

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

CÂMPUS DE JABOTICABAL

Uso de biodiesel de soja em trator agrícola

Antonio Alves Pinto

Engenheiro Agrônomo

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

CÂMPUS DE JABOTICABAL

Uso de biodiesel de soja em trator agrícola

Discente: Eng. Agrônomo. Antonio Alves Pinto

Orientador: Prof. Dr. Afonso Lopes

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

2020

P659u Pinto, Antonio Alves
Uso de biodiesel de soja em trator agrícola / Antonio Alves Pinto. --
Jaboticabal, 2020
69 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Afonso Lopes

1. Mecanização Agrícola. 2. Biocombustíveis. 3. Biodiesel. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: USO DE BIODIESEL DE SOJA EM TRATOR AGRÍCOLA

AUTOR: ANTONIO ALVES PINTO

ORIENTADOR: AFONSO LOPES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. AFONSO LOPES
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. DANIEL JUNIOR DE ANDRADE
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Fitossanidade) / FCAV / UNESP - Jaboticabal
(VIDEOCONFERÊNCIA)

Pesquisador Dr. GILBERTO HIROTSUGU AZEVEDO KOIKE
Consultor Autônomo / Ribeirão Preto/SP
(VIDEOCONFERÊNCIA)

Jaboticabal, 22 de julho de 2020

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ANTONIO ALVES PINTO - Natural de Jardim - CE, nascido em 1º de julho de 1995, filho de Zenicleide Alves dos Santos e Luís Antonio Pinto. Formado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Cariri - UFCA, no ano de 2018, desenvolveu durante a graduação trabalhos na área de fitotecnia, nutrição de plantas, máquinas e mecanização agrícola, sob orientação da Prof. Dr. Felipe Thomaz da Camara. Em março de 2019 iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal, São Paulo, desenvolvendo pesquisas na área de engenharia de água e solo, sob orientação do Prof. Dr. Afonso Lopes.

“Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa e esperar resultados diferentes”

Albert Einstein

“Escale todas as montanhas, cruze todos os rios, siga todos os arco-íris, até encontrar seus sonhos”

Rodgers e Hammerstein

Dedico...

A meus pais, meus irmãos e aos meus amigos pelo amor incondicional, e por todo o incentivo para chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente pelo dom da vida.

Aos meus pais Zenicleide e Luís que sempre estiveram presentes me apoiando e sonhando junto comigo.

Aos meus irmãos por sempre acreditarem em mim.

A minha tia Maria do Carmo pela força, determinação e exemplo de superação.

Ao Professor Dr. Afonso Lopes, pela orientação, ensinamentos nas atividades desenvolvidas, amizade concedida e colaboração no trabalho.

Ao Professor Dr. Felipe Thomaz da Camara, pela co-orientação, ensinamentos nas atividades desenvolvidas, apoio emocional e amizade concedida.

Aos professores Dr. Leomar Paulo de Lima, Dr. Daniel Junior de Andrade e Dr. Rogério Teixeira de Faria, pela colaboração no trabalho final.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal – UNESP/FCAV, pela oportunidade de realização do curso.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pelos conhecimentos transmitidos no decorrer do curso.

Aos meus amigos Luís Fernando, José Lucas, João de Deus e Leomar, pelo apoio, amizade e por todos os momentos que passamos juntos.

À Tamires Doroteo pelo apoio e companheirismo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por conceder a bolsa de estudo.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

