

FELIPE FERNANDES KLAJN

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE DIFERENTES PROPORÇÕES DA  
MISTURA DIESEL-BIODIESEL-ETANOL E DIESEL-BIODIESEL  
FRENTE AO DIESEL TIPO “A”: ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E DE  
DESEMPENHO DE UM CONJUNTO MOTOR-GERADOR

CASCAVEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2016

FELIPE FERNANDES KLAJN

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE DIFERENTES PROPORÇÕES DA  
MISTURA DIESEL-BIODIESEL-ETANOL E DIESEL-BIODIESEL  
FRENTE AO DIESEL TIPO “A”: ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E DE  
DESEMPENHO DE UM CONJUNTO MOTOR-GERADOR

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio Gurgacz  
CO-ORIENTADORES: Profs. Deonir Secco e  
Reginaldo Ferreira Santos

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

K69a

Klajn, Felipe Fernandes

Avaliação comparativa de diferentes proporções da mistura diesel-biodiesel-etanol e diesel-biodiesel frente ao diesel tipo "A": análises físico-químicas e de desempenho de um conjunto motor-gerador./Felipe Fernandes Klajn. Cascavel, 2016.

81 f.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Gurgacz

Coorientador: Prof. Dr. Deonir Secco

Coorientador: Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2016

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura

1. Mistura diesel-biodiesel-etanol. 2. Mistura diesel-biodiesel. 3. Conjunto motor gerador. I. Gurgacz, Flávio. II. Secco, Deonir. III. Santos, Reginaldo Ferreira. IV. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. V. Título.

CDD 21.ed. 631.37

CIP-NBR 12899

FELIPE FERNANDES KLAJN

**“AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE DIFERENTES PROPORÇÕES DA  
MISTURA DIESEL-BIODIESEL-ETANOL E DIESEL-BIODIESEL  
FRENTE AO DIESEL TIPO “A”: ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E DE  
DESEMPENHO DE UM CONJUNTO MOTOR-GERADOR”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:

  
Prof. Dr. Flavio Gurgacz

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

  
Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel

  
Prof. Dr. Luis Fernando Souza Gomes

Universidade Federal do Paraná– UFPR/Palotina

Cascavel, 18 de março de 2016.

*Dedico este trabalho a minha família,  
namorada e amigos por fazerem parte  
dos meus sonhos e partilharem das  
minhas conquistas.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor Jesus Cristo, por ter-me concedido sabedoria e capacidade diante dos desafios encontrados, e por colocar pessoas importantes que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Luiz Antônio Klajn e Lenir Fernandes Klajn, minha irmã Amanda Fernandes Klajn, e minha namorada, Camila Kalinski, por todo carinho e suporte dado em todos os momentos desta etapa importante da minha vida.

Ao professor orientador Flávio Gurgacz, pela sua disponibilidade na resolução dos problemas encontrados ao longo do trabalho e todos os ensinamentos transmitidos.

Ao professor Reinaldo Aparecido Baricatti pelo apoio na condução da parte laboratorial do experimento, e ao professor Luis Fernando Souza Gomes pelo auxílio no estabelecimento das bases teóricas do trabalho.

Ao colega Anderson Miguel Lenz, por todo o auxílio concedido na montagem e condução do experimento.

Aos colegas Eduardo de Rossi, Fernando Toniazzo, Giuseppe Eugenio Peruzo Iacono e Christian Valcir Kniphoff de Oliveira pelo auxílio nos experimentos e troca de ideias ao longo do mestrado.

À secretária Vanderléia Schmidt e assistente Keren Paula da Silva, por todas as dúvidas sanadas e pelos importantes lembretes em todo o período do mestrado.

Aos demais professores, colegas e funcionários da Unioeste, que de alguma forma contribuíram e participaram dessa conquista tão importante.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo da reação de transesterificação alcalina .....	5
Figura 2. Sistema diesel-biodiesel-etanol 95% a temperatura ambiente.....	10
Figura 3. Sistema Diesel-Biodiesel-Etanol 99,5% a temperatura ambiente .....	11
Figura 4A. Equipamento e2k para medição do Poder Calorífico Superior (PCS) .....	28
Figura 4B. Cadinho metálico e fio de algodão preso à resistência .....	28
Figura 5. Cannon-Fenske utilizado para medição da viscosidade das amostras .....	29
Figura 6. Ilustração do motor utilizado nos ensaios .....	30
Figura 7. Analisador de Energia, marca INSTRUTHERM, modelo AE-200 .....	32
Figura 8A. Posicionamento do fluxômetro no experimento .....	33
Figura 8B. Modelo de fluxômetro utilizado no experimento.....	33
Figura 9. Ilustração do funcionamento do fluxômetro .....	33
Figura 10. Datalogger FIELDLOGGER para aquisição e registro dos dados .....	33
Figura 11A. Banco de resistências .....	34
Figura 11B. Quadro de comando .....	34
Figura 12. Multímetro para medição da frequência do conjunto motor-gerador .....	34
Figura 13. Equipamento para mensuração dos gases de escape, marca Bacharach .....	35
Figura 14. Inserção do detector de gases do Bacharach para medição do SO <sub>2</sub> na saída do motor .....	36
Figura 15. Densidade das misturas ilustrando os limites mínimos e máximos estabelecidos pela ANP .....	39
Figura 16. Viscosidade das misturas ilustrando os limites máximos e mínimos estabelecidos pela ANP .....	41
Figura 17. Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 0% de etanol, para cada carga .....	46
Figura 18. Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 1% de etanol, para cada carga .....	47
Figura 19. Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 5% de etanol, para cada carga .....	48

Figura 20. Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 10% de etanol, para cada carga .....	49
Figura 21. Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 15% de etanol, para cada carga .....	50
Figura 22. Desdobramento do CE de cada nível de etanol dentro de 7% de biodiesel, para cada carga .....	53
Figura 23. Desdobramento do CE de cada nível de etanol dentro de 10% de biodiesel, para cada carga .....	54
Figura 24. Desdobramento do CE de cada nível de etanol dentro de 15% de biodiesel, para cada carga .....	55
Figura 25. Desdobramento do CE de cada nível de etanol dentro de 20% de biodiesel, para cada carga .....	55
Figura 26. Consumo Específico absoluto por carga para todas os tratamentos .....	57
Figura 27. Compilado dos gráficos com a emissão de SO <sub>2</sub> a partir da adição de biodiesel em porcentagens de etanol .....	59
Figura 28. Compilado dos gráficos com a emissão de SO <sub>2</sub> a partir da adição de etanol em porcentagens de biodiesel .....	62
Figura 29. Eficiência Energética absoluta por carga para todos os tratamentos .....	66
Figura 30. Eficiências máximas e mínimas para cada carga, comparado ao diesel .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações do etanol hidratado e anidro .....	8
Tabela 2. Valores dos Padrões Primários e Secundários de emissão para o SO <sub>2</sub> ..	22
Tabela 3. Simbologia de cada tratamento e as porcentagens de cada combustível	25
Tabela 4. Informações do Biodiesel utilizado nos testes .....	27
Tabela 5. Especificações Técnicas do Grupo Moto-Gerador e do gerador. ....	31
Tabela 6. Especificações do Motor .....	31
Tabela 7. Valores absolutos medidos para a densidade .....	38
Tabela 8. Viscosidade para as misturas testadas, medidas em centistoke (cSt) .....	40
Tabela 9. Valores absolutos do PCI, dados em MJ kg <sup>-1</sup> .....	42
Tabela 10. Desdobramento dos valores de consumo específico (g kw <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ) de biodiesel e carga dentro de cada nível de etanol .....	44
Tabela 11 Desdobramento de etanol e carga dentro de cada nível de biodiesel.....	52
Tabela 12. Preços individuais dos combustíveis de acordo com o fabricante e/ou distribuidor .....	63
Tabela 13. Preços das misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol com base nos preços individuais dos combustíveis .....	63

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Determinação da viscosidade entre 30 e 60 °C para mistura diesel-biodiesel-etanol a partir de seus componentes individuais .....	16
Equação 2. Determinação do Poder Calorífico Inferior (PCI) a partir do Poder Calorífico Superior (PCS) .....	28
Equação 3. Cálculo da densidade.....	30
Equação 4. Determinação da frequência elétrica.....	35
Equação 5. Fórmula do Consumo Horário Volumétrico .....	36
Equação 6. Fórmula para determinação do Consumo Específico.....	37
Equação 7. Fórmula para obtenção da Eficiência Energética .....	37

KLAJN, Felipe Fernandes. M. Sc. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Março de 2016. **Avaliação Comparativa de Diferentes Proporções das Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol e Diesel-Biodiesel frente ao Diesel Tipo “A”: Análises Físico-Químicas e de Desempenho de um Conjunto Motor-Gerador.** Orientador: Prof. Dr. Flávio Gurgacz

## RESUMO

A busca de alternativas para a diminuição do uso de diesel dentro da matriz energética nacional, principalmente dentro do setor de transportes, tem sido estudada e realizada de modo gradativo com inserções parciais de biodiesel ao diesel. Esta mistura binária, entretanto, pode ser melhorada com a adição de álcool etílico (etanol), que por conter átomos de oxigênio em sua estrutura pode ser capaz de promover uma queima mais eficiente e reduzir as emissões gasosas, tanto sulfuradas quanto não sulfuradas. Assim, este trabalho buscou avaliar o desempenho energético de um conjunto motor-gerador trabalhando com misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol, comparando com o diesel tipo “A”, isto é, diesel sem a adição de biodiesel, bem como características físico-químicas de cada tratamento. As misturas diesel-biodiesel tiveram como base a formulação atualmente comercializada (B7) e projeções previstas pelo Projeto de Lei do Senado 613/2015 e Resolução CNPE nº 3/2015 para frotas cativas ou consumidores rodoviários, isto é, B10, B15 e B20. Cada mistura binária desta sofreu adições de etanol anidro (99,6% p/p) a 1%, 5%, 10% e 15%. Os tratamentos foram submetidos a 5 cargas resistivas de 1, 2, 3, 4 e 5 kW, em triplicata. Do conjunto de dados colhidos, foram analisados a densidade, viscosidade, poder calorífico superior e inferior, consumo específico (CE), eficiência energética (EE) e as emissões de SO<sub>2</sub>. A densidade e viscosidade das misturas ficaram próximas ao diesel e dentro das especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). O poder calorífico inferior diminuiu a medida que o teor de biocombustíveis incorporados ao diesel cresceu. O melhor consumo específico em termos absolutos foi verificado na carga de 5 kW, para B15E1, com 327,1 g kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> seguido de B10E1 (330,1 g kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) e do diesel (334,7 g kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>). As misturas ternárias compostas pela adição de 1% de etanol não diferiram estatisticamente das misturas diesel-biodiesel para todas as cargas aplicadas. A maior EE verificada foi de 27,15%, na carga de 4 kW, para a mistura B10E15. As misturas B15E1, B20E1 e B20E0 foram mais eficientes que o diesel para todas as cargas aplicadas. A menor emissão de SO<sub>2</sub> foi verificada na carga de 5 kW para a mistura B10E0, com 397,66 ppm, enquanto a maior foi na carga de 1 kW, para B15E15, com 3391,67 ppm.

**PALAVRAS-CHAVES:** mistura diesel-biodiesel-etanol, mistura diesel-biodiesel, conjunto motor gerador.

KLAJN, Felipe Fernandes. M. Sc. State University of West Parana, March of 2016.  
Comparative evaluation of different proportions of diesel-biodiesel-ethanol and diesel-biodiesel blends in comparison with type "A" Diesel: Physical-Chemical analysis and Moto-Generator performance. Adviser: Prof. Dr. Flávio Gurgacz.

## ABSTRACT

The search for alternatives to reduce diesel within the national energy matrix, particularly within the transport sector, has been studied and carried out in a gradual manner with partial insertions of biodiesel to diesel. This binary mixture, however, can be improved by the addition of ethyl alcohol (ethanol), which contain oxygen atoms in its structure and may be able to promote more efficient burning and to reduce exhaust emissions, both sulfur and non-sulfur. This work aimed to evaluate the energy performance of an engine-generator set working with diesel-biodiesel blends and diesel-biodiesel-ethanol, compared with the diesel type "A", i.e, diesel without the addition of biodiesel, as well as physicochemical characteristics of each treatment. The diesel-biodiesel mixtures were based on the currently marketed formulation (B7) and projections provided by the Senate Bill 613/2015 and Resolution No. 3/2015 CNPE for captive consumers or road fleets, ie, B10, B15 and B20. Each binary mixture this has undergone additions of anhydrous ethanol (99.6% p / p) to 1%, 5%, 10% and 15%. The treatments were subjected to 5 resistive loads of 1, 2, 3, 4 and 5 kW in triplicate. The set of data collected, analyzed the density, viscosity, calorific value, specific consumption (CE), energy efficiency (EE) and SO<sub>2</sub> emissions. The density and viscosity of the mixtures were close to the diesel and within the specifications of the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). The calorific value decreased as the biofuel incorporated into the diesel grew. The best specific fuel consumption was observed in absolute terms at a load of 5 kW for B15E1 with 327.1 g kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> followed by B10E1 (330.1 g kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) and diesel (g kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>). The ternary mixture composed by adding 1% ethanol did not differ statistically from diesel-biodiesel blends for all applied loads. The greatest EE of 27.15% was observed at the load of 4 kW, to B10E15 mixture. The B15E1 mixtures, B20E1 and B20E0 were more efficient than diesel for all applied loads. The lowest emission of SO<sub>2</sub> was 5 kW for the load B10E0 with 397.66 ppm, while the highest was in load of 1 kW for B15E15 with 3391.67 ppm.

**KEYWORDS:** diesel-biodiesel-ethanol blend, diesel-biodiesel blend, engine generator set.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	IX
ABSTRACT .....	X
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 SITUAÇÃO PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 OBJETIVO GERAL .....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	4
2.1 BIODIESEL .....	4
2.2 ETANOL .....	7
2.3 MISTURAS DIESEL-BIODIESEL-ETANOL .....	9
2.3.1 ESTABILIDADE DA MISTURA TERNÁRIA.....	10
2.3.2 PONTO DE FULGOR .....	12
2.3.3 PONTO DE ENTUPIMENTO DE FILTRO A FRIO (PEFF) .....	13
2.3.4 PODER CALORÍFICO.....	13
2.3.5 DENSIDADE .....	14
2.3.6 VISCOSIDADE .....	15
2.3.7 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS .....	16
2.3.7.1 EMISSÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO) .....	17
2.3.7.2 EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO <sub>x</sub> ) .....	19
2.3.7.3 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ) .....	21
2.3.7.4 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO <sub>2</sub> ) .....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	24
3.1 DESCRIÇÃO GERAL DO ESTUDO .....	24
3.2 COMBUSTÍVEIS .....	25
3.2.1 ETANOL.....	26
3.2.2 BIODIESEL .....	26
3.2.3 ÓLEO DIESEL TIPO “A”.....	26
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	26
3.3.1 PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) .....	27
3.3.2 VISCOSIDADE CINEMÁTICA.....	29
3.3.3 DENSIDADE A 20°C .....	29
3.4 ENSAIO DO CONJUNTO MOTOR-GERADOR .....	30

3.5 PARÂMETROS DETERMINADOS .....	36
3.5.1 CONSUMO HORÁRIO VOLUMÉTRICO (CHV) .....	36
3.5.2 CONSUMO ESPECÍFICO (CE) .....	36
3.5.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (EE) .....	37
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
4.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS .....	38
4.1.1 DENSIDADE .....	38
4.1.2 VISCOSIDADE .....	40
4.1.3 PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) .....	42
4.2 QUADRO DE SIGNIFICÂNCIA DO CONSUMO ESPECÍFICO .....	42
4.2.1 CONSUMO ESPECÍFICO .....	43
4.3 EMISSÃO DE SO <sub>2</sub> .....	58
4.4 ANÁLISE DOS PREÇOS .....	63
4.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	64
5. CONCLUSÕES .....	69
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	70
7. REFERÊNCIAS .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o uso do diesel dentro da matriz veicular nacional é bastante significativo, tendo sido responsável, segundo dados da ANP, por 46,3% de todo combustível consumido no setor de transportes. A redução do uso do óleo diesel com a incorporação de outros combustíveis tem sido estudada por muitos pesquisadores e faz-se necessária, para que se consiga uma maior segurança energética e maior aproximação das metas de redução de gases prejudiciais ao planeta, das quais o Brasil é país signatário dos acordos mundiais para cumprimento deste objetivo.

Por ser uma mistura de querosene, nafta e gasóleos proveniente do petróleo, tem-se que um dos componentes presentes no diesel é o enxofre. Durante a combustão do diesel, o enxofre acaba por se tornar indesejável até certo ponto para o meio ambiente e para o próprio motor, já que acaba por formar ácido sulfúrico a partir da reação do trióxido de enxofre com água, corroendo algumas partes metálicas como mancais e guias de válvulas, além de gerar gases sulfurados que contribuem para a poluição do ar e agravamento do efeito estufa. As medidas adotadas pelo governo para a redução da emissão de poluentes e também de enxofre teve início com a Resolução nº 18 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que instituiu o PROCONVE (Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores), coordenado pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Porém, uma redução mais acentuada nos teores de enxofre em combustíveis que viesse a respaldar esta legislação se deu apenas recentemente, quando no início de 2014 a ANP determinou a substituição do S50 (500 ppm de enxofre) pelo S10 (10 ppm), e do S1800 pelo S500. Países como os EUA e do bloco europeu já na década de 90 atingiam concentrações em seus óleos diesel de 15 ppm a 50 ppm, o que mostra a demora brasileira em conseguir adequar-se à realidade internacional.

A redução no teor de enxofre, apesar de benéfica, faz com que o combustível perca em lubricidade, já que não ocorre a formação da camada limite na superfície do metal ocasionada pela parte sulfurada polar da molécula de enxofre, provocando danos às partes metálicas do motor, que não conseguem lubrificar-se por inteiro apenas com o óleo do cárter. A adição de biodiesel ao diesel é capaz de corrigir esta deficiência do combustível, tornando-o propício à queima no motor.

As misturas de diesel e biodiesel já possuem regulamentação da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), sendo atualmente comercializados em todo o território nacional o B7, isto é, adição de 7% de biodiesel ao diesel convencional. Entretanto, um posterior aumento da adição do biocombustível ao diesel estaria condicionado a capacidade de produção do país, além do preço praticado pelo biodiesel no mercado ainda estar situado a cotações maiores que o do diesel. A adição de álcool etílico (etanol) a esta mistura binária tem sido estudada como uma alternativa para auxiliar tanto em uma combustão mais eficiente e redução dos compostos gasosos sulfurados e não sulfurados, quanto para incorporar mais biocombustíveis na cadeia energética e reduzir a dependência do diesel nos transportes, sem que haja uma alteração profunda das suas características físico-químicas ou de desempenho no motor.

Assim, visando propiciar alternativas para o avanço da política energética de inserção de biocombustíveis na matriz nacional, este trabalho possui o intuito de avaliar as características da inserção de etanol anidro em várias proporções à esta mistura, estabelecendo uma comparação de desempenho de um conjunto motor-gerador estacionário abastecido com misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol frente ao diesel tipo “A” (que não sofre adição de biodiesel em sua composição) mantendo-se o diesel sempre em maior proporção na mistura.

## **1.1 SITUAÇÃO PROBLEMA**

A dependência do modal rodoviário na utilização de combustíveis derivados do petróleo, em especial o diesel, faz com que haja grande utilização de recursos não renováveis e que se entre em conflito com as propostas recentes e compromissos, tanto nacionais como mundiais, de caminho rumo a uma economia verde. A introdução de biocombustíveis no mercado, como a adição de biodiesel ao diesel convencional, apesar de já representar um avanço na solução destes impasses, não se mostra eficaz a ponto de ser a solução do problema frente ao volume de combustível fóssil ainda consumido. São necessários estudos que mostrem uma gama maior de opções que possibilitem melhorar ou manter o desempenho dos motores que funcionam com ciclo diesel, sendo a mistura ternária entre etanol-diesel-biodiesel uma das alternativas a serem analisadas, não com o

intuito de substituí-lo, mas sim de diminuir seu consumo através do acréscimo de novos combustíveis.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

Verificar se as misturas ternárias formadas com o acréscimo gradativo de etanol anidro às misturas de diesel e biodiesel é capaz de manter ou melhorar as características de desempenho energético do conjunto motor-gerador, quando comparado ao diesel tipo “A” e suas respectivas misturas binárias.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar algumas características físico-químicas das misturas diesel-biodiesel-etanol e comparar com a legislação estabelecida para o diesel tipo “A”;
- Preparar as misturas diesel-biodiesel (DB), em determinadas proporções, baseando-se nas pretensões nacionais de aumento da adição de biodiesel ao diesel, e testá-las no conjunto motor gerador;
- Adicionar, a partir das misturas DB previamente elaboradas, concentrações gradativas de etanol anidro, e verificar o desempenho deste acréscimo frente às misturas diesel-biodiesel e diesel Tipo “A”.
- Estabelecer comparações entre os desempenhos das misturas ternárias, binárias e do diesel tipo “A”.
- Realizar, de maneira simplificada, um estudo econômico dos custos envolvendo o preço final dos combustíveis.
- Propor melhorias nos percentuais de mistura e indicações para trabalhos futuros.

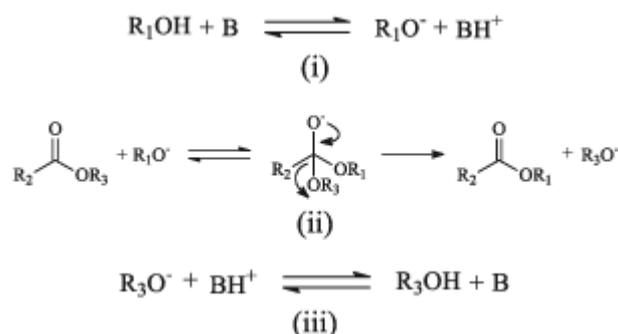
## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 BIODIESEL

O biodiesel pode ser considerado como um dos mais promissores combustíveis alternativos para uso em motores de combustão interna, principalmente após seu considerável sucesso no mercado europeu. Tendo características que vão em busca do ideal econômico e ambiental cultivado nos tempos atuais, como sua não toxicidade, biodegradabilidade no meio ambiente, diversidade de matérias primas para produção e menor emissão de gases de escape se comparado aos combustíveis tradicionais, acredita-se que as pesquisas para difundir ainda mais o seu uso continuem sendo uma das principais tendências para o mercado energético nos próximos anos (LIN et al., 2011; MILAZZO et al., 2013; GARCEZ et al., 2009; BART et al., 2010).

Quimicamente, pode-se dizer que o biodiesel é um alquil éster de ácidos carboxílicos de cadeia longa, com potencialidade para substituir o diesel, com quem possui características semelhantes. É produzido a partir dos triacilgliceróis contidos nos óleos e/ou matérias graxas de origem animal ou vegetal que reagem na presença de álcoois e catalisador, gerando também como co-produto a glicerina. Caracteriza-se como biodiesel apenas o produto que atenda todas as especificações contidas no Regulamento Técnico 45, da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Caso a matéria prima passe pelas etapas de produção do biodiesel, porém sem confirmação de todos os parâmetros descritos no regulamento, é chamado genericamente de éster alquílico, variando o último termo dependendo do tamanho da cadeia carbônica do álcool utilizado na reação.

A fração lipídica que é utilizada como matéria prima para a produção de biodiesel se dá a partir do óleo vegetal, constituído em sua essência por triglicerídeos que reagem em presença de álcool para formação de ésteres e glicerina (MAZUBERT, 2013). A Figura 1 ilustra o mecanismo geral da reação de transesterificação.



**Figura 1.** Mecanismo da reação de transesterificação alcalina, no qual B é considerado uma base de Bronsted.

Fonte: SUAREZ et al., 2007.

Na etapa (i) da Figura 1, ocorre a reação entre o catalisador básico “B” com o álcool “R<sub>1</sub>OH” produzindo o alcóxido “R<sub>1</sub>O<sup>-</sup>” e o catalisador protonado “BH<sup>+</sup>”. Na etapa (ii) há o ataque nucleofílico do alcóxido ao grupo carbonila do triglicerídeo, formando um complexo intermediário tetraédrico, que então produz o biodiesel (éster monoalquílico) e um ânion do diglicerídeo, que, na etapa (iii), recebe um próton do catalisador e deixa de ser íon, convertendo-se em diglicerídeo, e que também restabelece o catalisador. Este, por sua vez, irá reagir com outra molécula de álcool e dará início a um novo ciclo de catálise, até que diglicerídeos e monoglicerídeos sejam convertidos em biodiesel e glicerol.

A reação de transesterificação é influenciada por uma série de variáveis, que podem englobar o tipo e quantidade de catalisador utilizado, tipo de álcool, razão molar álcool:óleo, tempo de reação, velocidade de agitação, quantidade de água presente na reação, dentre outros (YAAKOB et al., 2013; BORGES e DÍAZ, 2012; ATADASHI et al., 2012; ATABANI et al., 2012).

O catalisador na reação de formação do biodiesel pode ser básico ou ácido, homogêneo ou heterogêneo, ou ainda podem-se ter enzimas que atuam como catalisadoras. Na indústria de maneira geral, os tipos básicos são os mais utilizados, principalmente pelo seu baixo custo, por serem fáceis de transportar e manusear, além de conduzirem a curtos tempos de reação (LEUNG et al., 2010; VYAS et al., 2010; HELWANI et al., 2009; SHAHID e JAMAL, 2011).

