performance and emissions of diesel engines. *Renewable Energy*, Issue 53, P 27634-28175, 2014

MAZZINI, L. A. Biodiesel. 3º Escola do Biodiesel, CIENTEC, Porto Alegre, 2013

MASUM, B. M.; KALAM, M. A.; MASJUKI, H. H.; PALASH, S. M.; FATTAHI, M. R., Performance and emission analysis of a multi cylinder gasoline engine operating at different alcohol–gasoline blends. *RSC Adv*, v. XX, p.XXX-XXX, 2014.

MUJAHID, M., MOHYUDDIN, A., BHATTI, A. A., NASIR, M., Energy Sustainability: Study on Fuel Efficiency and Engine Properties by Using Biodiesel and Fossil Diesel, *Proceedings of International Conference on Energy and Sustainability*, Karachi, Pakistan, 2013.

NBR 14065: 2013. Destilados de Petróleo e Óleos Viscosos - Determinação da Massa Específica e da Densidade Relativa pelo Densímetro Digital. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2013.

OMENA, L. A., et al. O papel dos biocombustíveis na nova configuração geopolítica, Revista de Geopolítica, v. 4, n. 1, p.79 – 97, 2013.

OLIVEIRA COSTA, Joel. Análise dos Gases da Exaustão em um Motor Diesel com Injeção Common Rail Alimentado com Diesel, Biodiesel e suas Misturas. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre. 2017.

PANG, X.; SHI, X.; UM, Y.; HE, H.; SHUAI, S.; CHEN, H., Characteristics of carbonyl compounds emission from a diesel-engine using biodiesel–ethanol–diesel as fuel. Atmosphere and Environment, Vol. 40, Issue 36, Pages 7057-7065, November 2006.

PARK, S. H.; CHA, J.; LEE, C. S., Impact of biodiesel in bioethanol blended diesel on the engine performance and emissions characteristics in compression ignition engine. Applied Energy, Vol. 99, Pages 334-343, November 2012.

PAULO, A. A.; DA COSTA, R. S.; VECCHIA, F. D.; SERAFIN, M.; DOS SANTOS, C. A., Performance and emission evaluations in a power generator fueled with Brazilian diesel and additions of waste frying oil biodiesel. Applied Thermal Engineering, Volume 98, Pages 288-297, 5 April 2016.

PIDOL, L.; LECOINTE, B.; STARCK, L.; JEULAND, N., Ethanol–biodiesel–diesel fuel blends: performances and emissions in conventional diesel and advanced low temperature combustions. Fuel, Vol. 93, Pages 329-338, March 2012.

PRITCHARD, Mc DONALD and FOX. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8ª ed. São Paulo: E. LTC/gen. 2015. 1232p.

RANDAZZO, M. L.; SODRÉ, J. R., Exhaust emissions from a diesel powered vehicle fueled by soybean biodiesel blends (B3–B20) with ethanol as an additive (B20E2–B20E5). Fuel, v. 90 91), p.98-103, 2011.

ROCHA, R. H. L.; PINTO, N. R.; COLAÇO, M. J.; LEIROZ, A. J. K., Experimental Study Of Ternary Fuel Blends On An Astm-Cfr-Cetane Engine. *Thermal Engineering*, v. 13 (2), ISSN: 1676-1790, 2014.

SAMIOS, D.; PEDROTTI, F.; NICOLAU, A.; REIZNAUTT, Q. B.; MARTINI, D. D.; DALCIN, F. M.; A Transesterification Double Step Process – TDSP for Biodiesel Preparation from Fatty Acids Triglycerides. *Fuel Processing Technology*, v.90, p.599-605, April 2009.

SUBBAIAH, G. V.; GOPAL, K. R.; HUSSAIN, S. A.; PRASAD, B. D.; REDDY, K. T., Ricebranoil biodiesel as a additive in diesel–ethanol blends for diesel engines. *International Journal of Research and Review Applied Science*, IJRRAS Vol. 3 (3) June 2010.

SHI, X.; PANG, X.; MU, Y.; HE, H.; SHUAI, S.; WANG, J., Emission reduction potential of using ethanol–biodiesel–diesel fuel blend on a heavy-duty diesel engine. *Atmosphere and Environment*, Volume 40, Issue 14, Pages 2567-2574, May 2006.

SZYBIST, J. P.; BOEHMAN, A. L., Behavior of a diesel injection system with biodiesel fuel. SAE Technical Paper 2003-01-1039, <https://doi.org/10.4271/2003-01-1039>. 2003

TESTO-350 M/XL, Instruction Manual. Testo AG, 2014.

WADUMESTHRIGE, K.; ARA, M.; SALLEY, O. S.; SIMON, K. Y. Investigation of Lubricity Characteristics on Biodiesel in Petroleum and Synthetic Fuel. *Energy Fuels*, v. 23 (4), pp 2229–2234. 2009.

WANG, W. G.; CLARK, N.; LYONS, D.; YANG, R.; GAUTAM, M.; BATA, R., Emissions comparisons from alternative fuel buses and diesel buses with a chassis dynamometer testing facility. *Environ. Sci. Technol.*, Vol 31 (11), pp 3132–3137, 1997.

BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H., Física para Universitários - Relatividade,

Oscilações, Ondas e Calor, McGraw Hill Brasil, 2013.

XING-CAI, L.; JIAN-GUANG, Y.; WU-GAO, Z.; ZHEN, H., Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fuel ed with ethanol–diesel blend fuel. Fuel, Volume 83, Issues 14–15, October 2004, Pages 2013-2020