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

Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 Matriz energética brasileira	12
2.1.1 Perspectivas para a matriz energética brasileira em relação a matriz mundial	13
2.1.2 Matriz energética no setor de transporte	14
2.2 Biocombustíveis	16
2.2.1 Benefícios da inserção dos biocombustíveis na matriz energética.....	18
2.2.2 Biocombustíveis atuando como redutores das emissões de gases de efeito estufa.....	19
2.3 Biodiesel.....	20
2.3.1 Evolução do biodiesel como combustível no Brasil	20
2.3.2 Produção anual de biodiesel no Brasil.....	21
2.3.3 Projeções futuras para a demanda de biodiesel com o aumento da concentração no diesel	23
2.3.5 Matéria-prima utilizada na produção de biodiesel.....	24
2.3.6 Emissão de gases e fuligem do diesel e biodiesel.....	27
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
CAPÍTULO II - OPACIDADE DA FUMAÇA EM FUNÇÃO DO BODIESEL E DOS HORÁRIOS DE EXECUÇÃO DO ENSAIO	34
RESUMO.....	34
ABSTRACT	35
1. INTRODUÇÃO.....	36
2. MATERIAL E MÉTODOS	37
2.1 Local do experimento	37
2.2 Combustível	37
2.3 Delineamento experimental.....	38
2.4 Trator de teste.....	38
2.5 Ensaio de opacidade.....	39
2.6 Características do ambiente no horário de realização dos ensaios.....	39

2.7 Análises estatísticas	40
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4. CONCLUSÃO	45
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
CAPÍTULO III - DESEMPENHO, OPACIDADE DA FUMAÇA E EMISSÃO DE CO ₂ EQUIVALENTE EVITADA EM TRATOR AGRÍCOLA FUNCIONANDO COM BIODIESEL	48
RESUMO.....	48
ABSTRACT	49
1. INTRODUÇÃO.....	50
2. MATERIAL E MÉTODOS	51
2.1 Local do experimento	51
2.2 Combustível	51
2.3 Condução do experimento	51
2.3.1 Ensaio I.....	52
2.3.1.1 Coleta de dados.....	54
2.3.2 Ensaio II.....	57
2.4 Emissão de CO ₂ equivalente evitada.....	57
2.5 Análise de dados.....	58
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4. CONCLUSÃO	64
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

USO DE BIODIESEL DE SOJA EM TRATOR AGRÍCOLA

RESUMO

Devido ao estabelecimento de padrões de consumo cada vez mais intensos, a demanda de energia aumentou, colocando em risco fontes de energia não renováveis, crescendo o interesse em energias renováveis, dentre as quais se destaca o biodiesel. Com base nisso, teve-se o objetivo de avaliar o uso de biodiesel de soja em trator agrícola. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Biocombustível e Ensaio de Máquinas-BIOEM. Utilizou-se de um trator da marca Valtra BM100 4x2 TDA com potência de 74 kW (100cv) no motor. Foram avaliados opacidade da fumaça em função do horário de trabalho e proporções, no capítulo dois, e consumo de combustível, opacidade da fumaça e emissão de CO₂ equivalente evitada em função das proporções e do processo de purificação, no capítulo três. A adição de Biodiesel no diesel reduziu a opacidade da fumaça do trator, permitindo trabalhar em temperaturas mais elevadas e umidades relativas menores. A opacidade da fumaça foi menor nos horários de baixa temperatura ambiente e alta umidade relativa do ar (1 às 7 h e 19 às 22 h). A utilização de proporções de mistura de biodiesel de soja etílico filtrado e destilado no diesel como combustível não compromete o funcionamento do motor do trator de teste. A adição de biodiesel de soja etílico no diesel aumenta os consumos horário de combustível volumétrico, ponderal e específico. A adição de biodiesel de soja etílico no diesel reduz a opacidade da fumaça do trator. O processo de purificação (filtrado ou destilado) do biodiesel etílico de soja não influencia na potência na barra de tração, no consumo horário de combustível e na opacidade da fumaça. A adição de biodiesel de soja etílico no diesel proporciona aumento do CO₂ equivalente evitado em 34 kg de CO₂ e h⁻¹ com B100.

Palavras-chave: Biocombustíveis, condições climáticas, ensaio de trator, material particulado.