A principal desvantagem destes catalisadores (básicos) são sua sensibilidade à presença de ácidos graxos livres, que acabam por consumir catalisador e produzir uma reação secundária, denominada de saponificação, formando sabões que diminuem o rendimento reacional global. Geralmente, recomenda-se utilizar a rota

básica apenas para óleos com acidez menores que 1 mg KOH/g óleo (BANERJEE e CHAKRABORTY, 2009; CANAKCI e GERPEN, 2001).

Dentre os tipos de álcool mais comumente utilizados na reação de transesterificação encontram-se o metanol, etanol, propanol, butanol e álcool amílico. Dentre estes, os dois primeiros são usados com mais frequência, sendo que o metanol é o tipo mais utilizado principalmente em virtude do seu baixo custo e alta reatividade (MAZUBERT et al., 2013; LEUNG et al., 2010). Apesar de permitir rendimentos elevados ao final da reação, o manuseio do metanol deve ser feito de maneira cuidadosa, já que é tóxico à saúde tanto em contato pela via respiratória quanto pela via dérmica. Geralmente, mistura-se o metanol juntamente com o catalisador com fins de obter o metóxido, que age de maneira mais rápida sobre a matéria lipídica (MA et al., 2015; FAROBIE e MATSUMURA, 2015).

A partir da Lei nº 13.033/2014, a proporção de biodiesel misturado ao óleo diesel passou a ser de 7%, o que significou uma produção nacional de quase 3,5 milhões de metros cúbicos em 2014. O Rio Grande do Sul é o estado com maior representatividade produtiva de biodiesel no cenário nacional, com cerca de 28,4% do total, enquanto que, em termos regionais, o Centro-Oeste lidera esta produção, com 43,1% do todo gerado (ANP, 2015).

No Brasil, a soja representa a principal matéria prima para a produção de biodiesel, respondendo por mais de 80% do total das matérias primas utilizadas para este fim (D'AGOSTO et al., 2015). Esta planta perene contém entre 18 a 21% de óleo em suas sementes, sendo cultivadas principalmente em sistemas de monocultura de larga escala. A indústria brasileira utiliza cerca de 31 milhões de toneladas de grãos de soja por ano para gerar 23,5 milhões de toneladas de proteína e 5,8 milhões de toneladas de óleo, o que torna o país um dos maiores produtores desta cultura a nível global (BERGMAN et al., 2013). A segunda matéria prima mais utilizada é a gordura animal (19,8% do total), seguido do algodão (2,2%) e outras matérias primas graxas (ANP, 2015).

Projeções para 2020 alertam para a importância da mudança da dependência quase que exclusiva da soja para a produção de biodiesel, já que, como existe a concorrência do setor alimentício, para que houvesse atendimento ambos os mercados, aproximadamente 30 milhões de hectares a mais devem ser cultivados com esta cultura, segundo dados da CONAB (2011).

## 2.2 ETANOL

Muito antes da implantação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2004, o Brasil já havia lançado com sucesso em 1975 o ProÁlcool (Programa Nacional do Álcool), iniciativa que fez do país um dos maiores produtores e consumidores mundiais deste biocombustível. Fazendo-se uma comparação entre os períodos, no início do programa o país produzia próximo a 0,6 milhões de m<sup>3</sup> de etanol, enquanto que, na safra 2010/2011, a produção foi de aproximadamente 27,6 milhões de m<sup>3</sup> (MAPA, 2013; STATTMAN et al., 2013). Em 2014, a produção de bioetanol atingiu pouco mais de 28,5 milhões de metros cúbicos, com quase a totalidade (aproximadamente 96%) sendo utilizado para fins de transportes (BEN, 2015).

O etanol é considerado um biocombustível incolor e transparente, de fórmula química C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH. É biodegradável e pode ser produzido a partir de matérias primas amiláceas, tais como batata-doce e milho, ou de sacarinas, tais quais a cana de açúcar e beterraba (MURCAK et al., 2015; ALPTEKIN et al., 2015). Segundo definição dada pela ANP, o Etanol Combustível ou bioetanol é o produto destinado para uso em motores ciclo Otto e que possui como componente majoritário o etanol, especificado como álcool etílico anidro combustível ou etanol anidro combustível (EAC), ou então como álcool etílico hidratado ou etanol hidratado combustível (EHC). O primeiro é destinado para a mistura com a gasolina, enquanto o segundo é vendido nos postos revendedores para o consumidor final.

Uma das formas mais simples e mais difundidas para produção de etanol no Brasil é através da fermentação, na qual micro-organismos atuam na quebra de moléculas de sacarose produzindo glicose e frutose, que posteriormente são convertidas em etanol e dióxido de carbono. O uso de açúcares de cadeia curta, tal qual a sacarose, como ponto de partida do processo de fermentação para a produção de etanol é conhecido como de 1<sup>o</sup> geração. Atualmente, existem pesquisas para produção de etanol de 2<sup>o</sup> geração, no qual açúcares mais complexos, como a celulose, são quebrados até obtenção de açúcares mais simples que possam prosseguir via fermentação tradicional (RAELE et al., 2014; NOVACANA, 2016). Outros processos, como a hidratação do etileno (ZARPELON, 2010; SILVA, 2007) ou a redução do acetaldeído são outros mecanismos de

fabricação do etanol, de modo que cerca de 80% do etanol produzido nos EUA vem da hidratação do etileno (NOVACANA, 2016).

A Tabela 1 ilustra as especificações para ambos os tipos de etanol, conforme Resolução nº 19/2015 dada pela ANP. Além da diferença no teor alcoólico, o etanol anidro pode receber a incorporação de corantes, enquanto o hidratado não.

O bioetanol é comumente usado em motores ciclo Otto devido a sua elevada octanagem equivalente (ao redor de 110) em comparação a gasolina (87 em média). Possuindo cerca de 35% de oxigênio e baixa viscosidade, além de alto efeito evaporativo de arrefecimento, este biocombustível tem sido testado como alternativa para equilibrar parâmetros que excedem às normativas estabelecidas para a mistura diesel-biodiesel, além de tentar promover uma melhor combustão e diminuição dos gases de escape, especialmente de material particulado (ZHU et al., 2011; ALPTEKIN et al., 2015; DI et al., 2009; LEI et al., 2012).

**Tabela 1.** Especificações do etanol hidratado e anidro.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	EAC (ANIDRO)	EHC (HIDRATADO)
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas	Límpido e isento de impurezas
Cor	-	Laranja, após corante	Sem corantes (ausência total)
Acidez total, máx.	mg L <sup>-1</sup>	30	30
Condutividade elétrica, máx.	μS m <sup>-1</sup>	389	389
Massa específica a 20 °C	kg m <sup>-3</sup>	791,5 máx.	807,6 a 811,0
Teor alcoólico	% volume	99,6 mín.	95,1 a 96,0
	% massa	99,3 mín.	92,5 a 93,8
pH a 20 °C	-	-	6,0 a 8,0
Teor de etanol, mín.	% volume	98,0	94,5
Teor de água, máx.	% volume	0,4	4,9
Teor de metanol, máx.	% volume	0,5	0,5

Fonte: Adaptado de ANP, 2011.

As principais desvantagens deste combustível residem na sua baixa lubrificidade e potencial corrosivo, que pode danificar as partes metálicas do motor de maneira mais acelerada se comparado a gasolina (SOBRAL et al., 2009).

### **2.3 MISTURAS DIESEL-BIODIESEL-ETANOL**

Na intenção de se reduzir o consumo e os montantes gastos com a importação de diesel utilizado no setor de transportes nacional, tanto o biodiesel quanto as misturas diesel-biodiesel já representam uma realidade na tentativa de alcançar estas metas. O uso do etanol em sua forma direta, entretanto, no motor diesel, não apresenta resultados satisfatórios devido a seu baixo ponto de autoignição, viscosidade, número de cetano e lubrificidade, que não são compatíveis com as características exigidas pelo ciclo diesel (HANSEN, ZHANG e LYNE, 2006; LAPUERTA, ARMAS e HERREROS, 2008; MOON et al., 2013).

No início da década de 1980, misturas do tipo diesel-etanol (DE), também conhecidas como diesol ou e-diesel, começaram a ser pesquisadas e demonstraram ser utilizáveis não necessitando de modificações nos motores diesel da época (PIDOL et al., 2012). As principais vantagens encontradas com o uso da mistura em comparação ao diesel bruto foram a melhora das propriedades de fluxo a frio (ZOLDY, 2011), maior calor de vaporização (HULWAN e JOSHI, 2011), e redução das emissões de material particulado, que foram cerca de 15% menores comparadas ao diesel com baixo teor de enxofre e de 30 a 50%, quando a mistura foi elaborada com 10% de etanol (XING-CAI et al., 2004; ZHANG et al., 2004). Algumas das desvantagens residem na baixa miscibilidade do etanol no diesel (variável conforme a composição da cadeia carbônica do diesel, a temperatura da mistura e a concentração de água no meio), diminuição do número de cetano e interferência em diversas propriedades físico químicas, tais como a viscosidade, que diminui conforme aumenta o teor de etanol (SHAHIR et al., 2014; HERREROS et al., 2015; TORRES-JIMENEZ et al., 2009; REYES et al., 2009).

Uma das saídas apontadas para melhorar as propriedades das misturas entre etanol e diesel é o uso de aditivos emulsificantes, que impede a formação de duas fases na mistura. Entretanto, esta alternativa, apesar de trazer homogeneidade à mistura, acaba por não contemplar os demais problemas apresentados, tornando-se

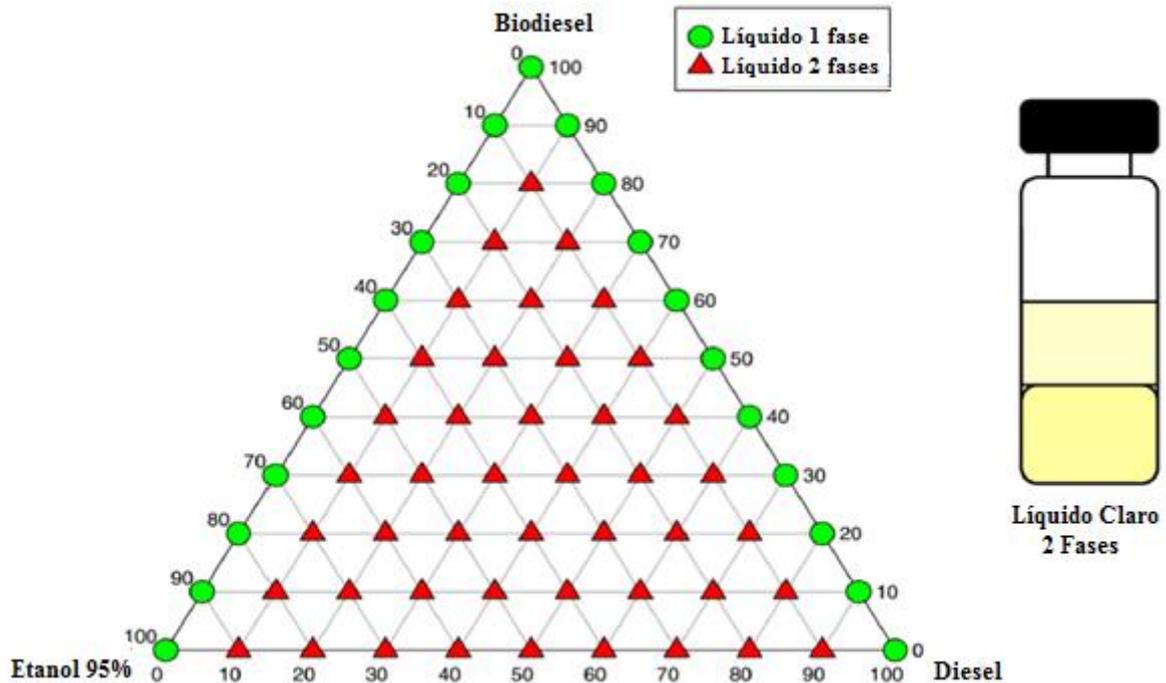
limitada até certo ponto (CAN et al., 2004; RAKOPOULOS et al., 2007). O uso do biodiesel, por sua vez, tem se mostrado como opção certa tanto para resolver questões de solubilidade da mistura DE, quanto para a melhora de praticamente todos seus aspectos físico-químicos, que inclusive apresentam-se superiores aos do diesel comum (SHAHIR et al., 2014; BARABAS e TODORUT, 2011;).

### **2.3.1 ESTABILIDADE DA MISTURA TERNÁRIA**

Dentre os principais aspectos a serem considerados na elaboração de um novo tipo de combustível com potencial de se estabelecer no mercado, destaca-se a necessidade da manutenção de sua homogeneidade a nível molecular, para que se evitem problemas de separação de fases durante o transporte e armazenagem e durante a combustão nos motores (SHAHIR et al., 2014). Na tentativa de melhorar a solubilidade entre diesel e etanol, diversas empresas, tais como Pure Energy Corporation (PEC), GE Betz e AAE Technologies lançaram aditivos capazes de estabilizar esta mistura tanto em altas como em baixas temperaturas, obtendo sucesso de acordo com seus relatórios de uso (MAREK e EVANOFF, 2001; HANSEN et al., 2001). Outros aditivos, como o tetrahidrofurano e o acetato de etila, também foram identificados como efetivos agentes solubilizantes desta mistura (MEIRING et al., 1981; LETCHER, 1980).

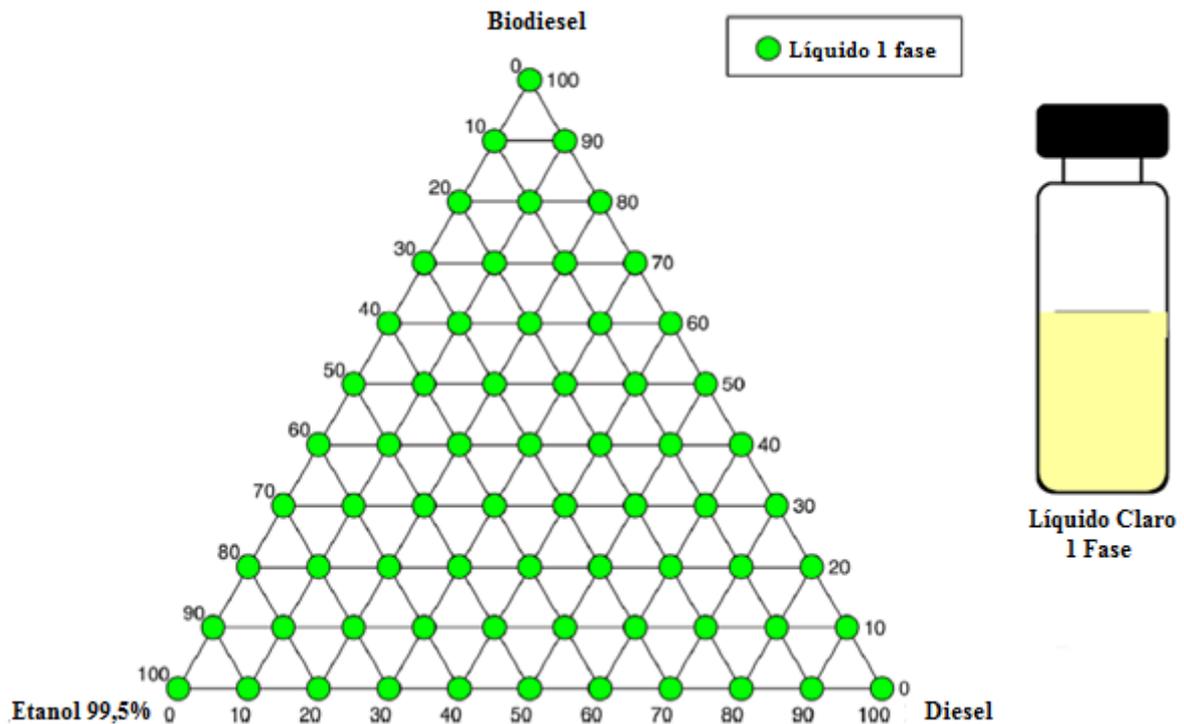
O biodiesel, por sua já incorporação a cadeia de comercialização de combustíveis e capacidade de atuar como um agente anfifílico perante misturas com diferenças de polaridade, tem sido um dos co-solventes mais pesquisados para a solubilização entre diesel e etanol. De acordo com Fernando e Hanna (2004), esta mistura ternária é estável inclusive sob temperaturas abaixo dos 0°C e detém propriedades equivalentes e até superiores as do diesel comum.

Kwanchareon et al. (2007) estudou a estabilidade do sistema diesel-biodiesel-etanol a temperatura ambiente utilizando o etanol em três concentrações distintas (95%, 99,5% e 99,9%) e biodiesel oriundo do óleo de palma. A figura 2 contém o resultado deste estudo utilizando etanol 95%.



**Figura 2.** Sistema diesel-biodiesel-etanol 95% a temperatura ambiente.  
 Fonte: Adaptado de Kwanchareon et al., 2007.

As circunferências em verde significam uma fase líquida, enquanto os triângulos em vermelho indicam a presença de duas fases líquidas. Segundo o autor, a presença de 5% de água no etanol é suficiente para impedir que o biodiesel cumpra seu papel de agente anfifílico devido a maior polaridade das moléculas de água, que acabam por interagir de maneira mais efetiva com as moléculas de etanol que o próprio biodiesel. Desta forma, o uso de etanol a 95% não é capaz de formar uma mistura estável com diesel e etanol, independente da proporção de cada elemento. Por sua vez, quando este álcool possui apenas 0,5% de água ou menos, a mistura ternária mantém-se em uma única fase, de modo que o biodiesel consegue formar micelas (estruturas de interação para moléculas com diferentes polaridades) capazes de unir as moléculas do diesel e etanol para qualquer proporção de mistura, conforme esquema representado na Figura 3.



**Figura 3.** Sistema Diesel-Biodiesel-Etanol 99,5% a temperatura ambiente.  
 Fonte: Adaptado de Kwanchareon et al., 2007.

Resultados semelhantes ao autor supracitado foram encontrados por Rahimi et al. (2009) que, ao adicionar 8% de biodiesel não observou nenhuma separação de fases, inclusive a baixas temperaturas próximas do ponto de fluidez do diesel. Guarieiro et al. (2009) testou a solubilidade entre misturas diesel-etanol com adição de biodiesel de soja, mamona e de óleo residual, relatando uma homogeneidade nas misturas com todos os biodieseis testados mesmo após 90 dias de observação.

### 2.3.2 PONTO DE FULGOR

O ponto de fulgor pode ser definido como a menor temperatura na qual o combustível é capaz de formar uma mistura inflamável com o ar, na qual maiores temperaturas indicam uma maior segurança nas operações de transporte e armazenamento do combustível (SHAHIR et al., 2014; AL-ABDULLAH et al., 2015). De acordo com as resoluções ANP nº 45/2014, nº 69/2014, as temperaturas de ponto de fulgor do biodiesel e do diesel devem ser, respectivamente de 100 °C (mínimo) e 38 °C (mínimo). A do etanol, segundo Shahir et al. (2014), deve ser menor do que 16° C.

Kwanchareon et al. (2007) estudou o ponto de fulgor de misturas diesel-etanol e com posterior acréscimo de biodiesel, encontrando valores de temperatura próximos aos do etanol. Barabás et al. (2010) endossa esta conclusão ao obter valores de ponto de fulgor abaixo da temperatura ambiente para todas as misturas diesel-biodiesel-etanol testadas, variando entre 16 a 18 °C para as misturas com até 5% de etanol e para menos de 16 °C quando esta porcentagem foi ultrapassada.

Desta forma, nota-se que o ponto de fulgor das misturas entre diesel-biodiesel-etanol é controlada pela proporção de etanol que a mistura contém, não importando o tipo de biodiesel presente, sendo que os riscos de manuseio e transporte a serem seguidos devem ser similares aos da gasolina (CHOTWICHIEEN et al., 2009).

### **2.3.3 PONTO DE ENTUPIMENTO DE FILTRO A FRIO (PEFF)**

O PEFF é um dos mais importantes aspectos, junto ao ponto de fluidez e ponto de névoa, para a determinação das propriedades a frio do diesel e suas misturas (WU et al., 2006). O biodiesel possui suas propriedades de PEFF atreladas a matéria prima que lhe deu origem, e está estreitamente relacionado a quantidade de cadeias saturadas que o compõe (ECHIM et al., 2012; RAMOS et al., 2009).

Barabás e colaboradores (2010) estudaram, dentre outras propriedades, o PEFF de misturas D70B25E5, D85B10E5 e D80B10E10, observando que ambas as misturas com 5% de etanol obtiveram o mesmo resultado, de -17°C, enquanto que 10% de etanol resultou em -6°C. Este aumento se deveu, segundo os autores, devido a baixa miscibilidade do etanol, o que acaba por restringir seu uso em baixas temperaturas.

Mofijur et al. (2016) relataram diversos PEFF baseado em trabalhos de outros autores, encontrando-se valores que variam de -18°C a -13°C para misturas com 5% de etanol e de -7°C a -4°C para 10%, corroborando com o encontrado por Barabás et al. (2010). As diferenças na faixa de valor mencionada acima devem-se as diferentes concentrações de diesel e biodiesel na mistura.

### **2.3.4 PODER CALORÍFICO**

O poder calorífico de um combustível pode ser definido como o montante de calor liberado durante a combustão quando uma determinada quantidade de

combustível é queimada (KANNAN et al., 2012). Tanto o biodiesel quanto o etanol possuem poder calorífico inferior ao diesel tipo “A”, de modo que ambos necessitam de uma maior quantidade de massa para liberar o mesmo montante de energia, aumentando, de certa forma, o consumo específico quanto mais a mistura contenha estes biocombustíveis (CAETANO et al., 2004; PUQUEVICZ et al., 2008). O poder calorífico pode ser dado em duas formas, denominadas de Poder Calorífico Superior (PCS) ou Poder Calorífico Inferior (PCI). O primeiro refere-se ao calor liberado pela combustão do combustível com a água em estado condensado, e pode ser medido por bombas calorimétricas, enquanto o segundo é o calor liberado da queima do combustível estando toda a água no estado gasoso, fornecendo efetivamente a energia disponível por unidade de massa de combustível já que as perdas com a evaporação de água já estão deduzidas (SHENG e AZEVEDO, 2005; FASSINOU et al., 2010; QUIRINO et al., 2005).

Kannan et al. (2012) realizaram trabalhos com misturas entre biodiesel de pinhão manso, etanol e diesel, encontrando valores de poder calorífico das misturas em relação ao diesel, muito em virtude dos menores valores de PCI encontrados no etanol e no biodiesel frente ao diesel.

Kwanchareon et al. (2007) trabalhou com misturas binárias e ternárias entre diesel, biodiesel e etanol em diversas porcentagens, concluindo que misturas com menos de 10% de etanol possuíam um poder calorífico muito similar ao do diesel.

Tse et al. (2015) preparou quatro misturas ternárias, denominadas DBE0 (80% diesel, 15% biodiesel, 0% etanol), DBE5 (80% diesel; 15% biodiesel; 5% etanol), DBE10 (75% diesel, 15% biodiesel, 10% etanol) e DBE20 (65% diesel, 15% biodiesel, 20% etanol), trabalhando com motor diesel 4 cilindros e com injeção direta de combustível, sob cinco diferentes cargas e a uma velocidade constante de 1800 rpm. Os resultados encontrados foram maiores valores de consumo de combustível em função do valor decrescente de poder calorífico inferior, conforme aumentava-se o teor de biocombustíveis no diesel.

### **2.3.5 DENSIDADE**

Barabás et al. (2010) afirmam que a densidade é uma propriedade do combustível com efeitos diretos no desempenho do motor, de modo que várias propriedades, como o número de cetano e poder calorífico estão relacionadas a esta

propriedade que influencia a eficiência da atomização e a combustão do combustível.

Kwanchareon et al. (2007) preparou diversas misturas entre diesel, biodiesel e etanol, na qual constatou-se uma relação inversamente proporcional com a concentração de etanol na mistura, de modo que quanto maior a porcentagem de etanol, menor era a densidade. O contrário ocorreu com o acréscimo de biodiesel, com o qual se estabeleceu uma relação proporcionalmente direta. Neste quesito, houve variação entre 0,8247 (D85B0E15) e 0,8417 g ml<sup>-1</sup> (D85B15E0).

Park et al. (2013) conduziu experimentos em que a porcentagem de etanol era mantida fixa em 20%, variando as porcentagens entre diesel e biodiesel. Os pesquisadores conduziram todos os ensaios a 15°C, e, assim como Kwanchareon et al. (2007), encontrou diminuição da densidade com o acréscimo de etanol, e sua subida com a adição de biodiesel, de maneira que uma mistura contendo 60% de diesel, 20% de biodiesel e 20% de etanol foi mais densa que o diesel.

Alptekin et al. (2015) elaborou misturas DBE a partir de óleo de frango residual (CF) e gordura animal geral residuária (FOB), com 5, 10 e 15% de etanol. A densidade, medida a 15°C, foi maior para a mistura CFBE5 (5% de etanol, 20% de biodiesel), com 837.7 Kg m<sup>-3</sup> e menor para FOBE20 (20% de etanol, 20% de biodiesel), com 829.1 Kg m<sup>-3</sup>.

### **2.3.6 VISCOSIDADE**

A viscosidade é uma das mais importantes características do combustível, já que afeta as condições de injeção dos sistemas especialmente em baixas temperaturas, quando a fluidez do combustível é baixa (BARABÁS et al., 2010). Esta propriedade também influencia na capacidade de lubrificação, protegendo bombas de combustível e demais superfícies metálicas (BARABÁS et al., 2010, RAHIMI et al., 2009).

De acordo com Shahir et al. (2014), para cada motor há um limite superior e outro inferior de viscosidade para que o combustível trabalhe adequadamente. Uma viscosidade muito baixa poderia causar vazamento de combustível nos sistemas de injeção por formar gotas muito pequenas, que acabam por aumentar a superfície de contato e facilitar a evaporação. Já viscosidades muito elevadas podem provocar

atomização insuficiente e combustão incompleta, maior demanda de energia pela bomba de combustível e redução da fluidez em condições frias.

Alptekin et al. (2015) elaborou misturas DBE a partir de óleo de frango residual (CF) e gordura animal geral residuária (FOB), com 5, 10 e 15% de etanol. As maiores medidas de viscosidade ficaram para as misturas com 5% de etanol, sendo de  $2,9 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ , e a menor foi registrada para a mistura FOBE20, com  $2,3 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Park et al. (2012) trabalharam com a incorporação de biodiesel às misturas entre diesel-etanol, em que a porcentagem de etanol foi mantida constante a 20% em volume. Os pesquisadores constataram que a viscosidade cinemática aumenta significativamente quando ocorre a adição de biodiesel. Zoldy (2011) preparou diversas misturas ternárias entre diesel-biodiesel-etanol, e de acordo com seus resultados, a viscosidade final destas misturas não se afastam muito das apresentadas pelo diesel. Este autor ainda encontrou uma fórmula pela qual pode-se descobrir a viscosidade final da mistura ternária a partir da viscosidade individual de seus componentes, ao analisar a viscosidade entre 30 e 60°C. Esta fórmula é mostrada na Equação 1:

$$\eta_{kev} = (2n_e \eta_e + 3n_{bd} \eta_{bd} + n_g \eta_g + 0,71) 0,91$$

**Equação 1.** Determinação da viscosidade entre 30 e 60 °C para mistura diesel-biodiesel-etanol a partir de seus componentes individuais.

Na qual  $\eta_{kev}$  é a viscosidade da mistura;  $n_i$  é a razão dos componentes (e – etanol, bd – biodiesel, g – diesel);  $\eta_i$  é a viscosidade dos componentes (e – etanol, bd – biodiesel, g – diesel).

### 2.3.7 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Ao considerar a ocorrência de uma combustão completa, os combustíveis tradicionalmente utilizados na frota automotiva nacional tem seus átomos de carbono e hidrogênio oxidados, liberando para o ar dióxido de carbono, água e energia na forma de calor. Porém, alguns fatores como a relação ar:combustível distante da estequiometria ideal, temperaturas de combustão muito elevadas ou baixas e impurezas no combustível podem levar a formação de produtos poluidores do ar, tais quais os óxidos de nitrogênio e enxofre, hidrocarbonetos, materiais particulados e monóxido de carbono (CAPANA, 2008).

O motor diesel, principal motor utilizado nas aplicações de transporte de carga, navios e geradores muito em função de sua robustez e alta geração de torque, tem sido objeto de grande avanço nos últimos anos, principalmente a partir da década de 70. As mais significativas mudanças ocorreram com a utilização de novos materiais e implantação do sistema de gerenciamento eletrônico, muito em virtude de atender as exigências ambientais e angariar reduções no consumo de combustível (GOMES, 2008; CAPANA, 2008).

Os programas ambientais foram de suma importância na evolução dos motores a diesel para a redução da emissão de poluentes. A sétima etapa da Proconve (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), que exige que caminhões saiam de fábrica já equipados com sistemas para reduzir a poluição, entrou em vigor no Brasil em 2012, e já foi responsável pela redução de 88% dos níveis de monóxido de carbono, 87% dos níveis de óxido de nitrogênio e de cerca de 50 vezes o volume de emissão de material particulado, considerando a primeira etapa do projeto, implantado em 1986. Este programa é baseado no modelo europeu de emissão, o Euro, que atualmente se encontra na fase Euro 6, porém o Proconve atual brasileiro (sétima etapa) é parametrizado com a fase Euro 5, não existindo ainda previsões de uma nova etapa relacionada ao Euro 6 (CUMMINS, 2016; INSTITUTO DE ENGENHARIA, 2012).

Entretanto, ainda existem melhorias que devem ser realizadas para diminuir as emissões de fuligem, partículas e demais gases, de modo que a investigação de sistemas catalíticos, dos projetos de motores e novos combustíveis são necessárias na busca deste objetivo. A utilização de compostos oxigenados, como o álcool, junto ao diesel, ainda é tido como uma das melhores formas de se conseguir resultados positivos na redução de alguns materiais poluentes (YOGI, 2007).

#### **2.3.7.1 EMISSÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)**

A formação do monóxido de carbono (CO) nas reações de combustão veiculares está atrelada a insuficiência do comburente presente no ar atmosférico e a consequente oxidação incompleta dos átomos de carbono do combustível utilizado, de modo que pode ser causada por uma série de fatores. A adição do etanol à mistura diesel-biodiesel possui um efeito duplo com relação as emissões de CO. De um lado, aumenta a concentração de oxigênio na mistura, levando a uma

queima mais completa e diminuição destas emissões. De outro, devido ao seu alto calor latente de vaporização (cerca de duas vezes e meio maior que o da gasolina), menor poder calorífico em comparação ao diesel e baixa capacidade de autoignição levam a um aumento da emissão de CO (GUARIEIRO et al., 2009; LI et al., 2005; RAHIMI et al., 2009; RANDAZO e SODRÉ, 2011; BHALE et al., 2009). Desta forma, as avaliações das emissões de monóxido de carbono estão diretamente ligadas a porcentagem de cada combustível na mistura, o tipo de biodiesel e as características operacionais dos testes realizados (SHAHIR et al., 2015).

Labeckas et al. (2014) conduziram um estudo no qual a mistura D80B5E15 (80% de diesel, 5% de biodiesel de colza e 15% de etanol) foi submetida a ensaio em motor diesel a diferentes cargas e velocidades de rotação (1400, 1800 e 2200 rpm). Os resultados mostraram que o nível de CO decaiu 3,9% em 1400 rpm quando comparados ao diesel, mas aumentou 14,7% e 1% com 1800 e 2200 rpm, respectivamente. Ferreira et al. (2013), operou um grupo motor-gerador elétrico a 1800 rpm adicionando misturas D70B30E5, D70B30E9 e D70B30E15, no qual observaram um aumento das emissões de CO conforme o aumento da concentração de etanol na mistura.

Já Guarieiro et al. (2009) testou a mistura D80B5E15 a partir de biodiesel de soja, mamona e residual em motor diesel a velocidades de 1800 e 2000 rpm e cargas de 2, 4, 6 e 8 kW. Seus resultados indicaram que, a baixas cargas (2 kW), as emissões aumentaram entre 50 a 140%, 90 a 220% e 60 a 180% para as misturas com soja, mamona e óleo residual, respectivamente. Já em carga média, para as mesmas sequências de biodieseis, as emissões aumentaram entre 30 a 60%, 50 a 90% e 40 a 80%. As mudanças ocorreram com operação em cargas altas, onde houve diminuição do CO de até 10% com o biodiesel de soja e de até 20% com o biodiesel de mamona, apenas diferindo com o biodiesel de óleo residual, que aumentou as emissões em 10 até 30% quando comparados ao diesel.

Kwanchareon et al. (2007) testou inúmeras misturas DBE, com o álcool etílico variando de 0 a 15%, biodiesel de óleo de palma e mantendo a quantidade de diesel acima de 80%. O motor diesel foi conectado a um gerador e aplicou-se cargas de 0 A, 3 A, 6 A e 10 A. Para as misturas D90B5E5, D85B10E5, D85B5E10, D80B10E10 e D80B5E15, e considerando a aplicação de cargas baixas e médias, não houveram diferenças significativas de emissões de CO em comparação ao diesel. Já para as

cargas elevadas, diminuiu-se de 40-46%, 20 a 25%, 45-50%, 62-67%, 55-60% e 58-62% as emissões de CO respectivamente às misturas supracitadas. Subbaiah et al. (2010) testou, em condições similares a do autor anterior, misturas D80B10E10 e D75B10E15, de modo que para média carga, não observou diferenças significativas em relação às liberações de CO. Para baixas cargas, observou redução, em ambas as misturas, entre 1 a 4% e para altas cargas, diminuição variável entre 50 a 55% e 52 a 58%, respectivamente.

Já Bhale et al. (2009), aplicou em motor a 1500 rpm com diferentes cargas, mistura com 80% de biodiesel de uma espécie nativa da Índia, denominada *Madhuca Indica*, 10% de etanol e igual quantidade de diesel, obtendo reduções de 34 a 43% nas emissões de monóxido de carbono considerando todas as faixas de carga aplicadas. Barabás e Todorut (2011), de igual modo, observaram reduções em todas as cargas aplicadas ao motor com D70B25E5, as quais foram de 10-15%, 42-48% e 33-38% para baixas, médias e altas cargas, respectivamente. Em linhas gerais, nota-se que as emissões de CO variam muito conforme as características operacionais do motor e das concentrações das misturas, tendo-se um máximo de 220% a mais de liberação do gás com o motor operando a baixa carga. Além disso, a maior parte das altas emissões de CO verificadas nas misturas DBE ocorrem com concentrações acima de 15%, de modo que na tentativa de equilibrar ou se diminuir o monóxido de carbono, deve-se manter em baixa a quantidade de álcool na mistura.

Alternativas no campo da nanotecnologia estão sendo desenvolvidas para auxiliar na diminuição dos lançamentos de CO na atmosfera. O acréscimo de nanopartículas de óxido de cério na mistura DBE e no diesel comum foram capazes de reduzir significativamente as emissões tanto de CO quanto da fuligem, além de diminuir os NO<sub>x</sub> (SELVAN et al., 2009; SHAAFI et al., 2015).

### **2.3.7.2 EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO<sub>x</sub>)**

A emissão de gases nitrogenados é um dos principais problemas dos motores de combustão interna. Dependente de fatores atrelados ao funcionamento do motor, como a temperatura interna do cilindro e tempo de residência do combustível na câmara de combustão, os NO<sub>x</sub> também podem ter influência advindas da concentração de oxigênio do combustível, sua densidade, número de cetano ou

presença de componentes aromáticos. Em se tratando de misturas oxigenadas, como é o caso da mistura DBE, as adições de etanol e biodiesel ao diesel possuem efeitos favoráveis e adversos à formação de  $\text{NO}_x$ . No caso do etanol, seu alto efeito de arrefecimento evaporativo conduz a uma reação com menor temperatura na câmara de combustão, favorecendo a redução de gases nitrogenados, entretanto, ao retardar a ignição da mistura devido ao seu baixo número de cetano, induz a um aumento do número de  $\text{NO}_x$ . Para o biodiesel, seu alto número de cetano compensa o etanol, porém dependendo de sua densidade pode retardar a injeção de combustível dentro do motor, desfavorecendo a relação estequiométrica ar:combustível (SHAHIR et al., 2015; AJAV et al., 1998; XING-CAI et al., 2004; RAKOPOULOS et al., 2015; D'AMBROSIO et al., 2014).

Yilmaz (2012) testou misturas B40E20D40 e B45E10D45 em motor diesel, comparando os parâmetros testados com misturas elaboradas com metanol e também com diesel comercial. Para o autor, houve menor emissão de  $\text{NO}_x$  nas duas misturas testadas quando comparadas ao diesel, mas que houve um aumento na emissão deste gás conforme o incremento de carga imposta ao motor. Shi et al. (2006) avaliaram as emissões, em motor diesel Cummins-4B, de DBE elaboradas com biodiesel de soja e na proporção D75B20E5, no qual observaram um aumento nas emissões de 2 a 14% na rotação de 1800 rpm com carga máxima constante.

Já Kwanchareon et al. (2007), verificaram que a liberação de  $\text{NO}_x$ , em comparação aos liberados na combustão do diesel comum, permaneceu muito elevado com todas as misturas testadas quando o motor operou com a carga máxima (continham mais de 80% de diesel, pelo menos, e liberaram, no mínimo, 180% a mais de gases nitrogenados), de modo que o maior valor correspondeu à mistura com 5% de etanol e biodiesel (acrécimo de 192 a 196%). Quando o motor operou com carga baixa, as misturas D90B5E5, D85B10E5, D85B5E10 apresentaram os melhores resultados, mantendo as emissões no mesmo patamar que as do diesel. Conclusões semelhantes foram obtidas por Barabás e Todorut (2011) com as mesmas proporções anteriores. Subbaiah et al. (2010), para a mistura com 80% de diesel, 10% de biodiesel e etanol, também encontrou valores maiores que 100% para o motor operando com alta carga quando comparado ao trabalho citado no início deste parágrafo, assim como para mistura D75B10E15, que

forneceu valores entre 14 a 22% para média e baixa carga e entre 128-133% para altas cargas.

Uma das alternativas para a redução das emissões dos compostos nitrogenados é a inserção de redutores catalíticos. He e Yu (2005) e Shi et al. (2006) observaram que o catalisador composto de prata e alumina ligados a etanol ( $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -etanol) foram capazes de reduzir tanto as emissões de  $\text{NO}_x$  quanto de material particulado. Shi et al., (2008), ao utilizar o catalisador anterior, conseguiu 73% de diminuição das emissões de gases nitrogenados. O autor também testou catalisadores de prata/alumina + cobre/dióxido de titânio e prata/alumina + cobre/dióxido de titânio + platina, obtendo 71 e 61% de redução, respectivamente.

### **2.3.7.3 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO ( $\text{CO}_2$ )**

O dióxido de carbono é um gás naturalmente encontrado na atmosfera e habitual do processo de combustão. Com relação aos trabalhos envolvendo as misturas ternárias entre diesel-biodiesel-etanol, Barabás et al. (2010) observou um aumento da emissão deste gás com o motor operando tanto em baixa, quanto em média e alta carga, mesmo resultado obtido por Hulwan e colaboradores (2011). Uma explicação dada pelos autores para este fenômeno, é que possivelmente estaria ocorrendo uma oxidação mais completa do monóxido de carbono, o que estaria levando a uma combustão mais próxima da estequiometria ideal.

Khoobakht et al. (2016) analisou a influência das cargas, velocidades e níveis de mistura de biodiesel e etanol ao diesel nas emissões de compostos característicos do motor por compressão interna. Os autores utilizaram uma ferramenta estatística denominada de Planejamento de Experimentos (DOE), baseado no Experimento de Composto Central (CCRD), com o qual conseguiram prever os parâmetros de emissão de  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ , hidrocarbonetos totais e opacidade da fumaça. Os resultados indicaram que o biodiesel e etanol tem a capacidade de reduzir as emissões de CO, hidrocarbonetos e a opacidade da fumaça, incrementando as emissões de  $\text{CO}_2$  o que indica uma queima de melhor qualidade. A combinação de fatores que resultou em uma menor emissão relativa de todos os componentes ocorreu quando o motor operou com 80% da carga máxima, velocidade de 2800 rpm e com uma mistura entre 26% de biodiesel, 11% de etanol e 63% de diesel.

### 2.3.7.4 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO<sub>2</sub>)

Advindo de combustíveis com presença de enxofre em sua composição, como o diesel mineral, as emissões de compostos de enxofre podem provocar danos ao motor, ao meio ambiente e à saúde humana. Com relação ao motor, a formação de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) a partir da combinação de SO<sub>3</sub> com água pode corroer as partes metálicas presentes no mesmo; para o segundo, a formação do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> contribui para a formação da chuva ácida, além de poder provocar arraste de metais pesados do solo para lagos e rios; já em se tratando da saúde humana, pode agravar os sintomas de asma e aumentar casos de internações hospitalares decorrentes de problemas respiratórios (MMA, 2016; SILVA et al., 2013).

A Resolução CONAMA nº 03 de 28/06/90, ainda vigente, estabelece padrões nacionais de qualidade do ar para aqueles poluentes que, em certas concentrações, podem afetar a saúde, a segurança e o bem estar da população, além do potencial dano ao meio ambiente. A Resolução define padrões primários e secundários da qualidade do ar. Os Padrões Primários de Qualidade do Ar são poluentes que, ao ultrapassarem determinadas concentrações, podem afetar a saúde da população. Já os Padrões Secundários, conforme dita a Resolução, “*são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral*”.

O dióxido de enxofre possui determinados padrões de emissão conforme pode ser visualizado na Tabela 2. Os valores em µg m<sup>-3</sup>, fornecidos pela resolução nº 3/90, foram convertidos em partes por milhão (ppm), para estarem em consonância com a unidade utilizada no trabalho.

**Tabela 2.** Valores dos Padrões Primários e Secundários de emissão para o SO<sub>2</sub>.

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário		Padrão Secundário	
		µg m <sup>-3</sup>	ppm	µg m <sup>-3</sup>	ppm
SO <sub>2</sub>	24 horas (1)	365	0,139	100	0,0382
	MAA (2)	80	0,0305	40	0,0153

(1): Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano; (2): Média Aritmética Anual.  
Fonte: Adaptado de MMA, 1990.

De acordo com Lôbo et al. (2009), o diesel com baixo teor de enxofre apresenta uma lubricidade menor em função do processo de dessulfurização, que

acaba levando consigo compostos de nitrogênio e oxigênio, sendo, porém, esta deficiência corrigida com o acréscimo de biodiesel por este possuir uma alta lubricidade. O enxofre presente no biodiesel, assim como outros minerais, tais quais o cálcio, magnésio e fósforo, são oriundos da matéria prima escolhida.

Já a presença de enxofre no biodiesel apresenta visões distintas na literatura. Lôbo et al. (2009) afirmam que o enxofre é presente no biodiesel assim como outros minerais, tais quais o cálcio, magnésio e fósforo, sendo oriundos da matéria prima escolhida. He (2016) afirma que o biodiesel contém enxofre em pouca quantidade, sendo isso uma vantagem para motores que operam com sistemas de pós tratamento de emissões de óxidos de nitrogênio, como a Redução Catalítica Seletiva (SCR). Baskar e Aiswarya (2016) e Jiaqiang et al. (2016) corroboram com He (2016) ao afirmar que o biodiesel vendido contém traços de enxofre. Outros autores, entretanto, como Guarieiro e Guarieiro (2013), Brieu (2009), Kumar e Rehman (2016) relatam que o biodiesel é ausente deste elemento. Trabalhos da literatura como os de Gauer (2009) e Miranda et al. (2013), porém, admitem emissões de dióxido de enxofre a partir da combustão em motor diesel de biodiesel puro (B100), relatando a presença, mesmo que mínima, deste elemento no biocombustível.

Os trabalhos relativos às emissões de SO<sub>2</sub> das misturas ternárias diesel-biodiesel-etanol são muito escassos. A literatura sobre o assunto aborda com mais frequência nos trabalhos experimentais os gases já discriminados nos tópicos anteriores.

Segundo Guarieiro e Guarieiro (2013), o biodiesel é um biocombustível livre de enxofre e que contribui para reduzir o problema da chuva ácida, parcialmente provocada pelas emissões de poluentes provindas da queima de combustíveis. Estes autores ainda citam que muitas literaturas indicam uma diminuição da liberação de compostos de enxofre e outros gases do processo de combustão do biodiesel e etanol.

Bhuiya et al. (2016) concluíram que, em misturas diesel-biodiesel, a adição crescente de biodiesel reduz as emissões de hidrocarbonetos, material particulado, SO<sub>2</sub> e CO, enquanto aumenta a emissão de NO<sub>x</sub>. Can et al. (2004) mostrou que a adição de etanol ao diesel, quando operado em motor de ignição por compressão 4 cilindros e trabalhando em carga máxima, reduz as emissões de SO<sub>2</sub>, CO e particulados, enquanto aumenta as emissões de NO<sub>x</sub>.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO GERAL DO ESTUDO

Para a realização da parte experimental deste trabalho foram utilizados os laboratórios de Biocombustíveis e Laboratório de Máquinas Agrícolas (LAMA), ambos pertencentes a Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus Cascavel*, localizada na latitude 24° 59' Sul, longitude 53° 26' Oeste e 682 metros de altitude, com as atividades experimentais ocorrendo durante o 2º semestre de 2015.

Na realização dos ensaios de desempenho do conjunto motor gerador, assim como os ensaios físico-químicos, os tratamentos utilizados, que podem ser visualizados na Tabela 2, foram o diesel tipo “A” (diesel sem adição de biodiesel, utilizado como parâmetro comparativo), o B7 (adquirido em posto local), misturas diesel-biodiesel B10, B15 e B20 elaboradas com biodiesel composto de 70% de óleo de soja, 28% de gordura bovina e 2% de gordura de porco, e misturas diesel-biodiesel-etanol, possuindo o etanol anidro apenas 0,4% de água. Para cada mistura diesel-biodiesel, incluindo-se o B7, acrescentou-se 1%, 5%, 10% e 15% de etanol anidro, de modo que o motor, para cada tratamento, trabalhou com alternância de cargas.

É importante salientar que as misturas diesel-biodiesel testadas no motor e que serviram de base para o acréscimo das respectivas quantidades de etanol anidro foram baseadas na formulação comercializada atualmente (B7), nas projeções previstas pelo Projeto de Lei do Senado 613/2015, em que se incluem a implantação do B10 após 12 meses da promulgação da lei e da validação dos testes para o B15 após 36 meses de sua promulgação, além do contido no inciso I do artigo 1º da Resolução CNPE nº 3 de 2015, em que autoriza a comercialização e o uso voluntário de 20% de biodiesel ao diesel para frotas cativas ou consumidores rodoviários.

O regime de cargas imposto ao conjunto motor-gerador para cada mistura ilustrada na Tabela 3 foi de 1, 2, 3, 4 e 5 kW, estabelecendo um total de 5 cargas resistivas. Cada ensaio foi feito em triplicata, com duração de 1 minuto por repetição.

**Tabela 3.** Simbologia de cada tratamento e as porcentagens de cada combustível.

Tratamento	% Diesel	% Biodiesel	% Etanol
B0	100	-	-
B7	93	7	-
B10	90	10	-
B15	85	15	-
B20	80	20	-
B7E1	92	7	1
B7E5	88	7	5
B7E10	83	7	10
B7E15	78	7	15
B10E1	89	10	1
B10E5	85	10	5
B10E10	80	10	10
B10E15	75	10	15
B15E1	84	15	1
B15E5	80	15	5
B15E10	75	15	10
B15E15	70	15	15
B20E1	79	20	1
B20E5	75	20	5
B20E10	70	20	10
B20E15	65	20	15

Para o estudo econômico, apenas considerou-se os preços fornecidos pelos fabricantes ou distribuidores para cada combustível individualmente, estabelecendo o preço para as misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol de acordo com a porcentagem de cada combustível nas respectivas misturas. Esta análise é meramente simbólica, já que, para uma análise mais aprofundada, devem ser realizados estudos de estabilidade para a checagem da necessidade ou não da adição de algum estabilizante para as misturas, levando-se em conta o clima local e recipientes de armazenagem e transporte.

### 3.2 COMBUSTÍVEIS

Dentre os combustíveis utilizados nos ensaios do conjunto motor gerador e análises físico químicas, o biodiesel foi adquirido em uma das usinas situadas no estado do Paraná, o etanol anidro foi obtido através de uma distribuidora de combustíveis do município de Cascavel, enquanto o diesel tipo “A” foi conseguido através de uma *trading* localizada em Sarandi, no norte do Estado.

### **3.2.1 ETANOL**

O etanol anidro utilizado no experimento possui concentração de 99,6% p/p.

### **3.2.2 BIODIESEL**

O biodiesel utilizado era constituído de 70% de óleo de soja, 28% de gordura bovina e 2% de gordura de porco, sem nenhuma adição de aditivos. A especificação dada pelo fabricante para o biocombustível pode ser visualizada na Tabela 4. Os parâmetros referentes a Cinzas Sulfatadas e Corrosividade ao Cobre a 3h e 50 °C não foram realizados pois são analisados a cada trimestre civil, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no semestre. Já o parâmetro Metanol não é realizado quando a análise de Ponto de Fulgor resulta em valor superior a 130 °C, segundo informações dadas pelo fabricante e que constam na Resolução nº 45/2014 da ANP.

### **3.2.3 ÓLEO DIESEL TIPO “A”**

O óleo diesel S500 (até 500 ppm de enxofre) e sem adição de biodiesel foi utilizado como parâmetro de comparação com as misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol, por não possuir qualquer acréscimo de outro combustível em sua composição.

## **3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA**

As análises físico químicas, realizadas para todas as misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol e também para os combustíveis em separado, buscaram trazer maiores detalhes do comportamento do conjunto motor-gerador operando com cada formulação de combustível, e foram selecionadas de acordo com a busca na literatura das análises que com mais frequência apareciam em experimentos semelhantes ao presente trabalho e da disponibilidade de equipamentos para realizá-los. Desta forma, o Poder Calorífico Superior (PCS), a viscosidade e a densidade foram determinados.