USE OF SOY BIODIESEL IN AGRICULTURAL TRACTOR

ABSTRACT

Due to the establishment of increasingly intense consumption patterns, energy demand has increased, putting non-renewable energy sources at risk, increasing interest in renewable energies, among which biodiesel stands out. Based on this, the objective was to evaluate the use of soy biodiesel in an agricultural tractor. The tests were conducted at the Biofuel and Machine Testing Laboratory-BIOEM. A Valtra BM100 4x2 TDA tractor with 74 kW (100hp) power was used in the engine. Smoke opacity was evaluated as a function of working hours and proportions, in chapter two, and fuel consumption, smoke opacity and equivalent CO₂ emissions avoided as a function of proportions and the purification process, in chapter three. The addition of Biodiesel in the diesel reduced the smoke opacity of the tractor, allowing it to work at higher temperatures and lower relative humidity. The smoke opacity was lower at times of the low ambient temperature and high relative humidity (1 am to 7 am and 7 pm to 10 pm). The use of proportions of biodiesel mixture of filtered and distilled ethyl soy in diesel as fuel does not compromise the operation of the test tractor engine. The addition of ethyl soy biodiesel to diesel increases the hourly consumption of volumetric, weight, and specific fuel. The addition of ethyl soy biodiesel to diesel reduces the opacity of tractor smoke. The purification process (filtered or distilled) of ethyl soy biodiesel does not influence the drawbar power, hourly fuel consumption, and smoke opacity. The addition of ethyl soy biodiesel in diesel provides an increase in CO₂ equivalent avoided by 34 kg of CO₂ and h⁻¹ with B100.

Keywords: Biofuels, climatic conditions, tractor test, particulate matter.

CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. INTRODUÇÃO

A dissertação foi organizado em três capítulos: No Capítulo 1, é relatado o panorama mundial e nacional relacionados à matriz energética, interligando com os aspectos dos biocombustíveis, destacando a evolução do biodiesel como combustível no Brasil, consumo, produção, projeções futuras para a demanda de biodiesel com o aumento da concentração no diesel, fontes de matéria-prima, propriedades e emissões de poluentes, com o propósito de enfatizar a importância do desenvolvimento de tecnologias voltadas para o uso de motores ciclo diesel.

O capítulo 2 apresenta embasamento bibliográfico com evidências que o aumento na proporção de biodiesel no diesel, bem como a variação das condições climáticas (temperatura e umidade relativa do ar) causem influências na opacidade da fumaça. Nesse sentido, o estudo desse capítulo tem como objetivo esclarecer o comportamento da opacidade da fumaça de um trator agrícola com três proporções de biodiesel (0; 50 e 100% de biodiesel no diesel) e oito horários de execução dos ensaios (1; 4; 7; 10; 13; 16; 19 e 22 horas). O capítulo também apresenta a metodologia e as informações necessárias para a análise e a obtenção dos dados da pesquisa, bem como os resultados e discussão que servem de base para as conclusões.

O capítulo 3 descreve o referencial bibliográfico, que serviu de embasamento teórico para justificar o objetivo do trabalho, que é avaliar o consumo de combustível, a opacidade da fumaça e a emissão de CO₂ equivalente evitada em um trator agrícola funcionando com biodiesel de soja etílico filtrado e destilado, em sete proporções de misturas de biodiesel ao diesel. O capítulo apresenta, ainda, a metodologia e as informações necessárias para a análise e a obtenção dos dados da pesquisa, bem como os resultados e discussão que servem de base para as conclusões.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Matriz energética brasileira

No balanço energético nacional de 2019, tendo como base o ano de 2018, a oferta interna de energia da matriz energética brasileira foi composta por aproximadamente 45,3% da energia proveniente de fontes renováveis (EPE, 2019a), sendo essas fontes os derivados de cana-de-açúcar (17,4%), hidráulica (12,6%), lenha e carvão vegetal (8,4%), eólica (1,4%), solar (0,2%) e outras fontes renováveis (5,3%) (Figura 1).