**Tabela 4.** Informações do Biodiesel utilizado nos testes

<b>Ítem Analítico</b>	<b>Método</b>	<b>Especificação</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>
Aspecto	PE-CQ-MVA-001	Límpido e isento de impurezas	-	Confere, a 30 °C
Massa Específica a 20 °C	ASTM D 4052	850 a 900	kg m <sup>-3</sup>	879,2
Viscosidade Cinemática a 40 °C	ASTM D 445	3,0 a 6,0	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	4,116
Teor de Água	ASTM D 6304	máx. 200,0	mg kg <sup>-1</sup>	175,9
Contaminação Total	EN 12662	máx. 24	mg kg <sup>-1</sup>	9,7
Ponto de Fulgor	ASTM D 93	mín. 100,0	°C	143,5
Teor de Éster	EN 14103	mín. 96,5	% massa	97,6
Cinzas Sulfatadas	ASTM D 874	máx. 0,020	% massa	NN
Enxofre Total	ASTM D 5453	máx. 10	mg kg <sup>-1</sup>	4,8
Sódio + Potássio	NBR 15553	máx. 5	mg kg <sup>-1</sup>	3,4
Cálcio + Magnésio	NBR 15553	máx. 5	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,2556
Fósforo	NBR 15553	máx. 10	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,0197
Corrosividade ao Cobre a 3h e 50 °C	ASTM D 130	máx. 1	-	NN
Ponto de Entupimento de Filtro a Frio	ASTM D 6371	*	°C	5
Índice de Acidez	ASTM D 664	máx. 0,50	mg g <sup>-1</sup>	0,5
Glicerina Livre	ASTM D 6584	máx. 0,02	% massa	0,007
Glicerina Total	ASTM D 6584	máx. 0,25	% massa	0,184
Monoglicerídeos	ASTM D 6584	máx. 0,7	% massa	0,542
Diglicerídeos	ASTM D 6584	máx. 0,20	% massa	0,158
Triglicerídeos	ASTM D 6584	máx. 0,20	% massa	0,128
Metanol	EN 14110	máx. 0,20	% massa	NN
Índice de Iodo	EN 14111	anotar	% massa	111
Estabilidade a Oxidação a 110 °C	EN 14112	mín. 8	horas	8,7

Fonte: Dados do fabricante

### 3.3.1 PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)

Na determinação do Poder Calorífico Inferior (PCI) analisou-se previamente o Poder Calorífico Superior (PCS), no qual utilizou-se o calorímetro isotérmico

modelo e2K. Foram pesados cerca de 0,5000 gramas da amostra, em balança com quatro casas decimais, no interior do cadinho metálico, sendo este colocado sobre o suporte interno do vaso calorimétrico. Prendeu-se na resistência do sistema (conforme mostra a Figura 4B) um fio de algodão que foi imerso na amostra. Após este procedimento, a bomba calorimétrica foi pressurizada a 3 MPa com oxigênio e deu-se início a medição do poder calorífico. Cada medição foi realizada em duplicata, e o resultado expresso em MJ kg<sup>-1</sup>. Ao final de todas as análises, realizou-se a medição do poder calorífico do ácido benzóico, que possui poder calorífico já determinado pelo fabricante, para fins de aferição do instrumento e correções dos valores. A Figura 4A mostra o equipamento usado neste processo.



**Figura 4. (A)** Equipamento e2k para medição do Poder Calorífico Superior (PCS); **(B)** Cadinho metálico e fio de algodão preso à resistência.

Fonte: Acervo do autor.

Para a determinação do PCI foi utilizada a Equação 2, descrita por Volpato et al. (2009):

$$PCI = PCS - 3,052$$

**Equação 2.** Determinação do Poder Calorífico Inferior (PCI) a partir do Poder Calorífico Superior (PCS).

No qual:

*PCI*: Poder Calorífico Inferior (MJ Kg<sup>-1</sup>);

*PCS*: Poder Calorífico Superior (MJ Kg<sup>-1</sup>);

3,052: Constante.

### 3.3.2 VISCOSIDADE CINEMÁTICA

A viscosidade cinemática é determinada através do viscosímetro capilar Cannon-Fenske (Figura 5), que é mergulhado em banho-maria com temperatura regulada a 40°C. Introduz-se a amostra pelo bocal de maior tamanho e succiona-se pelo orifício menor através de uma pera de sucção, até atingir o menisco superior. A amostra escoa pela ação da gravidade e, com o auxílio de um cronômetro, anota-se o tempo gasto para percorrer o menisco superior até o inferior. Realiza-se uma triplicata com cada amostra, desprezando-se a primeira medição, já que se considera que a amostra está em período de adaptação da temperatura do meio. O cálculo é feito multiplicando o tempo de escoamento, dado em segundos, pela constante do viscosímetro, sendo o resultado dado em  $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$  ou cSt (centistoke).



**Figura 5.** Cannon-Fenske utilizado para medição da viscosidade das amostras. Fonte: Acervo do autor.

### 3.3.3 DENSIDADE A 20°C

Para a determinação da massa específica das amostras utiliza-se o método do picnômetro, que neste caso, continha 10 ml. Inicialmente, para fins de calibragem do picnômetro, pesa-se o mesmo vazio e completamente cheio de água destilada, deixando-o em banho-maria para manutenção constante da temperatura a 20 °C. Após o cálculo da densidade da água, realiza-se o mesmo procedimento, apenas substituindo a água destilada pelas amostras. O cálculo da densidade é dado pela equação abaixo:

$$d = \frac{m}{V}$$

**Equação 3.** Cálculo da densidade.

Onde  $d$  representa a densidade a 20°C,  $m$  é a massa da amostra, em gramas, e  $V$  é o volume ocupado pela amostra, em mililitros.

### 3.4 ENSAIO DO CONJUNTO MOTOR GERADOR

O modelo do conjunto motor-gerador utilizado no experimento foi o BD – 6500 CF, da marca Branco (Figura 6). Possui partida manual, ciclo de 4 tempos, é monocilíndrico, refrigerado a ar, com lubrificação forçada através de bomba de óleo e injeção direta de combustível. As demais especificações, fornecidas pelo fabricante, encontram-se nas Tabelas 5 e 6. Nenhuma modificação foi realizada no conjunto para a realização do experimento.



**Figura 6.** Ilustração do motor utilizado nos ensaios.  
Fonte: Acervo do autor.

**Tabela 5.** Especificações Técnicas do Grupo Moto-Gerador e do gerador.

<b>Parâmetros</b>	<b>Dados</b>
Capacidade do Óleo do Cáster	1,5 L
Capacidade do tanque	4,5 L
Consumo	2,15 L h <sup>-1</sup>
Peso (PM/PE)	46/51 kg
Torque máximo	2,70 kgfm a 2000 rpm
Potência contínua	9,0 cv a 3600 rpm
Potência máxima	10,0 cv a 3600 rpm
Taxa de compressão	19:01
Cilindrada	406 cm <sup>3</sup>
Diâmetro x Curso	86 x 70 mm

Fonte: Dados do fabricante.

**Tabela 6.** Especificações do Motor.

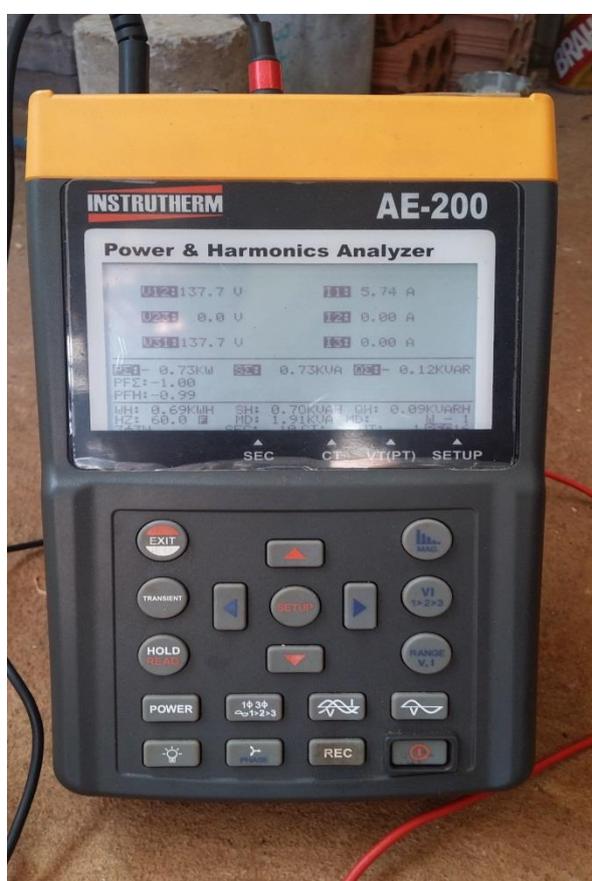
<b>Parâmetros</b>	<b>Dados</b>
Altura	670 mm
Largura	485 mm
Comprimento	735 mm
Ruído	79 db
Peso	95 kg
Autonomia (50% de carga)	5,20 h
Capacidade do tanque	12,5 l
Carregador de bateria	12 V; 8,3 A
Controle de tensão	Capacitor/Sem escova
Tomada auxiliar	Sim
Corrente máxima	20 A
Tensão de saída	110 V/ 220V
Potência contínua	5,0 KVA
Potência máxima	5,5 KVA

Fonte: Dados do fabricante.

Para o estabelecimento de cargas de trabalho, utilizou-se um banco de resistências, composta por um total de nove: 2 resistências de 250 W, 2 de 500 W, 2 de 1000 W e 3 de 2000 W, sendo que o controle da potência foi efetuado por meio de um quadro de comando, no qual é possível a conexão separada de cada resistência. A energia elétrica que é produzida pelo grupo motor gerador e dissipada pelo banco de resistências foi medida com o analisador de energia AE-200, da

marca Instrutherm, que pode ser visualizado na Figura 7. O banco de resistências pode ser visto na Figura 11A.

A medida do consumo de combustível, por sua vez, foi realizada com um medidor de vazão da marca Flowmate Oval M-III, modelo LSF41L0-M2. Este equipamento possui a capacidade de detectar fluxos de 1 a 100 litros por hora entre uma faixa de temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ . Para efetuar esta medição, tem-se um conjunto de engrenagens que emitem pulsos ao completarem um giro, sendo que cada volta corresponde a  $1\text{ cm}^3$  de líquido. Na Figura 8 é possível visualizar o fluxômetro dentro do esquema montado no experimento e o equipamento em si, e na Figura 9 a ilustração de seu funcionamento.



**Figura 7.** Analisador de Energia, marca INSTRUTHERM, modelo AE-200.  
Fonte: Acervo do autor.

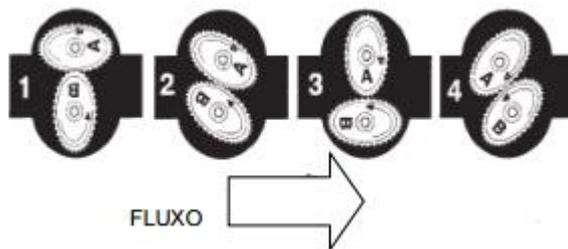
Com relação a aquisição e registro de dados, foi utilizado um datalogger modelo FIELDLOGGER, do fabricante NOVUS. Este equipamento possui 8 entradas analógicas passíveis de configuração para sinais de corrente, tensão, Pt 100 e 1000 e termopares; 8 portas digitais que podem ser ajustadas como canais de entrada ou

saída; além de 2 saídas a relé. Possui interface USB para conexão por computador e outra para conexão com pen drive. O equipamento pode ser visto na Figura 10.



**Figura 8.** (A) Posicionamento do fluxômetro no experimento; (B) Modelo do fluxômetro utilizado no experimento.

Fonte: (A) Acervo do autor; (B) Ilustração do fabricante.



**Figura 9.** Ilustração do funcionamento do fluxômetro.

Fonte: Datasheet, p.1.



**Figura 10.** Datalogger FIELDLOGGER para aquisição e registro dos dados.

Fonte: Acervo do autor.



**Figura 11. (A) Banco de resistências e (B) quadro de comando.**  
 Fonte: Acervo do autor.

Para a determinação da variação da rotação do motor conforme a carga aplicada utilizou-se um multímetro com função de medição de frequência (Figura 12), sendo o resultado expresso através da Equação 4, que correlaciona a frequência de saída do gerador com a rotação instantânea do motor-gerador (HOMRICH, 2013).



**Figura 12. Multímetro para medição da frequência do conjunto motor-gerador.**  
 Fonte: Acervo do autor.

$$F_e = \frac{n_m \times P}{120}$$

**Equação 4.** Determinação da frequência elétrica.

Onde  $F_e$  é a frequência elétrica, medida em Hertz;  $n_m$  é a velocidade mecânica do campo magnético, em rotações por minuto; e  $P$ , é o número de polos da máquina.

Para a análise do  $\text{SO}_2$ , fez-se uso de um analisador de combustão e emissões da marca Bacharach, modelo PCA3-285, ilustrado na Figura 13. Este equipamento possui sensores adaptados capazes de detectar a emissão de oxigênio ( $\text{O}_2$ ), monóxido e dióxido de carbono ( $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) a partir de uma ampla gama de combustíveis, além da temperatura em que os gases de combustão são expelidos pelo motor. Possui precisão de aproximadamente 5% para a medição dos gases e de 3% para sua temperatura. Durante o experimento, o detector de gases do Bacharach foi inserido na saída do motor, conforme ilustra a Figura 14.



**Figura 13.** Equipamento para mensuração dos gases de escape, marca Bacharach. Fonte: Acervo do autor.



**Figura 14.** Inserção do detector de gases do Bacharach para medição do SO<sub>2</sub> na saída do motor.  
Fonte: Acervo do autor.

### 3.5 PARÂMETROS DETERMINADOS

#### 3.5.1 CONSUMO HORÁRIO VOLUMÉTRICO (CHV)

No cálculo da quantidade de combustível consumido por hora de operação foram utilizados os valores fornecidos pelo fluxômetro, cujos valores foram inseridos na Equação 5, adaptada de Yanai et al. (1999).

$$Cvh = \left( \frac{V_a - V_r}{t} \right) * 3,6$$

**Equação 5.** Fórmula do Consumo Horário Volumétrico.

No qual:

$Cvh$ : Consumo horário volumétrico (L h<sup>-1</sup>);

$V_a$ : Volume de combustível na alimentação (mL);

$V_r$ : Volume de combustível no retorno (mL);

$t$ : tempo de duração da repetição (s); e

3,6: fator de conversão de mL s<sup>-1</sup> para L h<sup>-1</sup>.

#### 3.5.2 CONSUMO ESPECÍFICO (CE)

O Consumo Específico foi determinado de acordo com a Equação 6, adaptada de Gabriel Filho et al. (2010).

$$CE = \frac{Chv \cdot Dc}{PEG}$$

**Equação 6.** Fórmula para determinação do Consumo Específico.

No qual:

*CE*: Consumo Específico (Kg kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>);

*Chv*: Consumo horário volumétrico (mL h<sup>-1</sup>);

*Dc*: Densidade do combustível (g cm<sup>-3</sup>); e

*PEG*: Potência Elétrica Gerada (kW).

### 3.5.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (EE)

Para a obtenção da eficiência energética de cada tratamento, utilizou-se a Equação 7, adaptada de Silva et al. (2012) e Soranso et al. (2008).

$$EE = \frac{360}{PCI * CE}$$

**Equação 7.** Fórmula para obtenção da Eficiência Energética.

No qual:

*EE*: Eficiência Energética (%);

360: Fator de conversão entre unidades;

*PCI*: Poder Calorífico Inferior do combustível (MJ Kg<sup>-1</sup>);

*CE*: Consumo Específico (Kg kW<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>).

### 3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos no experimento foram submetidos, utilizando o software livre Sisvar versão 5.6, a Análise de Variância (ANOVA) e, se a hipótese de nulidade dos efeitos de tratamento fosse negada a 5% de significância, se utilizaria o teste de Tukey para identificar quais médias se diferem entre si.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

De modo geral, o simples resultado numérico das análises físico-químicas da mistura ternária diesel-biodiesel-etanol ultrapassa a mera avaliação da quantidade de biocombustível misturado ao diesel fóssil, devendo-se atentar também ao tipo de biodiesel (oleaginosas que lhe deram origem) e etanol (porcentagem de água incorporado) utilizados na mistura, além do método escolhido para a análise. Assim, apesar da dificuldade da discussão com a literatura existente em função das ressalvas supracitadas, serão feitas comparações em função da importância destas análises para a avaliação das características da qualidade do combustível, conforme citado por Imtenan et al. (2014), em que as análises de poder calorífico, densidade e viscosidade figuram entre os principais parâmetros indicadores da qualidade de um combustível e estão entre as propriedades que mais influenciam no desempenho do motor e suas emissões gasosas.

#### 4.1.1 DENSIDADE

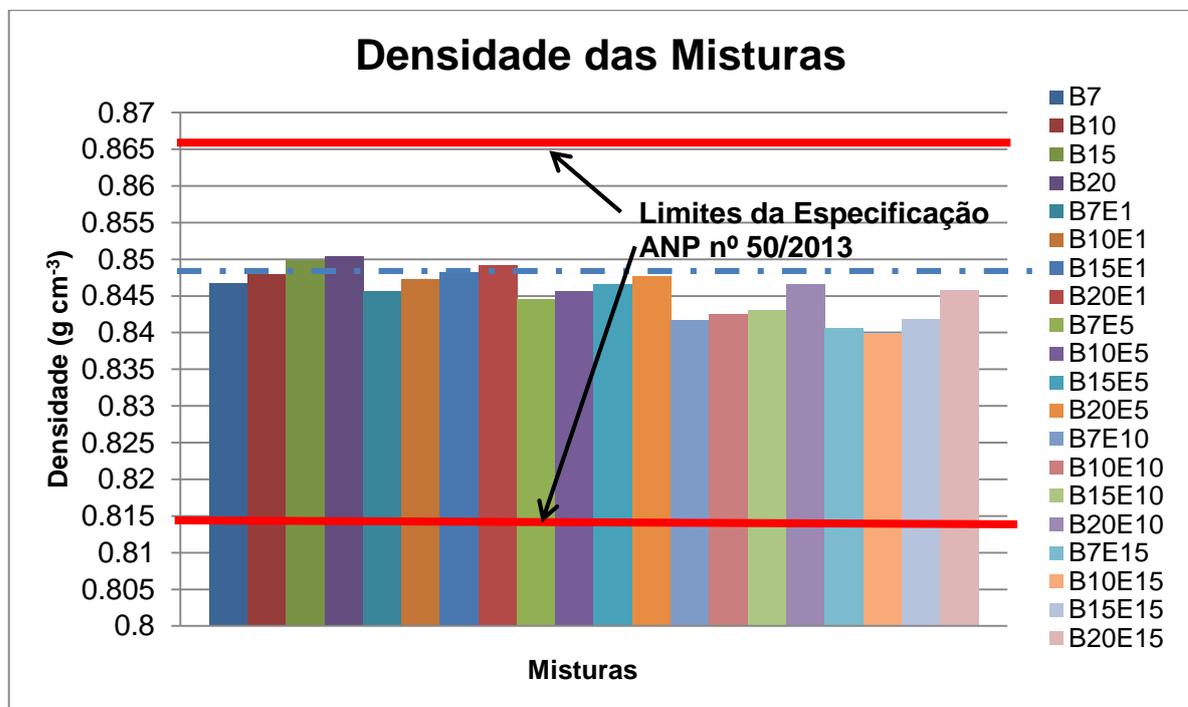
A densidade é uma das características que mais diretamente afetam a performance do motor, além de afetar outras propriedades como poder calorífico e número de cetano (MOFIJUR et al., 2016). A Tabela 7 e a Figura 15 trazem os resultados de densidade de todas as misturas testadas durante o experimento, em  $\text{g cm}^{-3}$ . O parâmetro de comparação utilizado foi a especificação contida na Resolução ANP nº 50/2013, cujo valor situa-se entre 0,815 a 0,865  $\text{g cm}^{-3}$ . O valor de densidade encontrado para o diesel tipo “A” utilizado no trabalho foi de 0,845  $\text{g cm}^{-3}$ .

**Tabela 7.** Valores absolutos medidos para a densidade.

% de Biodiesel	% de Etanol									
	0	1	5	10	15	20	25	30	35	40
7	0,8467	Ac	0,8456	Abc	0,8445	Ab	0,8417	Aa	0,8406	Aa
10	0,8479	Bc	0,8473	Bbc	0,8457	ABb	0,8425	Aa	0,8416	ABa
15	0,8498	Cc	0,8482	BCbc	0,8466	BCb	0,8431	Aa	0,8423	Ba
20	0,8504	Cd	0,8491	Ccd	0,8477	Cbc	0,8466	Bab	0,8458	Ca

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Já as médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Conforme pode-se observar, todos os valores ficaram dentro do especificado pela norma nacional, diminuindo com o acréscimo do etanol (nas linhas) e aumentando com o incremento de biodiesel na mistura (nas colunas). De acordo com Kwanchareon et al. (2007), isso ocorre pois o etanol possui uma menor densidade se comparado aos outros dois combustíveis, ao contrário do biodiesel, que tem a maior densidade dentre os três. Aliás, pode-se dizer que o valor de densidade das misturas dependerá muito do tipo de biodiesel empregado, pois a literatura traz valores que variam entre  $0.8485 \text{ g cm}^{-3}$  até  $0.931 \text{ g cm}^{-3}$  (MOFIJUR et al., 2016). Em geral, uma maior densidade leva a uma maior resistência de escoamento do combustível, o que pode dificultar a atomização e a consequente injeção de combustível para os cilindros de combustão.



**Figura 15.** Densidade das misturas ilustrando os limites mínimos e máximos estabelecidos pela ANP. A linha tracejada indica a média de todos os testes.

Analisando-se os resultados de densidade numéricos e sua comparação ao diesel, alguns resultados ficaram muito próximos dos apresentados pela literatura. Kwanchareon et al. (2007) trabalhou, dentre outras, com misturas B15E5 e B10E10, utilizando biodiesel de óleo de palma e etanol anidro. Os valores encontrados pelos autores para as respectivas misturas foram de  $0,8375$  e  $0,8331 \text{ g cm}^{-3}$ , sendo o primeiro  $0,25\%$  mais denso e o segundo  $0,28\%$  menos denso que o diesel. Esta diferença foi semelhante à encontrada no presente trabalho, em que B15E5 e B10E10 foram  $0,19\%$  e  $0,30\%$  mais e menos densos, respectivamente. Estes

valores contrastam com outros encontrados na literatura, como o relatado por Barabás et al. (2010) que, utilizando biodiesel de colza e etanol anidro a 99,3%, encontraram valor de densidade idêntico para B10E10 e o diesel, de  $0,843 \text{ g cm}^{-3}$ , com medidas para  $15^\circ\text{C}$ .

#### 4.1.2 VISCOSIDADE

A viscosidade encontra-se entre as principais características do combustível, afetando a qualidade da atomização, tamanho da gota do combustível e qualidade da ignição. É influenciada de maneira inversamente proporcional pela temperatura e tem relação direta com a densidade (SHAHIR et al., 2014; BARABÁS et al., 2010). De acordo com Hussan et al. (2013), cerca de 5 dos 8 problemas mais frequentes relacionados a falhas de motores diesel estão relacionados, na verdade, com a viscosidade do combustível, de modo que misturas em que são empregados biodiesel devem ter o cuidado de saber qual matéria prima deu-lhe origem.

As viscosidades encontradas para todas as misturas utilizadas no presente trabalho podem ser visualizadas na Tabela 8, estando todos os dados na unidade de  $\text{mm}^2 \text{ s}^{-1}$  ou centistoke (cSt).

**Tabela 8** Viscosidade para as misturas testadas, medidas em centistoke (cSt).

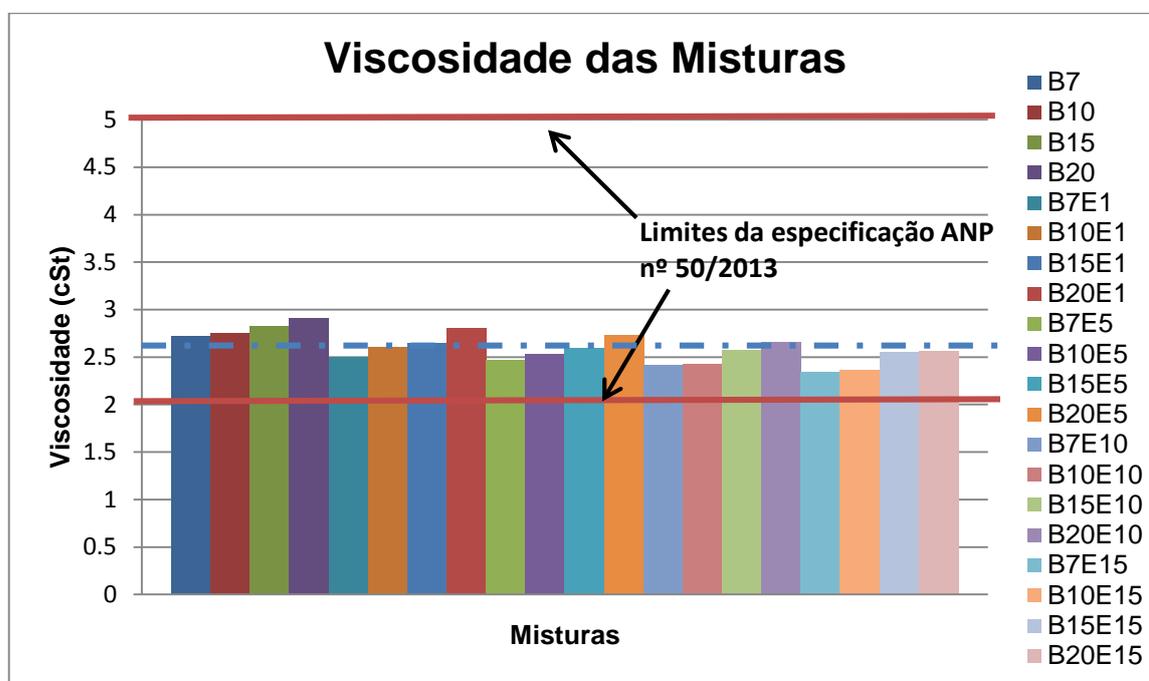
% de Biodiesel	% de Etanol									
	0		1		5		10		15	
<b>7</b>	2,718	Cbc	2,496	Dd	2,473	Cc	2,415	Bb	2,344	Aa
<b>10</b>	2,753	Bb	2,602	Aa	2,532	Cd	2,427	Ac	2,368	Ab
<b>15</b>	2,823	ABb	2,648	Bab	2,591	Aa	2,574	Cd	2,555	Bc
<b>20</b>	2,905	Aa	2,8	Cb	2,73	Bb	2,66	Ab	2,567	Cc

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Já as médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Assim como ocorreu com a densidade, os valores de viscosidade aumentaram com o acréscimo de biodiesel e diminuíram com a inclusão de etanol, ficando dentro da faixa estabelecida pela Resolução nº 50/2013 da ANP para o diesel tipo “A”, que é de 2,0 a 5,0 cSt, como pode ser visto na Figura 16.

Pelos dados, é possível notar uma maior variação da viscosidade ao incorporar-se biodiesel quando há 1% fixo de etanol, onde as diferenças entre B20E1 e B7E1 foi de 12,18%. A menor variação ocorreu para as misturas binárias, na qual há 6,88% de diferença entre B7E0 e B20E0. Em fixando-se o biodiesel e

acrescentando-se etanol, as misturas com 7% e 10% foram as mais sensíveis, apresentando 13,76% e 13,98% entre 0% e 15% de etanol. A menor variação foi com 15% de biodiesel, na qual houve 9,49% de diferença entre seus extremos. Estas variações são pequenas ao considerar que não fogem muito da viscosidade apresentada pelo diesel tipo “A”, que foi de 2,695 cSt. Estes resultados estão de acordo com o apresentado por Barabás et al. (2010), que prepararam várias misturas entre diesel-biodiesel-etanol e detectaram valores de viscosidade muito próximos do diesel normal, sendo que a diferença diminuiu quando ocorre o aumento de temperatura. O mesmo foi encontrado por Zoldy (2011) que encontrou valores da mistura entre os três combustíveis muito próximas da do diesel comum.



**Figura 16.** Viscosidade das misturas ilustrando os limites máximos e mínimos estabelecidos pela ANP. A linha tracejada indica a média de todos os testes.

De acordo com Shahir et al. (2014), a determinação dos valores de viscosidade é importante pois existem limites mínimos e máximos que um combustível pode apresentar para ser utilizado em um motor. No caso de viscosidades muito baixas, podem-se provocar principalmente vazamentos no sistema de combustível pela formação de gotículas muito pequenas. Já uma alta viscosidade pode causar, entre outros, formação maior de depósitos no motor, combustão incompleta, aumento de energia para bombeamento do combustível e problemas de partida em climas frios.

### 4.1.3 PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)

O Poder Calorífico Inferior pode ser definido como o montante de energia desprendida em forma de calor após a combustão de determinado tipo de combustível, deduzidas as perdas com a evaporação da água (QUIRINO et al., 2005). É uma propriedade de suma importância na determinação da viabilidade de um combustível ao passo que influencia diretamente a saída de potência do motor (SHAHIR et al., 2014).

O PCI das misturas pode ser visualizado na Tabela 9. Na medida em que foram ocorrendo acréscimos de biocombustíveis (biodiesel e etanol) ao diesel, pode-se ver uma diminuição no poder calorífico, em função de possuírem um PCI menor em relação ao combustível fóssil, de 36,525 MJ kg<sup>-1</sup> (biodiesel) e 23,211 MJ kg<sup>-1</sup> (etanol), contra 43,422 MJ kg<sup>-1</sup> do diesel tipo “A”.

**Tabela 9.** Valores absolutos do PCI, dados em MJ kg<sup>-1</sup>.

% de Biodiesel	% de Etanol									
	0		1		5		10		15	
<b>7</b>	42,611	Ab	42,389	Ab	41,729	Ab	40,215	Aab	38,652	Ba
<b>10</b>	41,967	Ac	41,803	Ac	40,691	Abc	39,200	Aab	37,965	Aba
<b>15</b>	41,585	Ac	41,269	Ac	40,067	Abc	38,773	Aab	37,392	ABa
<b>20</b>	41,147	Ac	40,849	Abc	39,723	Abc	38,429	Ab	35,848	Aa

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Já as médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Resultados semelhantes foram encontrados por Cheenkachorn e Fungtammasan (2009) Hussan et al. (2013), Labeckas et al. (2014) e Kannan (2013), em que, na medida em que houve a incorporação de etanol e biodiesel na mistura, os valores de poder calorífico foram diminuindo. Entretanto, Kwanchareon et al. (2007) mostraram que misturas entre diesel-biodiesel-etanol contendo menos de 10% de etanol possuem poder calorífico próximo do diesel fóssil, o que se mostra de acordo com o verificado neste trabalho. Barabás et al. (2010) encontrou valores semelhantes de PCI aos deste experimento para as misturas B10E5 e B15E5 utilizando biodiesel de colza e etanol anidro a 99,3%, que foram de 41,560 e 41,414 MJ kg<sup>-1</sup>.

### 4.2 QUADRO DE SIGNIFICÂNCIA DO CONSUMO ESPECÍFICO

A análise de variância e o coeficiente de variação geral referente ao consumo específico foram determinados, de modo que tanto os fatores em separado (biodiesel, etanol e carga), quanto as interações duplas (biodiesel-carga, etanol-carga, biodiesel-etanol) e a interação tripla (etanol-carga-biodiesel) foram significativas, sendo necessário a análise do desdobramento das interações.

#### **4.2.1 CONSUMO ESPECÍFICO**

O consumo específico pode ser definido como a mensuração da eficiência de um motor de acordo com o combustível que lhe é fornecido para a produção de trabalho, de modo que quanto maior é o seu valor, mais quantidade de combustível é requerida para produzir a mesma quantia de energia (AJAV et al., 1999; EDGAR, 2011; KANNAN et al., 2012).

Os desdobramentos da interação tripla para a variável Consumo Específico são apresentados nas Tabelas 10 e 11, nas quais observam-se a influência da adição do biodiesel em porcentagens fixas de etanol dentro de cada carga resistiva, e do acréscimo de etanol no biodiesel dentro de cada carga. Uma análise pormenorizada gráfica de cada desdobramento é realizada da figura 17 até 25. Por fim, as figuras 26 e 27 apresentam uma visão geral dos resultados numéricos obtidos dentro de cada carga.

Analisando a Tabela 10, a adição de biodiesel ao etanol provocou tanto a redução quanto o aumento do consumo específico, que variou para a carga aplicada e a concentração de etanol em que se baseou o acréscimo de biodiesel. Com o aumento da carga, observa-se uma diminuição do consumo específico até 4 kW, de modo que os valores aumentam em sua maioria quando 5 kW são aplicados. De acordo com Shahir et al. (2014), a incorporação de biocombustíveis ao diesel diminui seu poder calorífico, pois possuem, biodiesel e etanol, poder calorífico inferior ao diesel. Entretanto, em se tratando da análise da adição de biodiesel às misturas diesel-etanol, nota-se uma melhora no poder calorífico até certo ponto destas misturas pois o biodiesel possui um valor intermediário desta propriedade frente aos outros dois combustíveis. Isto pode explicar a ausência de um padrão nos resultados, como no caso da adição de biodiesel com 15% de etanol, em que 10% de biodiesel foi o que melhor demonstrou eficácia com relação ao consumo.

**Tabela 10.** Desdobramento dos valores de consumo específico ( $\text{g kw}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) de biodiesel e carga dentro de cada nível de etanol.

% Biodiesel	% Etanol									
	Carga 1		Carga 2		Carga 3		Carga 4		Carga 5	
0%										
0	802,1		465,9		368,9		337,6		334,7	
7	818,6	A	471,6	A	379,2	A	339,5	A	346,6	A
10	820,6	A	468,9	A	387,7	A	395,7	B	348,8	A
15	830,0	A	485,0	A	393,7	A	346,7	A	353,2	A
20	833,9	A	478,4	A	389,9	A	347,9	A	351,5	A
1%										
0										
7	852,0	A	474,7	A	385,2	A	339,3	A	353,1	A
10	870,4	A	475,9	A	377,6	A	342,5	A	330,1	A
15	835,3	A	463,2	A	380,3	A	343,4	A	327,1	A
20	834,0	A	483,8	A	454,1	A	348,8	A	345,2	A
5%										
0										
7	1006,7	B	542,2	B	386,6	A	361,9	A	403,2	A
10	1236,5	C	574,1	B	408,3	A	420,7	B	495,2	B
15	920,5	A	487,9	A	386,5	A	348,6	A	380,1	A
20	911,3	A	494,5	A	372,8	A	360,6	A	391,4	A
10%										
0										
7	1143,9	C	556,2	A	411,2	A	372,6	AB	390,1	A
10	1043,8	B	545,5	A	403,9	A	351,2	A	382,5	A
15	983,5	A	548,2	A	403,3	A	358,4	A	436,0	B
20	998,6	A	571,0	A	420,7	A	399,9	B	431,7	B
15%										
0										
7	1466,8	B	640,4	B	424,6	AB	410,5	B	433,8	B
10	1002,2	A	506,5	A	394,2	A	349,4	A	390,5	A
15	1515,5	C	687,5	C	471,8	C	397,2	B	444,1	B
20	1525,8	C	680,9	C	453,8	BC	425,4	B	457,2	B

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A adição de biodiesel provou ser mais econômica que o diesel em termos específicos quando foi combinada com 1% de etanol em altas cargas (5 kW), no caso de 10% e 15% de biodiesel. Isto é, as misturas B10E1 e B15E1, na carga 5, foram as únicas a demonstrarem consumo específico menor que o diesel em 1,37% e 2,27% respectivamente. A adição de pequenas (7%) ou altas (20%) concentrações

de biodiesel, apesar de estatisticamente iguais, não obtiveram o mesmo efeito, apresentando uma elevação no CE em 5,5% e 3,1% respectivamente.

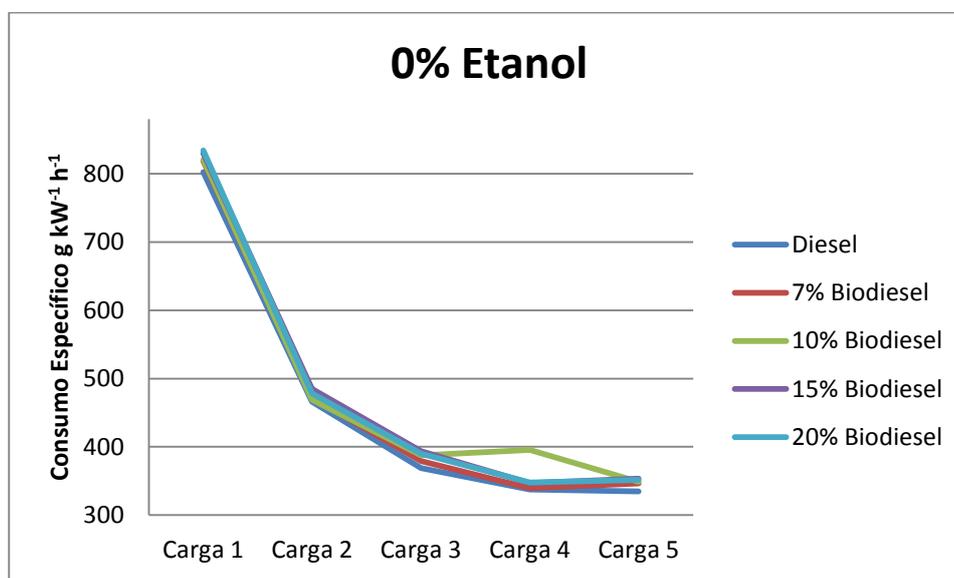
Imtenan e colaboradores (2014) trabalharam com misturas binárias diesel-biodiesel (B20) e acrescentaram diversos aditivos a essa mistura, tais quais etanol, n-butanol e éter dietílico. Os autores encontraram valores de consumo específico das misturas ternárias abaixo do diesel, porém estas também possuíam poder calorífico inferior ao do combustível fóssil. Segundo os autores, quando isso ocorre, pode-se atribuir o resultado a uma boa atomização e boa combustão da mistura, o que de certa forma pode explicar o que ocorreu com as misturas com 1% de etanol (B10E1 e B15E1).

Além disso, pode-se perceber que, para todas as cargas, as misturas diesel-biodiesel não obtiveram desempenho estatisticamente superior quando sofreram acréscimo de 1% de etanol, tendo inclusive um resultado inferior na carga 4 kW para a mistura B10. Estes resultados estatísticos semelhantes podem ser explicados por Avulapati et al. (2016), que afirmam que as misturas ternárias entre diesel-biodiesel-etanol possuem potencial para formarem gotículas menores a partir de uma gota inteira da mistura, processo denominado de micro-explosão, sob as mesmas condições do diesel de petróleo. Segundo os autores, o fenômeno da micro-explosão ajuda na atomização secundária da mistura, o que reduz o tamanho das gotas geradas de forma considerável e afeta diretamente a combustão, estabilidade, emissões e economia de combustível (VENSON et al., 2010).

Com relação as misturas com 5%, 10% e 15% de etanol, nota-se uma diferença estatística significativa para a carga 1, de modo que para as duas primeiras essa diferença diminui conforme aumenta-se a carga até 3 kW, onde são estatisticamente equivalentes. A partir daí, possuem desempenho similar para as cargas seguintes, variando a porcentagem de biodiesel que mais contribui para melhorar o consumo específico. A mistura com 15% de etanol, apesar de não apresentar nenhuma coluna uniforme para o teste de Tukey, apresenta 10% de biodiesel como a melhor adição a essa porcentagem de etanol.

Analisando os gráficos, por sua vez, é perceptível que, de uma maneira geral, o consumo específico para todas as misturas diminui acentuadamente até atingir 3 kW, e depois tende a permanecer ou aumentar. Nota-se que nesta carga

também ocorre a maior parte dos encontros das retas, o que corrobora com os valores estatísticos equivalentes da Tabela 10.

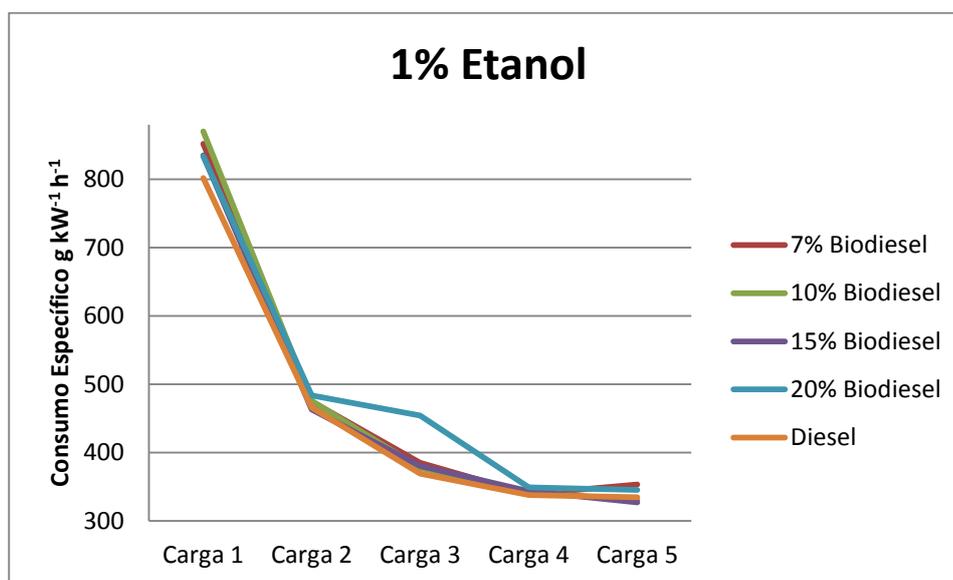


**Figura 17.** Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 0% de etanol, para cada carga.

Observando o gráfico com 0% de etanol, nota-se que as misturas diesel-biodiesel possuem consumos específicos muito similares ao longo de cada carga aplicada, sendo estatisticamente iguais e próximas as do diesel tipo “A”. De acordo com Ejim (2007), misturas binárias com concentrações significativas de biodiesel podem apresentar características adequadas de atomização que não prejudicam o funcionamento do motor, o que não levaria a diferenças muito significativas no consumo. Além disso, Murugesan (2009) e Canakci (2006) indicam que misturas com até 20% de biodiesel não implicam em maiores modificações no motor, sugerindo um desempenho aceitável das misturas em relação ao diesel até esta faixa de concentração do biocombustível. Randazzo e Sodre (2011) ainda afirmam que o uso de 20% de biodiesel no diesel otimiza a eficiência térmica e o nível de emissões do motor, induzindo a tempos de ignição menores, durações ligeiramente maiores do tempo de combustão, redução do desgaste do motor e aumento da lubrificidade do combustível.

No entanto, houve um resultado discrepante e estatisticamente significativo quando o B10 operou com 4 kW. Este “salto” no consumo foi também encontrado por Subbaiah et al. (2010) quando o motor testado trabalhou com a mistura de diesel com biodiesel oriundo do óleo de farelo de arroz, entretanto não houve um comentário do autor sobre o fato. Uma possível explicação pode ser encontrada no

trabalho de Castellaneli et al. (2008), os quais afirmam que quando ocorre um maior distanciamento entre as curvas a partir de determinada faixa de rotação (ou de carga, no caso), se deduz que há uma atomização incompleta do combustível, possivelmente provocado por uma maior viscosidade do mesmo. Isto é, pode ter ocorrido uma mistura ineficiente entre diesel e biodiesel que induziu a queima, em um determinado momento, de uma maior porção do biocombustível em detrimento do combustível fóssil.

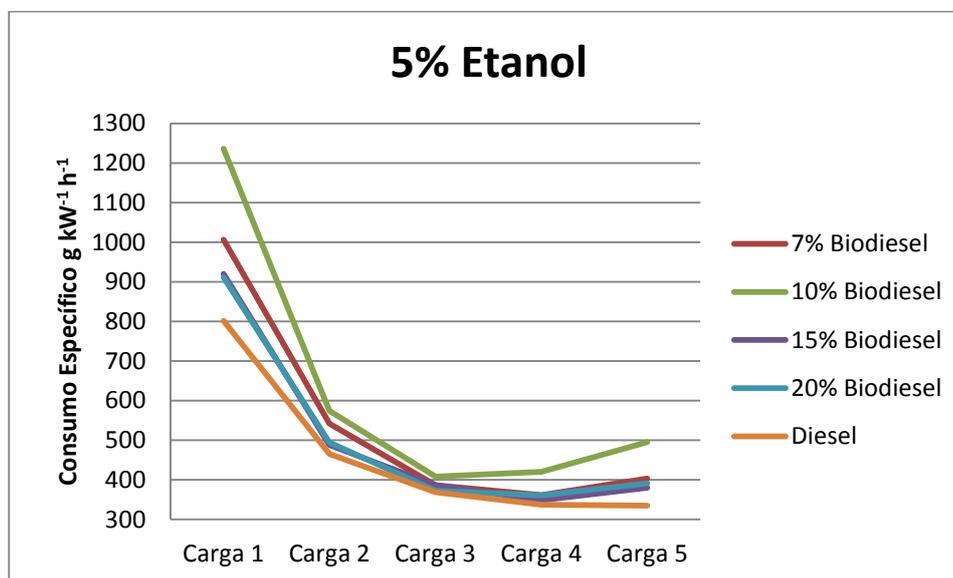


**Figura 18.** Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 1% de etanol, para cada carga.

Tendo-se por base a análise do gráfico com 1% de etanol, tem-se que a adição crescente de biodiesel não provoca uma diferença significativa entre as misturas e entre estas e o diesel tipo “A”, de maneira que o “salto” no consumo específico para a mistura B20E1 não foi estatisticamente diferente das demais na carga 3.

Não foram encontrados trabalhos na literatura que investigassem as mesmas porcentagens de cada combustível na mistura ternária para este caso. As concentrações mais baixas de etanol encontradas em que se avaliou o consumo específico foram de 3%. Assim, Shi et al. (2005) realizaram estudos com a mistura D85B12E3 encontrando valores de CE 4% a 5% maiores que o diesel, enquanto Rahimi et al. (2009) trabalharam com a mistura D94,95B2,05E3 (94,95% de diesel, 2,05% de biodiesel e 3% de etanol), encontrando consumos específicos 1,5 a 3% maiores que o diesel, sendo os resultados de ambos estudos para altas cargas.

Estes valores encontram-se próximos aos encontrados no trabalho, em que nas altas cargas (4 e 5 kW) os maiores valores de CE foram 3,33% a 5,51% maiores que o diesel.



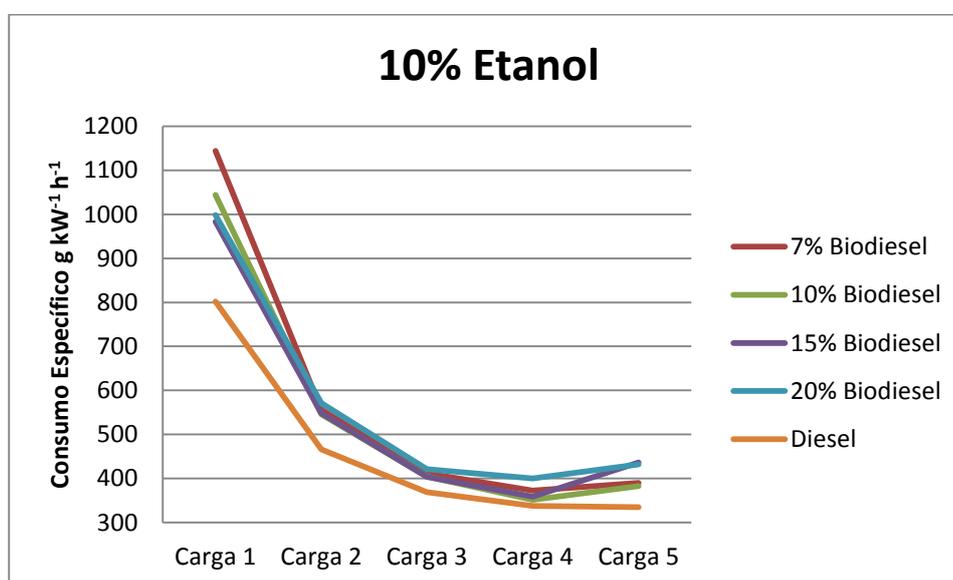
**Figura 19.** Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 5% de etanol, para cada carga.

Por sua vez, o gráfico que ilustra a adição crescente de biodiesel em 5% de etanol mostra um consumo específico muito maior para as cargas baixas (cargas de 1 e 2 kW), especialmente na carga 1, cujo valor varia, em comparação ao diesel, entre 13,6% até 54,2% para B20E5 e B10E5, respectivamente. Nesta carga, B7E5 e B10E5 destoam como as misturas com pior rendimento comparadas ao diesel. Na carga seguinte, apesar da diferença no consumo específico ser menor, continuam a ter um desempenho inferior às demais misturas, consumindo cerca de 16,4% a 23,2% a mais que o diesel para produzir o mesmo montante de energia, para B7E5 e B10E5, respectivamente. Nas cargas seguintes, com exceção de B10E5, todas as demais misturas apresentam-se com desempenho similar entre si. Para esta porcentagem fixa de etanol, de acordo com os dados, pode-se inferir portanto que concentrações de biodiesel maiores que 10% obtiveram um melhor desempenho levando-se em conta todas as cargas aplicadas, e que exatos 10% de biodiesel não se revela bom para nenhuma carga.

Em comparação com a literatura, Barabás et al. (2010) verificaram o desempenho em motor diesel de misturas B10E5 e B15E5, observando que o consumo específico foi maior para operações com baixas cargas (de 0 até 40% de carga imposta por um dinamômetro) em comparação ao diesel, sendo 29 a 30%

maiores para B10E5 e de 30 a 32% maiores para B15E15. Assim que a carga de trabalho imposta ao motor foi aumentando, o consumo específico foi se aproximando ao do diesel, sendo apenas de 4 a 5% maiores para cargas elevadas para ambas as misturas, isto é, valores muito menores do que os encontrados no trabalho. Isso provavelmente ocorre devido às diferenças existentes nos tipos de motor testado (número de cilindros, torque e variação na taxa de compressão) e ao tipo de biodiesel utilizado (óleo de colza).

SUBBAIAH et al. (2010) também realizaram testes com a mistura B10E5 e encontraram valores abaixo do presente trabalho para o consumo específico, que foi 5 a 10% maior para cargas baixas e de 28 a 33% para cargas elevadas quando confrontados os dados com o diesel. Imtenan et al. (2014) obtiveram valores muito próximos ao diesel com cargas altas e muito discrepantes ao operarem o motor com baixas cargas, ao trabalharem com a mistura B15E5, corroborando em partes com o presente trabalho, no qual para todas as cargas o CE se manteve razoavelmente acima do diesel.