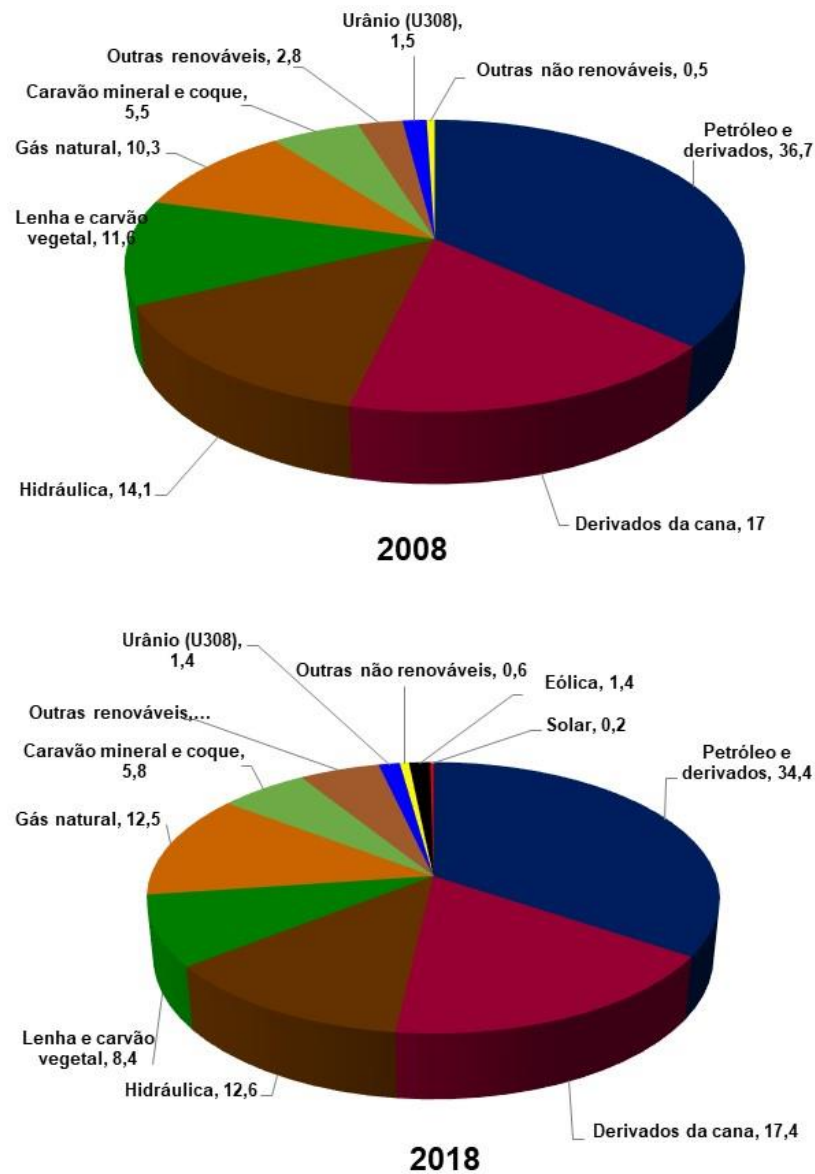


Figura 1. Porcentagem de cada fonte energética que compõe a matriz energética brasileira em 2008 e 2018 (EPE, 2019a).

A presença de importantes bacias hidrográficas no Brasil favorece a construção de hidroelétricas, o regime de ventos e a insolação também fornecem condições que permitem o uso de energias eólica e solar na matriz elétrica. Além disso, as características edafoclimáticas favorecem a produção de biomassa. Tais características permitem que o País disponha de diversas alternativas de energia renovável (EPE, 2019a).

Para um futuro energético sustentável, o uso de recursos renováveis é visto como a opção mais promissora na matriz nacional. A exemplo destaca-se o uso de biomassa, eólica, solar e outras fontes renováveis que aumentaram a participação comparado com as matrizes dos anos de 2008 e 2018 (Figura 1). Tal fato deve-se ao advento de novas tecnologias com elevada eficiência e que causam menores impactos ambientais, além de contribuírem com a redução do aquecimento global (EPE, 2019a). Conforme ilustrado na Figura 1, nos anos de 2008 e 2018, a participação de fontes renováveis manteve-se superior a 40% mesmo com o acréscimo de 36 milhões de toneladas equivalente de petróleo (Mtep) no ano de 2018 em relação a 2008, que era de 252 Mtep, enquanto a média mundial de uso de fontes alternativas foi de 14% em 2017 (IEA, 2019). Observa-se ainda que a segunda maior fonte na oferta interna de energia são os derivados da cana-de-açúcar.