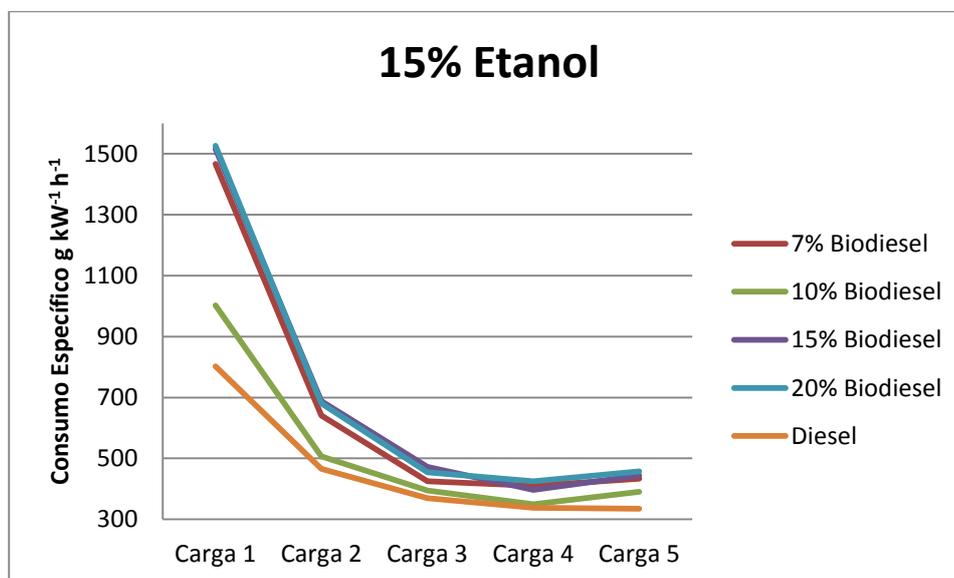


**Figura 20.** Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 10% de etanol, para cada carga.

O gráfico trazido na Figura 20, por sua vez, explicita o consumo específico das misturas com 10% de etanol. Nele, já é possível notar um maior distanciamento das misturas com o diesel tipo “A” em praticamente todas as cargas. Para 1 kW, as misturas com 15 e 20% são estatisticamente iguais e com os melhores resultados, enquanto as porcentagens menores de biodiesel são diferentes entre si e inferiores

às demais, com a mistura de 7% tendo o maior consumo, com 42,6% a mais que o diesel. Nas cargas 2 e 3 kW há uma equivalência estatística para as formulações testadas, que começam a se diferenciar novamente nas cargas seguintes. Para 4 kW, o maior consumo específico é de B20E10, representando cerca de 18,4% a mais que o combustível fóssil, e para 5 kW é o B15E10, com 30,3% tendo o mesmo parâmetro de comparação que o anterior.

Esta tendência de adaptabilidade de uma mistura frente a outra variando com a carga pode ser vista também na literatura. Subbaiah et al. (2010) elaborou misturas entre biodiesel de óleo de arroz, diesel e etanol na concentração D80B10E10, obtendo um aumento do CE frente ao diesel de 7 a 10% para cargas baixas, 24 a 28% para cargas médias e 36 a 40% para cargas altas. Já Al-Hassan e Al-Shannag (2012), para a mesma mistura, observaram um aumento de apenas 5 a 6% no CE. Barabás et al. (2010), por sua vez, encontraram valores de CE (para a mesma mistura) muito elevados para cargas baixas, que no entanto aproximaram-se ao do diesel quando o motor operou com médias e altas cargas.



**Figura 21.** Desdobramento do CE de cada nível de biodiesel dentro de 15% de etanol, para cada carga.

Já quando os acréscimos de biodiesel ocorrem quando se fixam 15% de etanol nas misturas ternárias, ocorrem grandes dispersões em praticamente todas as cargas. De fato, com o auxílio da Tabela 10, percebe-se que não existe um momento em que todas as misturas sejam estatisticamente iguais para determinada carga. B10E15 foi a formulação ternária que mais bem adaptou-se ao motor, tendo ápices de consumo específico nas cargas 1 e 5, requerendo 24,95% e 16,68% de

combustível para gerar a mesma energia que o diesel fóssil, respectivamente. Já o destaque negativo ficou para a mistura B20E15, que, para a carga 1, consumiu cerca de 90% a mais que o diesel tipo “A”.

Subbaiah et al. (2010) encontraram valores de CE para B10E15 maiores que o do presente trabalho, cujos resultados foram sendo maiores que o diesel conforme aumentava-se a carga de trabalho. Para cargas baixas, o CE foi 10 a 15% superior; para médias, de 24 a 28%, enquanto para altas, de 36 a 40%. Valores diferentes foram encontrados por Al-Hassan e Al-Shannag (2012) que encontraram, para a mistura B10E15 e cargas médias, valores cerca de 13 a 14% maiores que o CE do diesel de petróleo.

A Tabela 11 apresenta o consumo específico do diesel, das misturas binárias e ternárias analisando a interferência do acréscimo de etanol quando a porcentagem de biodiesel mantém-se fixa, para cargas de 1 a 5 kW. Assim como na Tabela 10, como não foram realizados testes com misturas diesel-etanol, aparecem no primeiro quadro da Tabela 11 apenas os valores referentes ao diesel tipo “A”, que servem como parâmetro para o desempenho absoluto das misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol.

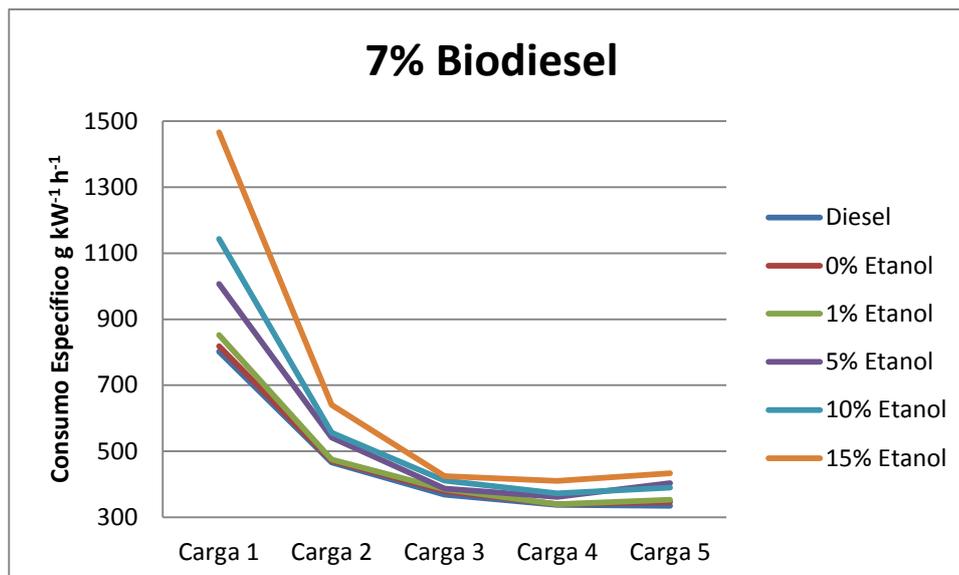
Analisando os dados fornecidos pela Tabela 11, nota-se que quando 1% de etanol é acrescido as várias porcentagens de biodiesel, o consumo específico mantém-se praticamente o mesmo, com exceção do valor apresentado pela mistura B10E1, que obteve aumento de 6,34% comparado a sua mistura binária, B10. Em termos absolutos existe até uma melhora no consumo para este percentual de etanol, especialmente para misturas com mais de 10% de biodiesel e aplicação a partir de 3 kW.

Além disso, pode-se observar um determinado padrão para 7, 15 e 20% de biodiesel quando a porcentagem de etanol é maior que 5%, na qual ocorre um aumento no consumo específico, tanto estatística quanto absolutamente. A única exceção fica por conta dos 10% de biodiesel, que possui pontos de desempenho inferiores quando alcança 5% de etanol, mas que melhoram quando mais etanol (10 e 15%) é acrescido. Uma análise pormenorizada dos dados é fornecida pela sequência das Figuras 22 a 25.

**Tabela 11.** Desdobramento de etanol e carga dentro de cada nível de biodiesel.

%Etanol	% Biodiesel										
	Carga 1		Carga 2		Carga 3		Carga 4		Carga 5		
0%											
0	802,1		465,9			368,9		337,6		334,7	
1											
5											
10											
15											
7%											
0	818,6	A	471,6	A		379,2	A	339,5	A	346,6	A
1	852,1	A	474,7	A		385,2	AB	339,3	A	353,1	AB
5	1006,7	B	542,2	B		386,6	AB	361,9	A	403,2	CD
10	1143,9	C	556,2	B		411,2	AB	372,6	AB	390,1	BC
15	1466,8	D	640,4	C		424,6	B	410,5	B	433,8	D
10%											
0	818,6	A	468,9	A		387,7	A	395,7	B	348,8	AB
1	870,4	B	475,9	A		377,6	A	342,5	A	330,1	A
5	1236,5	D	574,1	C		408,3	A	420,7	B	495,2	C
10	1043,8	C	545,5	BC		403,9	A	351,2	A	382,5	B
15	1002,2	C	506,5	AB		394,2	A	349,4	A	390,5	B
15%											
0	830,0	A	485,0	A		393,7	A	346,7	A	353,2	AB
1	835,3	A	463,2	A		380,3	A	343,4	A	327,1	A
5	920,5	B	487,9	A		386,5	A	348,6	A	380,1	B
10	983,5	C	548,2	B		403,3	A	358,4	AB	436,0	C
15	1515,5	D	687,5	C		471,8	B	397,2	B	444,1	C
20%											
0	833,9	A	478,4	A		389,9	AB	347,9	A	351,5	AB
1	834,0	A	483,8	A		454,1	AB	348,8	A	345,2	A
5	911,3	B	494,5	A		372,8	A	360,6	AB	391,4	BC
10	998,6	C	570,9	B		420,7	BC	399,9	BC	431,7	CD
15	1525,8	D	680,9	C		453,8	C	425,4	C	457,2	D

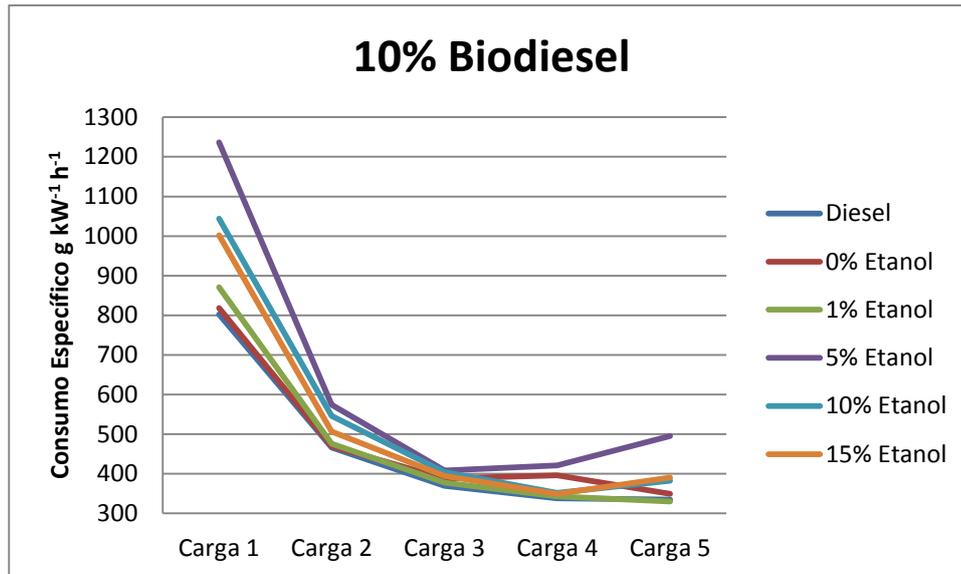
Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.



**Figura 22.** Desdobramento do CE de cada nível de etanol dentro de 7% de biodiesel, para cada carga.

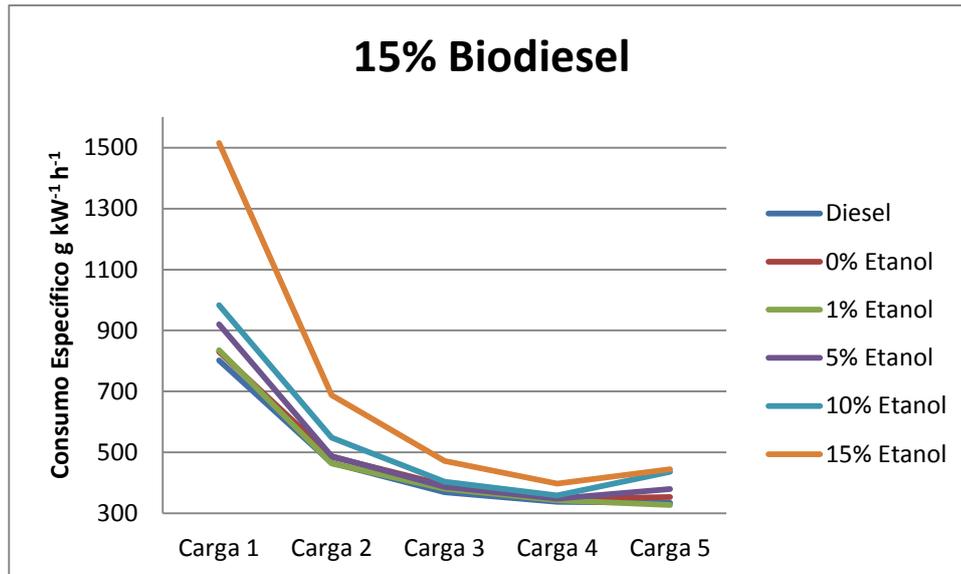
O gráfico da Figura 22 traz a adição crescente de etanol a 7% de biodiesel. Para praticamente todos os casos, quanto maior o percentual de etanol, maior foi o consumo específico, diminuindo conforme aumentou-se a carga aplicada. O maior consumo de combustível para produção da mesma energia produzida pelo diesel ocorreu com a mistura B7E15 na carga 1, com 82,9% a mais, e 0,5% para B7E1 na carga 4.

Traçando um comparativo entre as crescentes misturas de etanol, pode-se perceber que 1% não causa mudanças significativas no consumo específico, tanto em comparação a sua mistura binária quanto ao diesel tipo "A". Quando o acréscimo é de 5%, não ocorreu diferença estatística quando as cargas aplicadas foram da ordem de 3 e 4 kW, mostrando um consumo de 2% a 6,6%. Um resultado semelhante ocorreu com Guarieiro et al. (2014), que, utilizando motor diesel a 1800 rpm e com 70% de carga, abasteceu-o, dentre outros, com uma mistura ternária levando 5% de biodiesel, 6% de etanol e 89% de diesel, obtendo um incremento pouco significativo de 2% no consumo específico quando esta mistura ternária foi comparada ao B5.



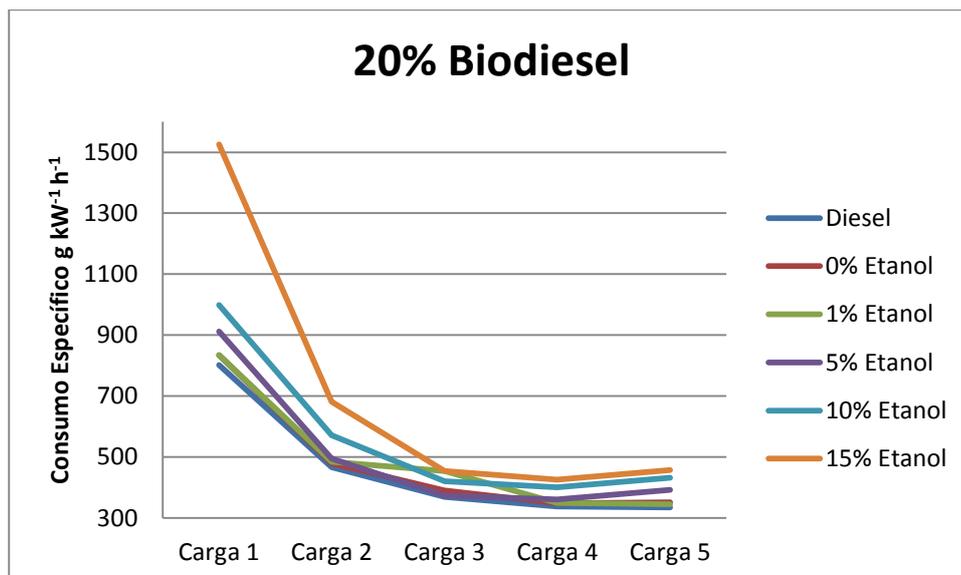
**Figura 23.** Desdobramento do CE de cada nível de etanol dentro de 10% de biodiesel, para cada carga.

Pelo gráfico apresentado na Figura 23, pode-se visualizar que, com exceção da carga 1, não houveram diferenças estatísticas com a adição de 1% de etanol a mistura comparado a sua respectiva mistura binária. Já 5% de etanol, assim como para o caso da Figura 22, não obteve diferença estatística nas cargas 3 e 4. Entretanto, foi a faixa que mais destoou do restante, apresentando consumos específicos muito acima do diesel especialmente para cargas baixas e altas. Esta mistura, apesar de ter valores de densidade, viscosidade e poder calorífico coerentes, conforme constatou a análise físico-química, registrou valores de rotação menores que as demais misturas para todas as cargas apresentadas, indicando que, de alguma forma, houve uma má atomização do combustível, com consequente combustão insuficiente e baixa geração de energia.



**Figura 24.** Desdobramento do CE de cada nível de etanol dentro de 15% de biodiesel, para cada carga.

A Figura 24 traz o comportamento das misturas com 15% fixos de biodiesel. Assim como (no gráfico com 7%), com o aumento da carga o consumo tendeu a diminuir, e a porcentagem de etanol quanto maior mais influenciou no gasto de combustível. O maior consumo ocorreu para B15E15 na carga 1, cerca de 89% a mais que o diesel, enquanto que a mistura B15E1 obteve rendimento superior ao diesel, consumindo 2,3% a menos.



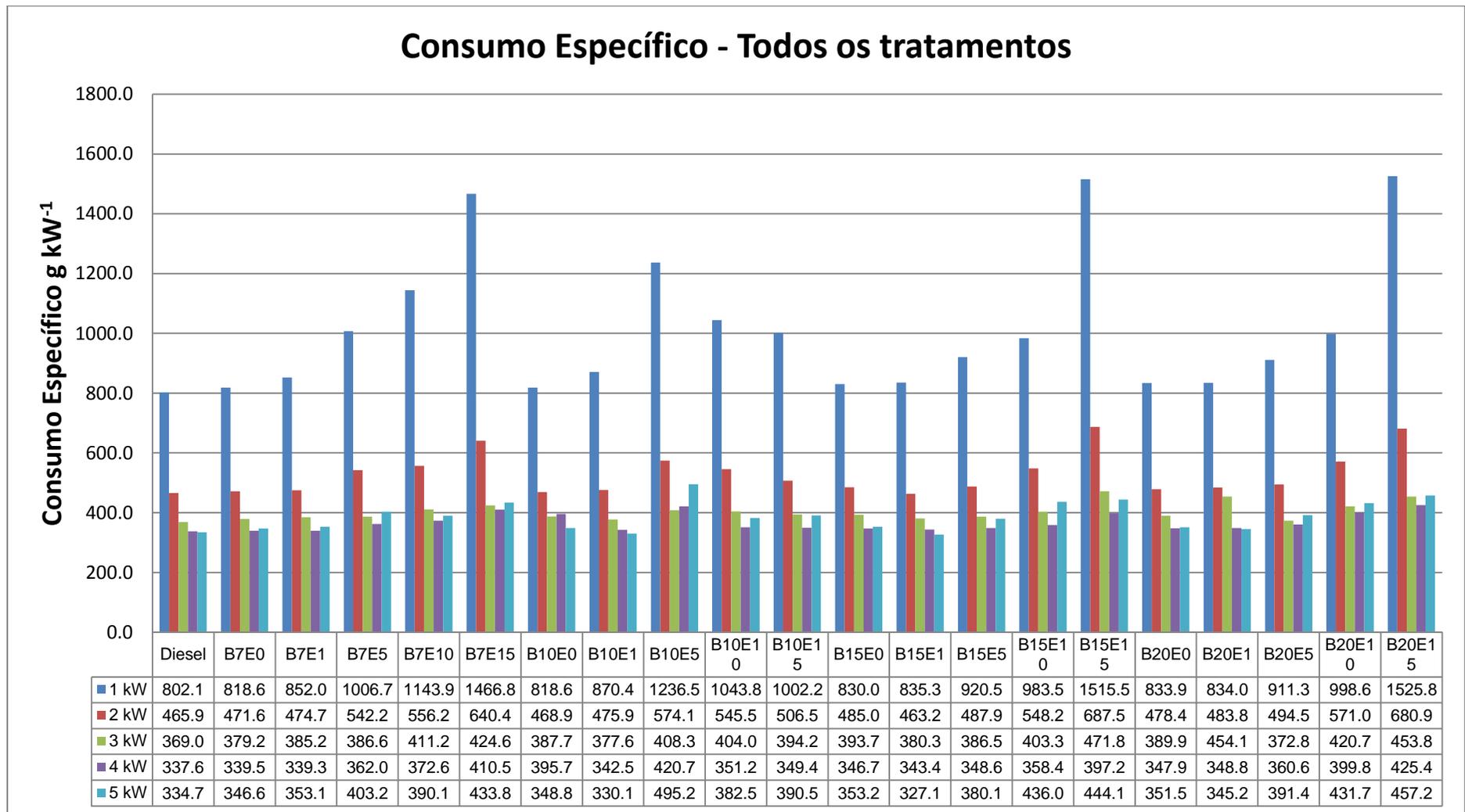
**Figura 25.** Desdobramento do CE de cada nível de etanol dentro de 20% de biodiesel, para cada carga.

Shaafi e Velraj (2015) trabalharam com motor diesel monocilíndrico destinado a fins agrícolas, abastecido com misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol com adição de alumina à mistura ternária. Em seus resultados, encontraram que o consumo específico para mistura B20 foi em alguns momentos até melhor do que o diesel fóssil, no momento em que o motor operou com cargas altas.

Por fim, o gráfico da Figura 26 traz a relação numérica dos consumos específicos por carga resistiva.

Quando são analisados os combustíveis com os melhores valores de CE considerando todas as cargas, o diesel aparece, pelo menos, entre os três melhores resultados. Isto se deve principalmente a sua menor densidade aliado a um maior poder calorífico, o que é confirmado por Mofijur et al. (2014) e Chaves et al. (2012). Outras misturas que aparecem com os melhores CE são as que apresentam 0% ou 1% de etanol, provando que, apesar do menor poder calorífico comparado ao diesel, a presença do oxigênio até determinado ponto é capaz de aumentar o número de cetano e melhorar as características de queima do combustível, conforme corroborado por Yazaki (2005).

Por sua vez, reunindo as misturas que obtiveram o menor desempenho numérico de CE para todas as cargas, os que apresentaram 15% de etanol figuraram em maior quantidade. De acordo com vários autores, conforme ocorre o acréscimo de etanol e biodiesel no diesel, ocorre também o aumento no consumo específico (HULWAN e JOSHI, 2011; ABDEL-RAHMAN, 1998; AJAV et al., 1999; BARABÁS et al., 2010; GUMUS et al., 2010), sendo o etanol, segundo Shahir et al. (2015), o que mais afeta o CE.



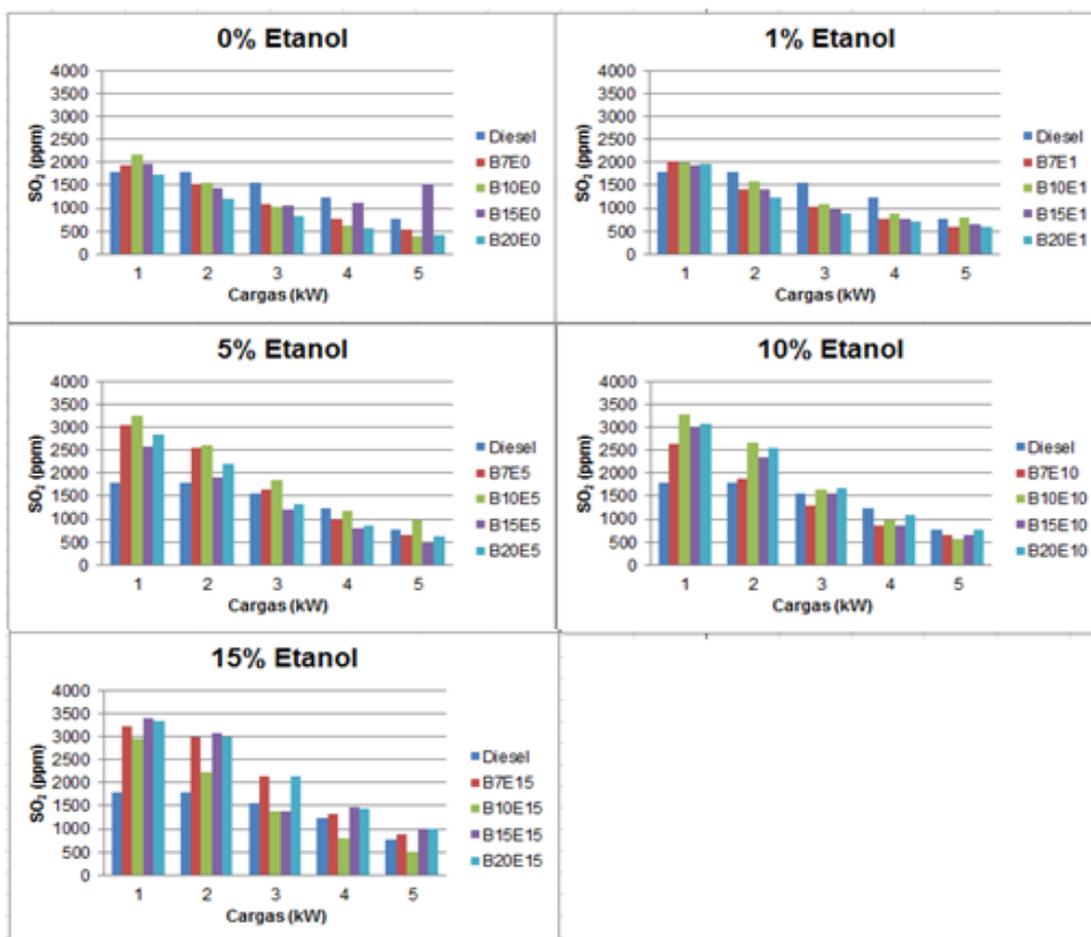
**Figura 26.** Consumo Específico absoluto por carga para todos os tratamentos.

Porém, existem exceções, sendo que nem todas as misturas seguem a tendência apresentada pelos autores acima citados. Contudo existem trabalhos na literatura, como o trazido por Shi et al. (2005), em que praticamente não houve diferença do CE do diesel com as demais misturas binárias e ternárias, e alguns, como Guarieiro et al. (2009), encontraram consumos menores. Assim, pode-se perceber que existem relatos opostos no meio científico apontando para uma série de variáveis que podem afetar o desempenho de uma mistura ternária frente ao diesel. Diferenças metodológicas, condições do ensaio, variabilidade do motor e tipos de combustíveis utilizados podem ser citados como os principais fatores verificados para esta ocorrência.

### **4.3 EMISSÃO DE SO<sub>2</sub>**

A presença de enxofre em combustíveis é até certo ponto indesejável, em vista da formação dos gases SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) e SO<sub>3</sub> (trióxido de enxofre), que são tóxicos e podem levar a formação de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ácido sulfúrico), componente da chuva ácida e que pode ser formado ainda dentro do motor, levando a corrosão de suas partes metálicas (SILVA et al., 2013). A emissão de SO<sub>2</sub> relacionada ao acréscimo crescente de biodiesel na mistura pode ser vista na Figura 27.

A literatura científica não traz muitos dados a respeito das emissões de dióxido de enxofre da mistura entre diesel-biodiesel-etanol, concentrando os estudos principalmente nas emissões de material particulado, CO, CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Alguns estudos, como o de Can et al. (2004), reportam que a adição de etanol ao diesel (sem acréscimo de biodiesel) reduzem as emissões de SO<sub>2</sub>. Guarieiro e Guarieiro (2013) afirmam que ocorre a redução das emissões de SO<sub>x</sub> e outros gases utilizando a mistura entre diesel-biodiesel-etanol. Labeckas et al. (2014) corrobora neste sentido, afirmando que a adição simultânea de etanol e biodiesel de colza reduzem o conteúdo de enxofre do diesel, contribuindo para a diminuição da emissão de SO<sub>2</sub> e fumaça.



**Figura 27.** Compilado dos gráficos com a emissão de  $\text{SO}_2$  a partir da adição de biodiesel em percentagens de etanol.

Aydin e İlkılıç (2010) compararam as emissões gasosas entre diesel, mistura diesel-biodiesel (B20) e misturas biodiesel-etanol (20% etanol e 80% de biodiesel), obtendo uma redução média da emissão de  $\text{SO}_2$  em 52% e 44%, respectivamente.

Os resultados deste trabalho, com 0% de etanol (Figura 27), mostram que apenas as misturas diesel-biodiesel, houve redução das emissões ao longo das cargas, exceto para a mistura com 15% de biodiesel quando operou com cargas altas. REIS et al. (2013) trabalhou com diversos percentuais de mistura diesel-biodiesel em motor ciclo diesel operando com diferentes demandas de carga, em que avaliou as emissões de  $\text{SO}_2$ . Segundo o autor, as emissões do dióxido de enxofre foram afetadas de forma significativa tanto pelos percentuais de biodiesel incluídos na mistura, quanto pela carga solicitada no grupo motor-gerador. Quanto maior a carga, maior o incremento nas emissões do  $\text{SO}_2$ , porém o acréscimo de biodiesel favoreceu a redução das emissões, que foram nulas quando se utilizou B80. Este resultado vai de encontro aos resultados do presente trabalho, que

tiveram uma diminuição do SO<sub>2</sub> conforme as cargas foram aumentando. Yoge (2007) ao trabalhar com a medição de emissões de diversos gases frente a um motor diesel também encontrou valores gradativamente menores do dióxido de enxofre conforme o incremento de carga. O autor, entretanto, justificou os resultados a um possível erro de medição do sensor do equipamento, visto que os resultados eram contrários a maioria da literatura consultada.

Já Miranda (2013) comparou emissões entre misturas diesel-biodiesel (B2, B5, B10, B50 e B100), atestando para uma redução contínua nas emissões de SO<sub>2</sub>, porém sem atingir a nulidade que encontrou o autor anterior, que chegou a ser 70% menor para o B100 quando em comparação ao diesel, justificado pela ausência de enxofre no biodiesel.

Quando a porcentagem de etanol foi fixada em 1%, pode-se observar em geral que todos os ensaios permaneceram com menos de 2000 ppm de enxofre e com redução contínua ao longo das cargas. A mistura B15E1 apresentou níveis de emissões menores do que quando não havia esta porcentagem de etanol, evidenciando-se neste caso uma melhor combustão com o acréscimo do etanol. As demais misturas, quando operaram a partir de 2 kW, ficaram abaixo das emissões do diesel ou próximas à ela, corroborando com a literatura no sentido de que o aumento de biodiesel traz redução das emissões de compostos de enxofre.

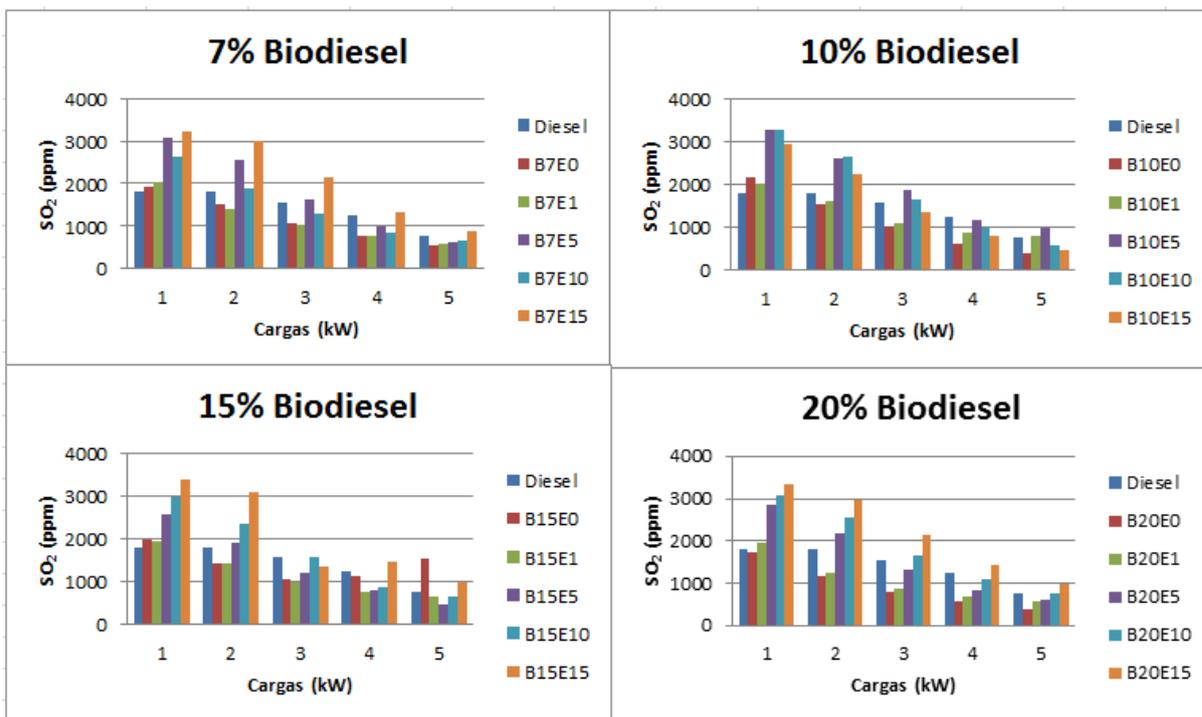
Com 5% de etanol fixos, também foi observado redução das emissões com o incremento de biodiesel ao longo das cargas, porém as emissões de algumas misturas atingiram picos maiores que 3000 ppm. B10E5 foi o ensaio com maior nível de emissão ao longo das cargas, apresentando níveis de SO<sub>2</sub> maiores que o próprio diesel. Ghorbani et al. (2011) trabalhou com diversos níveis de mistura diesel-biodiesel (B5, B10, B20, B50, B80 e B100) em um reator experimental, avaliando as emissões de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>. Segundo o autor, a mistura B10 emitiu menos CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, porém emitiu maiores quantidades de SO<sub>2</sub> do que o diesel, entretanto o mesmo não emitiu explicações sobre este resultado.

Para 10% e 15% de etanol fixos, nota-se que de maneira geral o biodiesel contribuiu para a redução das emissões ao longo das cargas, porém com mais etanol houve também maiores picos de emissões de SO<sub>2</sub>, que ocorreu principalmente em baixas cargas. Para estas duas concentrações de etanol, observa-se que as misturas com 20% de biodiesel obtiveram emissões maiores que

o diesel em praticamente todas as cargas. A literatura apresenta alguns resultados conflitantes, apontando tanto para aumentos como para diminuição de emissões com essa porcentagem de biodiesel. Lee et al. (2004) reportou emissões de SO<sub>2</sub> maiores que o diesel quando trabalhou com mistura B20, enquanto Ghorbani et al. (2011) apontou reduções de 7%.

A Figura 28 mostra a evolução das emissões analisando o acréscimo de etanol e mantendo a porcentagem de biodiesel fixa. Com 7% e 20% de biodiesel fixos, nota-se que as maiores emissões ocorreram com a maior porcentagem de etanol na mistura, ambas com picos maiores de emissões nas cargas baixas, chegando a ultrapassar 3000 ppm, atingindo níveis próximos a 1000 ppm com 4 e 5 kW. Especialmente com 20% de biodiesel, é muito nítida a escalada de emissões de SO<sub>2</sub> conforme se aumenta o percentual de etanol para todas as cargas, padrão que não é observado em nenhum outro gráfico da figura. Para 7% de biodiesel, além de B7E15, B7E5 também demonstrou valores de SO<sub>2</sub> maiores que o diesel em cargas baixas, que foram diminuindo ao longo da faixa de trabalho. Uma observação geral e relevante é que a adição de 1% de etanol proporcionou melhorias ou a manutenção das emissões frente ao diesel comparado com as respectivas misturas binárias diesel-biodiesel, considerando todos os ensaios para qualquer carga.

Considerando as porcentagens fixas intermediárias de biodiesel, observa-se que as misturas B10E5 e B10E10 apresentaram as maiores emissões de SO<sub>2</sub> para 10% de biodiesel, enquanto que, para 15%, até a carga de 2 kW, apenas porcentagens de etanol menores que 5% foram efetivamente similares ou melhores que o diesel, sendo que 1% de etanol apresentou-se como a melhor concentração em todas as cargas. A partir de 3 kW, a mistura binária B15E0 apresentou crescimento contínuo nas emissões de enxofre, com pico de aproximadamente 1500 ppm para 5 kW. Como este resultado foi atípico e esteve em desconcontro com a tendência apresentada em todos os outros ensaios realizados, possivelmente houve um erro de medida no equipamento.



**Figura 28.** Compilado dos gráficos com a emissão de SO<sub>2</sub> a partir da adição de etanol em porcentagens de biodiesel.

Um importante fato a ser frisado é de que, apesar do diesel utilizado no experimento ser S500, ou seja, teoricamente possuir no máximo 500 mg kg<sup>-1</sup> (ou ppm) de enxofre, os resultados ilustraram valores muito superiores a este, chegando a atingir mais de 1800 ppm para cargas baixas. Além disso, o acréscimo de biodiesel gerou valores maiores de enxofre para alguns casos, especialmente em cargas baixas. Uma possível explicação para isto é dada por Barros e Jardine (2016), na qual matérias primas de origem animal possuem mais enxofre que as de origem vegetal, conferindo ao biodiesel, portanto, um maior nível deste elemento.

Outro possível fator, mais provável, é a queima de óleo lubrificante juntamente com o combustível. Óleos lubrificantes possuem usualmente entre 4000 a 10.000 ppm de enxofre, que faz parte do pacote de aditivos anti-desgaste destes lubrificantes (CAPANA, 2008).

A ação detergente do álcool pode ser outra hipótese para o aumento da emissão de dióxido de enxofre. Por ser corrosivo, o álcool pode realizar um processo de limpeza em reservatórios, válvulas e injetores de borras que se formam a partir da entrada, no motor, de combustíveis de qualidade inferior ou que possuam em sua

composição substâncias que não são oxidadas completamente e se acumulam em seu interior, como a glicerina.

#### 4.4 ANÁLISE DOS PREÇOS

Dado os preços individuais dos combustíveis, listados na Tabela 12, os preços das misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol são dados na Tabela 13.

**Tabela 12.** Preços individuais por litro dos combustíveis, de acordo com o fabricante e/ou distribuidor (setembro/2015).

Combustível	Preço (R\$ l <sup>-1</sup> )
Diesel	3,00
Biodiesel	2,42
Etanol Anidro	2,00

**Tabela 13.** Preços das misturas diesel-biodiesel e diesel-biodiesel-etanol (em R\$ l<sup>-1</sup>) com base nos preços individuais dos combustíveis (setembro/2015).

% de Biodiesel	% de Etanol				
	0	1	5	10	15
7	2,96	2,95	2,91	2,86	2,81
10	2,94	2,93	2,89	2,84	2,79
15	2,91	2,90	2,86	2,81	2,76
20	2,88	2,87	2,83	2,78	2,73

Conforme pode-se observar, o acréscimo de etanol na mistura ocasiona uma redução gradativa dos preços, que chega a ser R\$ 0,15 menor quando comparada a mistura binária diesel-biodiesel. O biodiesel também provoca queda do preço final, tendo o B20E0 um custo de R\$ 0,12 menor que o diesel tipo “A”. A maior diferença de preços ocorre com a mistura de maior quantidade de biocombustíveis, B20E15, com custo 9% menor que o diesel.

Os preços listados na Tabela 13 seguiram a alta registrada no ano de 2015 pela ANP. Segundo a agência, o preço do diesel foi de R\$ 2,04/litro em março, cerca de 3,3% maior que o do biodiesel, que foi de R\$ 1,98/litro. Já em abril, o diesel passou a custar R\$ 2,96/litro. Entretanto, conforme as ressalvas já realizadas sobre esta análise econômica, os verdadeiros valores a serem praticados no mercado são influenciados por mais fatores, como distribuição e logística, servindo apenas como ponto de partida para uma análise mais complexa. Como exemplo, a EMBRAPA

(2015) afirma que o B20 pode ser R\$ 0,09 mais barato que o diesel considerando as regiões que são produtoras de biodiesel, como o Sul e Centro-Oeste.

#### 4.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os resultados de Eficiência Energética (EE), obtidos para todos os ensaios em função da carga resistiva, podem ser vistos na Figura 29. Dentre todos os tratamentos, o que apresentou a melhor EE foi B10E15, com 27,15% na carga de 4 kW, sendo aproximadamente 10,5% mais eficiente que o diesel tipo "A". Subbaiah et al. (2010) também encontraram B10E15 como a mais eficiente das misturas ternárias testadas, apresentando 28,2% de eficiência, 3,67% a mais que o diesel, para todas as cargas aplicadas. Já as EE mais baixas ficaram para a carga de 1 kW, sendo B7E15, B20E15 e B15E15, com uma eficiência 39,4%, 38,9% e 35,9% menores que o diesel, respectivamente.

Traçando uma análise geral do desempenho das misturas, nota-se que apenas três delas possuem uma eficiência superior ao diesel considerando todas as cargas resistivas, sendo B15E1, B20E1 e B20E0, dentro das quais B15E1 possui o melhor desempenho em 4 das 5 cargas, mais especificamente de 2 kW até 5 kW. Misturas com 15% de etanol obtiveram o pior desempenho quando adicionadas de 20% de biodiesel, tendo desempenho inferior ao diesel para todas as cargas, enquanto 10% de biodiesel revelou-se a melhor concentração, sendo superior ao combustível fóssil em 2 kW, 3 kW e 4 kW. Já para 10% de etanol, 7% e 10% de biodiesel mostraram eficiência maior nas cargas 3 e 4 kW, enquanto que para 5% do álcool as maiores concentrações de biodiesel foram mais efetivas quando comparadas ao diesel. Em outras palavras, de modo geral, baixas porcentagens de etanol (1 e 5%) mostraram-se mais energeticamente eficientes quando misturadas com altas concentrações de biodiesel (15 e 20%), enquanto as mais altas concentrações do referido álcool (10 e 15%) melhoraram seu desempenho com as mais baixas porcentagens do biodiesel (7 e 10%). Este resultado vai de encontro ao afirmado por Shahir et al. (2014), em que o mesmo infere um máximo de 20 a 25% de biodiesel e 5% de etanol podem ser adicionados de modo efetivo e eficiente ao diesel mineral.

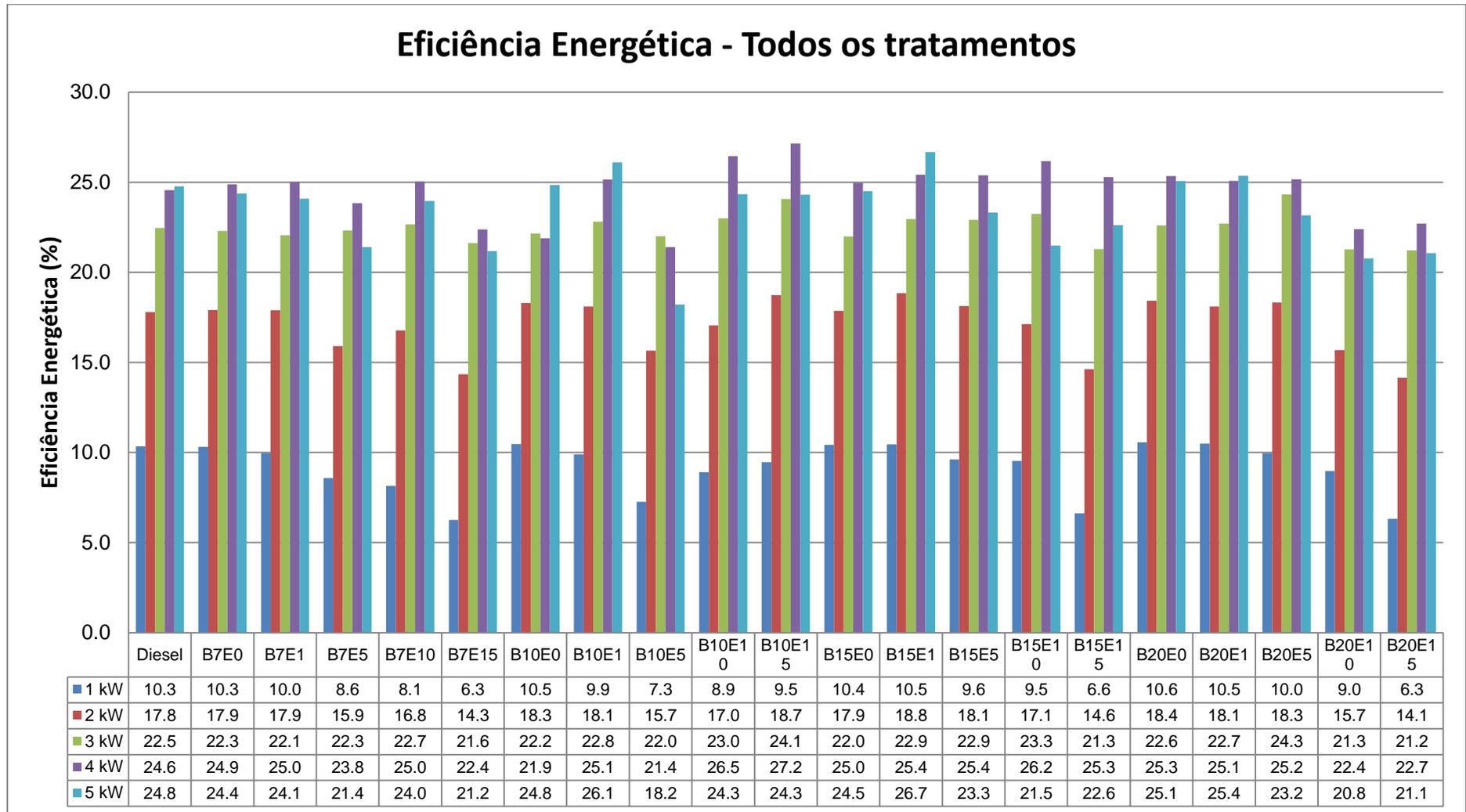
Barabás et al. (2010) realizou testes com motor de compressão interna utilizando misturas do tipo BxDyEz, no qual x indica o percentual de biodiesel, y o de

diesel e z o de etanol, comparando os resultados com diesel. Assim, testando B10D85E5, B15D80E5 e B25D70E5, observou que a eficiência do motor aumentou conforme também houve incremento na carga, tendo porém o diesel o melhor desempenho em todas as cargas aplicadas. A mistura com o menor teor de biocombustíveis foi a que apresentou melhor eficiência se comparada às demais, assim como a mistura ternária com 25% de biodiesel e 5% de etanol foi a de menor desempenho para todas as cargas.

Kannan et al. (2012) trabalhou com misturas entre diesel-etanol-biodiesel comparando-as com o desempenho do biodiesel puro e do diesel puro. Os autores também encontraram valores de desempenho da mistura ternária superiores ao do diesel puro, na utilização da mistura B20E5, tanto em cargas baixas (1% superior) quanto em cargas altas (7% superior). Segundo os autores, isto provavelmente se deve ao oxigênio do etanol propiciar uma combustão mais completa, aumentando portanto, a eficiência. Além disso, o etanol limita a perda de calor no cilindro em virtude da menor temperatura de chama, ajudando a incrementar a eficiência. Guarieiro e Guarieiro (2013) também corroboram com este indício, afirmando que a eficiência de combustão do diesel pode ser melhorada com a adição de combustíveis oxigenados, como o etanol, biodiesel e óleos vegetais.

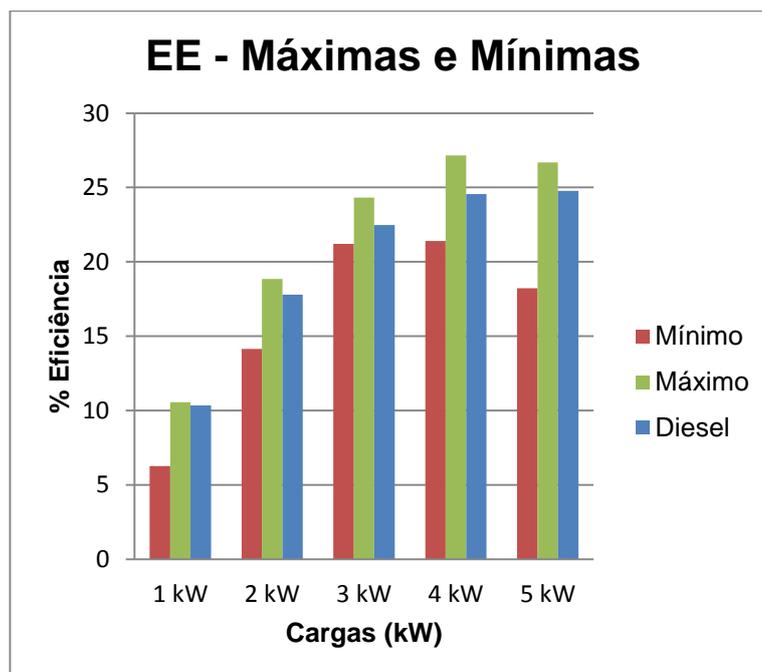
Labeckas et al. (2014) conduziram estudos experimentais com motor de combustão de ignição por compressão de quatro cilindros, analisando os efeitos do uso de 5%, 10%, 15% em volume de etanol anidro no diesel, comparando seu desempenho com o diesel comum e com a mistura entre 15% de etanol, 5% de biodiesel e 80% de diesel. Os autores encontraram uma eficiência semelhante entre o diesel e a mistura ternária, afirmando que esta última provocou uma melhora na combustão e sugerindo que seu uso pode ser feito no motor diesel de maneira satisfatória.

Ferreira et al. (2013) conduziu ensaios com misturas diesel-biodiesel com adição progressiva de etanol em motor diesel quatro cilindros, rotação constante mantida a  $1800 \pm 5$  rpm e carga também constante, a  $1580 \pm 10$  W, conectado diretamente a um gerador. Os autores observaram que a adição de etanol provocou uma diminuição da eficiência do motor, provavelmente devido ao menor número de cetano do etanol.



**Figura 29.** Eficiência Energética absoluta por carga para todos os tratamentos

A Figura 30 ilustra as marcações máximas e mínimas das EE por carga resistiva. As maiores diferenças entre estas marcações ocorrem nas cargas inicial e final (40,75% e 31,7%, respectivamente), diminuindo em direção à carga central (3 kW), que é de 12,8%. A carga de 4 kW apresenta os melhores valores de eficiência, tanto máximos como mínimos.