Ressalta-se que o uso de energias renováveis e a participação na matriz energética deverão ser maiores nos próximos anos, conforme projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia apresentado pela Empresa de Pesquisa em Energia (EPE, 2017). O plano estima que em 2027 a participação das fontes renováveis será de 48,8% na matriz. Desse total, cerca de 11,8 GW serão provenientes da energia eólica e 7 GW de solar.

2.1.1 Perspectivas para a matriz energética brasileira em relação a matriz mundial

Mundialmente há vários elementos que indicam uma transição energética embasada em algumas imposições como desenvolvimento sustentável, mudanças

climáticas e inovações tecnológicas. A nova transição energética baseia-se na política de baixo carbono e menor pegada ambiental, aumentando o uso eficiente das fontes energéticas e substituindo cada vez mais os recursos energéticos de alta intensidade de carbono por alternativas que tenham menor impacto ambiental e emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2019b).

No Plano Decenal de Expansão de Energia 2027, estima-se aumento de 45,3%, em 2018, para 48,8%, em 2025, da participação de fontes renováveis na matriz energética nacional das fontes renováveis (Figura 2).

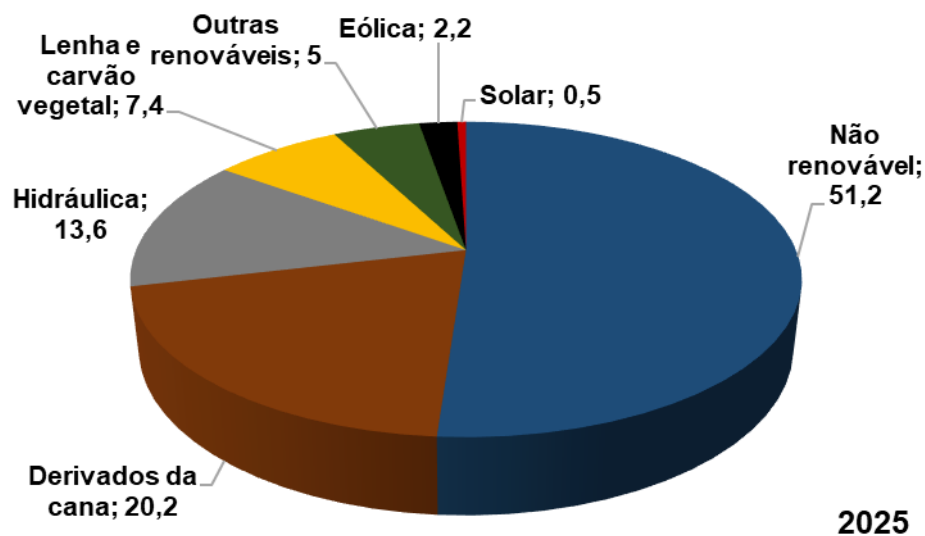


Figura 2. Estimativa da porcentagem de cada fonte energética que compõe a matriz energética brasileira para o ano de 2025 (EPE, 2019a).

Evidencia-se o incremento das energias eólica e solar, bem como dos derivados da cana-de-açúcar, enquanto mundialmente a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019) estima que a energia não-renovável representará 82,7% da matriz energética mundial em 2025, mesmo em um cenário favorável ao uso de fontes renováveis. Tais evidências apontam que, em termos de renovabilidade da matriz energética, no ano de 2025, parte dos países estarão atrasados em relação à posição atual do Brasil.

2.1.2 Matriz energética no setor de transporte

No Brasil, a energia proveniente dos derivados de cana-de-açúcar possui participação relevante no consumo final de energia nos diversos setores da atividade econômica, sendo 19% no setor de transportes, 69% no segmento de bebidas e

alimentos e 50% no energético. No setor de transporte, os 19% são provenientes do uso de etanol anidro e hidratado (Figura 3), em motores de ciclo Otto, enquanto o bagaço da cana-de-açúcar é utilizado como fonte energética para fabricar etanol e açúcar (EPE, 2019a).