**Figura 30.** Eficiências máximas e mínimas para cada carga, comparado ao diesel.

Rigotte (2014) trabalhou com conjunto motor-gerador utilizando diesel, biodiesel e suas misturas binárias (B10, B20 e B50) em cinco cargas resistivas (1, 2, 3, 4 e 5 kW). Este autor observou uma diferença entre as EE máxima e mínima similar ao encontrado para a carga de 3 kW (11%), porém esta diferença permaneceu a mesma para todas as cargas avaliadas pelo autor. Além disso, o mesmo verificou um aumento progressivo da EE de acordo com a carga aplicada, porém como foi possível observar nos dados referentes ao consumo específico (Tópico 4.2.1), havia um aumento deste quando da passagem da carga 4 para 5 kW, que acabou por se refletir também na eficiência, sendo estas duas grandezas inversamente proporcionais.

Tendo em consideração a diversidade de observações listadas na literatura em comparação com o presente trabalho, pode-se estabelecer a hipótese, de acordo com Rigotte (2014), de que os detalhes da construção do motor influenciam diretamente nos resultados de eficiência energética obtidos, de modo a favorecer ou

reduzir certas características do combustível e, portanto, reportar comportamentos específicos de um mesmo combustível para motores distintos.

## 5. CONCLUSÕES

De acordo com a metodologia e objetivos traçados no presente trabalho, foi possível observar que:

- Os valores de densidade e viscosidade ficaram dentro das especificações exigidas pela ANP para todas as misturas testadas, não diferindo muito das do diesel tipo “A”;
- Os valores de poder calorífico diminuíram conforme a adição de etanol e aumentaram conforme o acréscimo de biodiesel, sendo o diesel o combustível com o maior valor dentre todos;
- O diesel se destaca por aparecer entre os três menores consumos específicos absolutos para todas as cargas testadas.
- As misturas B10E1 e B15E1 foram as únicas misturas a apresentar menor consumo específico absoluto comparadas ao diesel;
- As misturas com 1% de etanol não diferiram estatisticamente no CE das misturas binárias diesel-etanol;
- A maior eficiência energética encontrada foi para a mistura B10E15, com 27,15%. Entretanto, as únicas misturas a apresentarem uma maior eficiência que o diesel tipo “A” para todas as cargas testadas foram B15E1, B20E1 e B20E0.
- De igual modo, as misturas B15E1, B20E1 e B20E0 foram as únicas a figurarem entre cinco menores emissões de SO<sub>2</sub> para todas as cargas aplicadas.
- A adição de biocombustíveis ao diesel baixou seu preço, tornando-as competitivas.
- As misturas com 1% de etanol, em um cenário geral, merecem atenção, frente a seus resultados perante as outras misturas e ao diesel tipo “A”, destacando-se a mistura B15E1, que apresentou valores de CE, EE, SO<sub>2</sub> superiores ao diesel, além de ser mais barata.

## **6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para trabalhos futuros, denota-se a importância na investigação de misturas ternárias com porcentagens de etanol que figurem entre 1% a 5%, visto que uma maior porcentagem deste álcool pode ser incorporada mantendo-se ou aumentando-se o desempenho se comparado ao diesel de petróleo. Ensaio a campo e com maiores tempos de trabalho no motor podem ser interessantes e trazer maiores informações a respeito do comportamento de misturas binárias e ternárias frente ao diesel.

Outra sugestão seria uma possível modificação no motor visando o recebimento das misturas ternárias, de modo a verificar a máxima eficiência que esta mistura é capaz de fornecer. Estudos de estabilidade das misturas ternárias, assim como um estudo econômico mais avançado, levando-se em consideração aspectos logísticos e demais fatores capazes de influenciar o preço final das misturas, revelam-se interessantes e capazes de contribuir para um possível estabelecimento deste combustível no mercado de transportes nacional.

## 7. REFERÊNCIAS

- AL-ABDULLAH, M. H., et al. **Flash points and volatility characteristics of gasoline/diesel blends**. Fuel. Vol. 153, p. 67-69. 2015.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. 2015.
- AJAV, E. A.; SINGH, B.; BHATTACHARYA, T.K. **Performance of a stationary diesel engine using vaporized ethanol as supplementary fuel**. Biomass Bioenergy. V.15, p. 493-502. 1998.
- AJAV, E. A., et al. **Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel**. Biomass and Bioenergy. V. 17, p. 357-365. 1999.
- AL-HASSAN, M., et al. **An Experimental Study on the Solubility of a Diesel-Ethanol Blend and on the Performance of a Diesel Engine Fueled with Diesel-Biodiesel-Ethanol Blends**. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. V. 6, p. 147-153. 2012.
- AL-HASSAN, M.; AL-SHANNAG, M. **An experimental study on the solubility of a diesel-ethanol blend and on the performance of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends**. Jordan J Mech Ind Eng. V. 6, p. 147-153. 2012.
- ALPTEKIN, E., et al. **Using waste animal fat biodiesels-bioethanol-diesel fuel blends in a DI diesel engine**. Fuel. V.157, p. 245-254. 2015.
- ATABANI, A, et al. **A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 16, p. 2070-2093. 2012.
- ATADASHI, I., et al. **The effects of water on biodiesel production and refining Technologies: a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 16, p. 3456-3470. 2012.
- AVULAPATI, M. M. **Puffing and micro-explosion of diesel-biodiesel-ethanol blends**. Fuel. V. 166, p. 59-66. 2016.
- AYDIN, H.; İLKILIÇ, C. **Effect of ethanol blending with biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a CI engine**. Applied Thermal Engineering. V.30, p. 1199-1204. 2010.
- BARABÁS, I.; TODORUT, I-A. **Utilization of biodiesel-diesel-ethanol blends in CI engine**. Biodiesel-Quality, Emissions and By-products. InTech Publisher. 2011.
- BARABAS, I., et al. **Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol blends**. Fuel. Vol. 89, p. 3827-3832. 2010.

BARROS, T. D.; JARDINE, J. G. **Gordura animal**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fj1om7kf02wyiv802hvm3jholyoom.html>>. Acesso em 20/01/2016.

BART, J. C. J.; PALMERI, N.; CAVALLARO, S. **Biodiesel as a renewable energy source**. Biodiesel Science and Technology, 2010. p. 1-49. 2010.

BASKAR, G., AISWARYA, R. **Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 57, p. 496-504. 2016.

BEN – **Balanco Energético Nacional**. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf)>. Acesso em 02/01/2016.

BHALE, P.V., et al. **Improving the low temperature properties of biodiesel fuel**. Renewable Energy. V.34, p. 794-800. 2009.

BHUIYA, M. M. K., et al. **Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel – Part 2: Properties, performance and emission characteristics**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 55, p. 1129-1146. 2016

BORGES, M.; DÍAZ, L. **Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 16, p. 2839-2849. 2012.

BRIEU, T.P. **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel: Um Balanço da Primeira Fase até 2008**. USP, 2009.

CAN, O., et al. **Effects of ethanol addition on performance and emission characteristics of a turbocharged indirect injection diesel engine running at a different injection pressures**. Energy Conversion and Management. V.45, p. 2429-2440. 2004.

CANAKCI, M. **Performance and exhaust emissions of a biodiesel engine**. Applied Energy. V.83, p. 594-605. 2006.

CANAKCI, M.; GERPEN, J. V. **Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids**. Transactions-American Society of Agricultural Engineers. V.44, p. 1429-1436. 2001.

CAPANA, G. H. **Estudo do impacto do enxofre presente no diesel na emissão de poluentes e em tecnologia de pós tratamento de gases de escape**. USP, 2008.

CASTELLANELLI, M., et al. **Desempenho de motor ciclo diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel**. Revista Engenharia Agrícola. V.28, p 145-153. 2008.

CHAVES, L. I. et al. **Variação da potencia de saída de um gerador em função da utilização de biodiesel de crambe e soja**. Acta Iguazu. V.1, p 1-7, 2012.

CHEENKACHORN, K. e FUNGTAMMASAN, B. **Biodiesel as an additive for diesohol**. International Journal of Green Energy. V. 6, p. 57-72. 2009.

CHOTWICHIE, A.; LUENGNARUEMITCHAI, A.; JAI-IN, S. **Utilization of palm oil alkyl esters as an additive in ethanol-diesel and butanol-diesel blends**. Vol.88, p. 1618-1624. 2009.

CUMMINS. **What is Euro 6?**. 2016. Disponível em <<http://www.cumminseuro6.com/what-is-euro-6>>. Acesso em 24/02/2016.

D'AGOSTO, M. A., et al. **Evaluating the Potential of the Use of Biodiesel for Power Generation in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V.43, p. 807-817. 2015.

D'AMBROSIO, S., et al. **A control-oriented real-time semi-empirical model for the prediction of NOx emissions in diesel engines**. Applied Energy. V.130, p. 265-279. 2014.

DI, Y.; CHEUNG, C. S.; HUANG, Z. **Comparison of the effect of biodiesel-diesel and ethanol-diesel on the gaseous emission of a direct-injection diesel engine**. Atmospheric Environment. V.43, p. 2721-2730. 2009.

ECHIM, C., et al. **Improvement of cold filter plugging point of biodiesel from alternative feedstocks**. Fuel. V.93, p. 642-648.

EDGAR, J. **Brake Specific Fuel Consumption – A really useful concept**. AutoSpeed. 2011.

EJIM, C. E. **Analytical study for atomization of biodiesel and their blends in atypical injector: surface tension and viscosity effects**. Fuel, V.86, p. 1534-1544. 2007.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Biodiesel pode tornar diesel mais barato**. Disponível em <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2945806/biodiesel-pode-tornar-diesel-mais-barato>>. Acesso em 21/01/2016. 2015.

FAROBIE, O.; MATSUMURA, Y. **A comparative study of biodiesel production using methanol, ethanol, and tert-butyl methyl ether (MTBE) under supercritical conditions**. Bioresource Technology. V. 191, p. 306-311. 2015.

FASSINO, W. F. **Fatty acids composition as a means to estimate the high heating value (HHV) of vegetable oils and biodiesel fuels**. Energy. V. 35, p. 4949-4954. 2010.

FERREIRA, V. P., et al. **Performance and emissions analysis of additional ethanol injection on a diesel engine powered with a blend of diesel-biodiesel.** Energy for Sustainable Development. V.17, p. 649-657.2013.

GABRIEL FILHO, A. et al. **Desempenho de trator agrícola em três superfícies de solo e quatro velocidades de deslocamento.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, V. 14, n. 3, p. 333-339. 2010.

GARCEZ, C. A. G.; VIANNA, J. N. S. **Brazilian Biodiesel Policy: Social and Environmental considerations of sustainability.** Energy. V. 34, p. 645-654. 2009.

GHORBANI, A. et al. **A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler.** Applied Energy. V. 88, p. 4725-4732. 2011.

GOMES, C. W. **Diagnose de motores diesel por meio de redes bayesianas.** FEI, 2008.

GUARIEIRO, L. L. N., et al. **Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> emitted by a diesel engine fueled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils.** Atmospheric Environment. V.43, p. 2754-2761. 2009.

GUARIEIRO, L. L. N., e GUARIEIRO, A. L. N. **Vehicle Emissions: What Will Change with Use of Biofuel?** InTech. p. 357-386. 2013.

HULWAN, D. B.; JOSHI, S.V. **Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content.** Applied Energy. V. 88, p. 5042-5055. 2011.

HANSEN, A. C.; ZHANG, Q.; LYNE, P. W. L. **Ethanol-diesel fuel blends – a review.** Bioresource Technology. V.96, p. 277-285. 2006.

HANSEN, A. C., et al. **On-farm evaluation of diesel fuel oxygenated with ethanol.** American Society of Agricultural Engineers paper. 2001.

HE, B. **Advances in emission characteristics of diesel engines using different biodiesel fuels.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 60, p. 570-586. 2016.

HE, H.; YU, Y. **Selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> over Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst: from reaction mechanism to diesel engine test.** Catalysis Today. V.100, p. 37-47. 2005.

HELWANI, Z., et al. **Technologies for production of biodiesel focusing on green catalytic techniques: a review.** Fuel Processing Technology. V. 90, p. 1502 – 1514.

HERREROS, J. M., et al. **Extending the environmental benefits of ethanol-diesel blends through DGE incorporation.** Applied Energy. V.146, p. 335-343. 2015.

HOMRICH, G. **Regulação de tensão em Geradores de Indução**. 2013. Disponível em <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/78523/000898517.pdf?sequence=1>>. Acesso em 29/06/15.

HUANG, J., et al. **Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fueled with ethanol-diesel blends**. *Applied Thermal Engineering*. V. 29, p. 2484-2490. 2009.

HUSSAN, M. J., et al. **Tailoring key fuel properties of diesel-biodiesel-ethanol blends for diesel engine**. *Journal of Cleaner Production*. V.51, p. 118-125. 2013.

IMTENAN, S., et al. **Emission and Performance Improvement Analysis of Biodiesel-diesel Blends with Additives**. *Procedia Engineering*. V. 90, p. 472-477. 2014.

INSTITUTO DE ENGENHARIA. **A evolução dos motores a diesel no Brasil**. 2013. Disponível em <[http://www.institutodeengenharia.org.br/site/noticias/exibe/id\\_sessao/4/id\\_noticia/6917/A-evolu%C3%A7%C3%A3o-dos-motores-a-diesel-no-Brasil](http://www.institutodeengenharia.org.br/site/noticias/exibe/id_sessao/4/id_noticia/6917/A-evolu%C3%A7%C3%A3o-dos-motores-a-diesel-no-Brasil)>; Acesso em 24/02/16.

JIAQIANG, E., et al. **Effects of fatty acid methyl esters proportion on combustion and emission characteristics of a biodiesel fueled diesel engine**. *Energy Conversion and Management*. V. 117, p. 410-419. 2016.

KANNAN, G. R. **Effect of injection pressures and timings on the performance emission and combustion characteristics of a direct injection diesel engine using biodiesel-diesel-ethanol blend**. *SAE Technical Papers*. 2013.

KHOOBBAKHT, G., et al. **Optimization of operating factors and blended levels of diesel, biodiesel and ethanol fuels to minimize exhaust emissions of diesel engine using response surface methodology**. *Applied Thermal Engineering*. *In Press*. 2016.

KWANCHARON, P.; LUENGNARUEMITCHAI A.; JAI-IN, S. **Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties and its emission characteristics from diesel engine**. *Fuel*. V.86, p. 1053 – 1061. 2007.

KUMAR, P.; REHMAN, A. **Bio-diesel in homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V.56, p. 536-550. 2016.

LABECKAS, G., et al. **The effect of ethanol-diesel-biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine**. *Energy Conservation Management*. V.79, p. 698-720. 2014.

LAPUERTA, M., et al. **Emissions from a diesel-bioethanol-blend in automotive diesel engine**. *Fuel*. V. 87, p. 25-31. 2008.

LEE, S. W., et al. **Emission reduction potential from the combustion of soy methyl ester fuel blended with petroleum distillate fuel.** Fuel. V.83, p. 1607 – 1613. 2004.

LEI, J., et al. **A novel emulsifier for ethanol-diesel blends and its effect on performance and emissions of diesel engine.** Fuel. V.93, p. 305-311. 2012.

LETCHER, T. **Ternary liquid-liquid phase diagrams for diesel fuel blends.** South Africa Journal of Science. V. 76, p. 130-132. 1980.

LEUNG, D. Y. C., et al. **A review on biodiesel production using catalyzed transesterification.** Applied Energy. V. 87, p. 1083-1095. 2010.

LI, Z. H., et al. **Physico-chemical properties of ethanol-diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines.** Renewable Energy. V.30, p. 967-976. 2005.

LÔBO, I. P., et al. **Biodiesel: Parâmetros de Qualidade e Métodos Analíticos.** Química Nova. V. 32, p. 1596-1608. 2009.

MA, Y., et al. **Biodiesel production using unrefined methanol as transesterification agent and the research of individual effect of impurities.** Energy. V. 82, p. 361 – 369. 2015.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário Estatístico da Agroenergia.** 2013. Disponível em <  
<http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/agroenergia/publicacoes>  
>. Acesso em 28/06/15.

MAREK, N.; EVANOFF, J. **The use of ethanol blended diesel fuel in unmodified, compression ignition engines: an interim case study.** Proceedings of the air and waste management association 94<sup>th</sup> annual conference and exhibition. 2001.

MAZUBERT, A., et al. **Intensified processes for FAME production from waste cooking oil: A technological review.** Chemical Engineering Journal. V. 233, p. 201-223. 2013.

MEIRING, P., et al. **Ethanol-based multiple component fuels for diesel tractors.** American Society of Agricultural Engineers paper. 1981.

MILAZZO, M. F., et al. **Sustainable soy biodiesel.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 27, p. 806-852. 2013.

MIRANDA, G. R., et al. **Avaliação das emissões de CO, NO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> provenientes da combustão, em motor monocilíndrico, de misturas de diesel e biodiesel de óleo de fritura.** Revista de Ciências Ambientais. V.7, p. 33-43. 2013

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Poluentes Atmosféricos**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos>>. Acessado em 05/01/2016.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>>. Acessado em 22/02/2016.

MOFIJUR, M., et al. **Role of biofuel and their binary (diesel-biodiesel) and ternary (ethanol-biodiesel-diesel) blends on internal combustion engines emission reduction**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 53, p. 265-278. 2016.

MOON, Z., et al. **Mixture condition, combustion and sooting characteristics of ethanol-diesel blends in diffusion flames under various injection and ambient conditions**. Fuel. V.113, p. 128-139. 2013.

MURCAK, A., et al. **Effect of injection timing to performance of a diesel engine fueled with different diesel-ethanol mixtures**. Fuel. V.153, p. 569-577. 2015.

MURUGESAN, A. **Biodiesel as an alternative fuel for diesel engines – a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V.13, p 653-662. 2009.

NOVACANA. **Processos de fabricação do etanol**. Disponível em <<http://www.novacana.com/etanol/fabricacao/>>. Acessado em 10/01/2016.

PARK, S.H., et al. **Impact of biodiesel in bioethanol blended diesel on the engine performance and emissions characteristics in compression ignition engine**. Applied Energy. V 99, p. 334-343. 2012

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro. FISPQ – Ficha de Informação Sobre Produtos Químicos – **Óleo Diesel S500**. Disponível em <<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/f69c2f0043a796c4b3f4bfec2d0136c/fispq-oleodiesel-s500.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 28/06/14.

PIDOL, I., et al. **Ethanol-biodiesel-diesel fuel blends: performances and emissions in conventional diesel and advanced low temperature combustions**. Fuel. V. 93, p. 329-338. 2012.

PUQUEVICZ, A. L., et al. **Análise Comparativa da Utilização de Diesel e Biodiesel no Funcionamento de um Grupo Gerador**. Da Vinci. V.5, p. 179-195. 2008.

RAELE, R., et al. **Scenarios for the second generation ethanol in Brazil**. Technological Forecasting and Social Change. V. 87, p. 205-233. 2014.

RAHIMI, H., et al. **Diesterol: an environment friendly IC engine fuel**. Renewable Energy , Vol 34, p. 335-342. 2009.

RAKOPOULOS, C. D., et al. **Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol-diesel fuel blends.** Energy. V.32, p. 1791 – 1808. 2007.

RAKOPOULOS, C. D., et al. **Impact of properties of vegetable oil, bio-diesel, ethanol and *n*-butanol on the combustion and emissions of turbocharged HDDI diesel engine operating under steady and transient conditions.** Fuel. V.156, p. 1-19. 2015.

RAMOS, M. J., et al. **Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties.** Bioresource Technology. V. 100, p. 261-268. 2009.

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, p. 98-103. 2011.

REIS, E. F., et al. **Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 17, p. 565-571. 2013

REYES, Y.; ARANDA, D. A. G.; SANTANDER, L. A. M.; CAVADO, A.; BELCHIOR, C. R. P. **Action principles of co-solvent additives in ethanol-diesel blends: stability studies.** Energy Fuels. V. 23, p. 2731 – 2735. 2009.

RIGOTTE, M. R. **Desempenho de conjunto motor-gerador utilizando biocombustíveis sob cargas variadas.** UNIOESTE, 2014.

SELVAN, V. A. M., et al. **Effects of cerium oxide nanoparticle addition in diesel and diesel-biodiesel-ethanol blends on the performance and emission characteristics of a CI engine.** ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. V.4, p. 1-6. 2009.

SHAAFI, T., et al. **Effect of dispersion of various nanoadditives on the performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with diesel, biodiesel and blends – A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 49, p. 563-573. 2015.

SHAAFI, T; VELRAJ, R. **Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel-soybean biodiesel blend fuel: Combustion, engine performance and emissions.** Renewable Energy. V. 80, p. 655-663. 2015.

SHAHID, E. M.; JAMAL, Y. **Production of biodiesel: a technical review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. V.15, p. 4732-4745. 2011.

SHAHIR, S. A., et al. **Feasibility of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as existing CI engine fuel: An assessment of properties, material compability, safety and combustion.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. V.32, p. 379-395. 2014.

- SHAHIR, S. A., et al. **Performance and emission assessment of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. V.48, p. 62-78. 2015.
- SHENG, C., AZEVEDO, J. L. T. **Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data.** Biomass and Bioenergy. V. 28, p. 499-507. 2005.
- SHI, X., et al. **Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine.** Fuel. V. 84, p. 1543-1549. 2005.
- SHI, X., et al. **Emission reduction potential of using ethanol-biodiesel-diesel fuel blend on a heavy-duty diesel engine.** Atmospheric Environment. V.40, n.14, p. 2567-2574. 2006.
- SHI, X., et al. **Combination of biodiesel-ethanol-diesel fuel blend and SCR catalyst assembly to reduce emissions from a heavy-duty diesel engine.** Journal of Environmental Sciences. V.20, p. 177-182. 2008.
- SILVA, J. P. A. **Estudo da produção de etanol por *Pichia stipitis* empregando hidrolisado de palha de arroz.** USP. 2011.
- SILVA, M. J., et al. **Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V.16, n.3, p. 320-326, 2012.
- SILVA, T. E. P., et al. **Enxofre: Um poluente em potencial na composição do óleo diesel brasileiro.** IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 2013.
- SOBRAL, S. P., et al. **Determinação do índice de acidez total em bioetanol por titulação potenciométrica automatizada.** 5º Congresso Brasileiro de Metrologia. 2009. Disponível em <[http://xrepo01s.inmetro.gov.br/bitstream/10926/370/1/2009\\_SobralRibeiroFraga.pdf](http://xrepo01s.inmetro.gov.br/bitstream/10926/370/1/2009_SobralRibeiroFraga.pdf)>. Acesso em 28/06/15.
- SORANSO, A. M., et al. **Desempenho dinâmico de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado de óleo residual.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V12, n.5, p. 553-559, 2008.
- STATTMAN, S. L., et al. **Governing biofuels in Brazil: A comparison of ethanol and biodiesel policies.** Energy Policy. V. 61, p. 22-30. 2013.
- SUAREZ, P. A. Z., et al. **Transformação de triglicerídeos em combustíveis, materiais poliméricos e insumos químicos: algumas aplicações da catálise na oleoquímica.** Química Nova. V. 30, p. 667-676. 2007.
- SUBBIAH, G. V., et al. **Rice bran oil biodiesel as an additive in diesel-ethanol blends for diesel engines.** International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. V.3, p. 334-342. 2010.
- TORRES-JIMENEZ, E., et al. **Physical and chemical properties of ethanol-biodiesel blends for diesel engines.** Energy Fuels. V. 24, p. 2002 – 2009. 2009.

TSE, H., et al. **Investigation on the combustion characteristics and particulate emissions from a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-blends**. Energy. V. 83, p. 343-350. 2015.

USDA – United States Department of Agriculture. **World Agricultural Supply and Demand Estimates Report (WASDE)**. Disponível em: <<http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/>>. 2014. Acessado em 19/06/15.

VENSON, G. G., et al. **Caracterização Experimental de um injetor de combustível líquido do tipo cônico assistido por ar**. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2010.

VOLPATO, C. E. S., et al. **Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B100)**. Ciência e tecnologia, Lavras, v. 33, n.4, p. 1125-1130, ago. 2009.

VYAS, A. P., et al. **A review on FAME production processes**. Fuel. V. 89, p. 1-9. 2010.

WU, C., et al. **Artificial neural network model to predict cold filter plugging point of blended diesel fuels**. Fuel Processing Technology. Vol. 87, p 585-590. 2006.

XING-CAI, L., et al. **Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol-diesel blend fuel**. Fuel. V. 8, p. 2013-2020. 2004.

YAAKOB, Z., et al. **Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V.18, p. 184-193. 2013.

YANAI, K., et al. **Desempenho auxiliar de trator com e sem o acionamento da tração dianteira auxiliar**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. V. 34, n.8, p. 1427-1434. 1999.

YAZAKI, C. K. **Mitigação de poluentes em veículos que utilizam motores de ignição por compressão a partir do uso de combustíveis a base de óleos vegetais**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 143 p. 2005.

YILMAZ, N. **Comparative analysis of biodiesel-ethanol-diesel and biodiesel-methanol-diesel blends in a diesel engine**. Energy. V.40, n.1, p. 210-213. 2012.

YOGE, J. C. R. **Análises Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com Mistura de Diesel e Gás Natural**. UFPB, 2007.

ZARPELON, F. **As Especificações do Álcool Focadas para o Mercado Mundial**. EMBRAPA. 2010.

ZHANG, R. D., et al. **Preparation and emission characteristics of ethanol-diesel fuel blends**. Journal of Environmental Science. V.16, p. 793-796. 2004.

ZHU, L., et al. **Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol-biodiesel blends.** Fuel. V.90, p. 1743-1750. 2011.

ZHU, L., et al. **Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol.** Science of the Total Environment. V.408, p. 914-921. 2010.

ZOLDY, M. **Ethanol-biodiesel-diesel blends as a diesel extender option on compression ignition engines.** Transport. V. 26, p. 303-309. 2011.