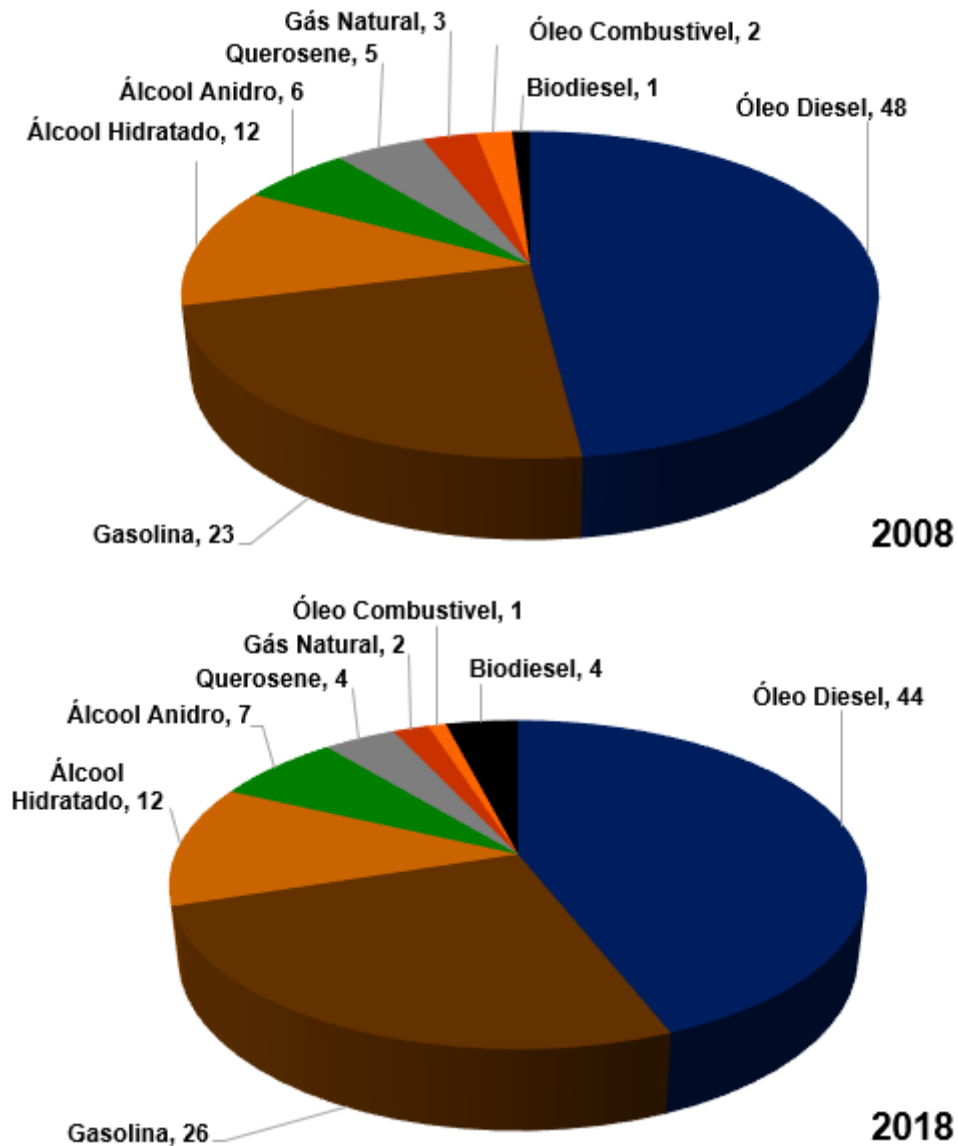


Figura 3. Porcentagem de cada fonte energética que compõe a matriz energética no setor de transporte em 2008 e 2018 (EPE, 2019a).

No setor de transporte brasileiro, destaca-se o aumento da demanda energética de 20,9 Mtep em 2018 comparado a 2008, resultando em aumento da demanda de biocombustíveis de 19% em 2008 para 23% em 2018 (Figura 3), representando aumento de aproximadamente 8 Mtep. Ressalta-se, ainda, o aumento

do uso de biodiesel, que passou de 1% para 4% na matriz energética do setor de transporte.

Comparado ao diesel consumido em 2008 e 2018, a redução foi de 4%, porém o diesel ainda representa 44% de toda a matriz energética do setor de transporte.

No âmbito nacional, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020), estabelece três tipos de óleos diesel:

- a) **Óleo diesel de uso rodoviário:** é utilizado em veículos automotivos, máquinas agrícolas, máquinas de construção e máquinas industriais. Pode ser encontrado na forma de diesel S10 (contém no máximo 10 mg kg⁻¹ de enxofre) ou S500 (contém no máximo 500 mg kg⁻¹ de enxofre). O diesel S10 foi implantado em 2013 para substituir o S50, alterando a concentração do teor de enxofre no diesel, visando a reduzir a emissão de poluentes. O diesel S500 teve a implantação iniciada em 2012, visando a substituir o S1800 (contém no máximo 1800 mg kg⁻¹ de enxofre).
- b) **Óleo diesel de uso não rodoviário:** é utilizado em mineração a céu aberto, transporte ferroviário e geração de energia elétrica, sendo utilizado o S1800.
- c) **Óleo diesel marítimo:** é utilizado em embarcações. Pode ser DMA, combustível destilado médio, isento de resíduos, ou DMB, predominantemente composto de destilados médios, podendo conter pequenas quantidades de óleos de processo do refino.

2. 2. Biocombustíveis

Biocombustíveis é o nome dado a combustíveis produzidos a partir de biomassas renováveis com capacidade para substituir parcialmente ou totalmente os combustíveis não renováveis produzidos a partir de petróleo e gás natural, utilizados nos motores a combustão ou outros tipos de geração de energia (ANP, 2020b).

Conforme mencionado anteriormente, houve aumento de 4% no uso de biocombustíveis entre 2008 e 2018, porém isso se deve a uma série de fatores que ocorreram ao longo de décadas, conforme ilustrado na Figura 4.

Alguns dos fatores que contribuíram com a evolução no consumo de biocombustíveis em muitos países e no Brasil foram as crises do petróleo ocorridas

nas décadas de 1970 e 1980, ficando conhecidas como 1º e 2º Choques do Petróleo, além dos sucessivos aumentos do preço do petróleo e as buscas por sustentabilidade acompanhada pelas crescentes preocupações ambientais, tendo em vista os altos graus de poluição causados por combustíveis fósseis (CAMARA, 2009).

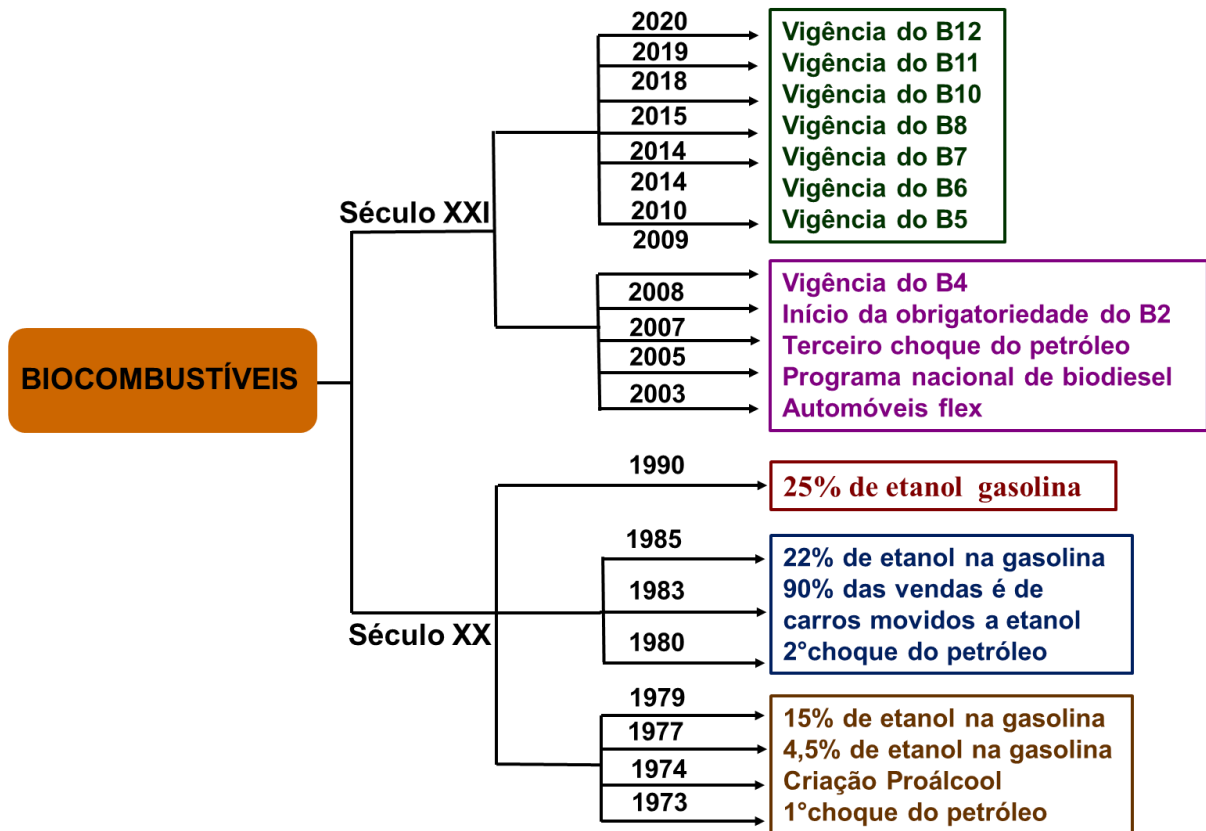


Figura 4. Evolução dos biocombustíveis no Brasil (ANP, 2020a).

Na década de 1970, pelo Decreto nº. 76.593/1975, a criação do Proálcool (Programa Nacional do Álcool) teve relevante influência no aumento do consumo de biocombustíveis. Isso foi viabilizado após várias consultas e amplas discussões com o setor sucroalcooleiro (ÚNICA, 2007). A criação e a implantação do Proálcool provocaram a adição de 15% de etanol na gasolina ainda na década de 1970, chegando até 25% de etanol na gasolina na década de 1990. Além disso, foi o responsável pelo aumento das vendas de carros movido a etanol na década de 1980, chegando a ter cerca 90% dos carros vendidos movido a etanol.

Já nos primeiros anos do século XXI teve início a criação do programa nacional de biodiesel, elaborado a partir de parcerias entre associações

empresariais e um grupo de trabalho interministerial, responsáveis por apresentar estudos a respeito da viabilidade do uso de óleos vegetais (LOPES et al., 2008). Tal programa resultou na vigência do B₂ que tornou obrigatório a adição de 2% de biodiesel no diesel.

Em julho de 2008, a adição de biodiesel no diesel passou a ser de 3%, um ano depois, em julho de 2009, a mistura aumentou para 4%. A partir do amadurecimento do mercado brasileiro, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) vem aumentando sucessivamente o percentual, atingindo 12% (B₁₂) em 2020, com projeções futuras para a adição de até 15% de biodiesel no diesel (ANP, 2020a).

2.2.1 Benefícios da inserção dos biocombustíveis na matriz energética

A inserção dos biocombustíveis na matriz energética apresenta vários benefícios os quais são observados nos âmbitos ambientais, sociais e econômicos. Considerando os biocombustíveis líquidos, o etanol e o biodiesel atuam aumentando a segurança do abastecimento de energia, além de reduzir a instabilidade existente no mercado mundial de petróleo (EPE, 2019b).

Em relação aos impactos sociais, estão à criação de emprego e renda, seja na produção da matéria-prima, seja na produção industrial (LIRA, 2018). No caso do biodiesel, destaca-se o Selo Combustível Social, que permitiu a inserção da agricultura familiar no processo produtivo, beneficiando os pequenos agricultores.

Em relação aos benefícios ambientais dos biocombustíveis, destaca-se a redução na geração de poluentes atmosféricos, efluentes líquidos e resíduos sólidos quando comparado aos combustíveis fósseis, além de contribuir para a redução dos gases de efeito estufa (EPE, 2019b). Conforme Lira (2015), o uso de biodiesel reduz a emissão óxidos de enxofre em 1.000 vezes, em relação ao diesel, permite a redução da emissão de CO e material particulado em 50%, além de apresentar carbono não fóssil, que é 80% menos poluente (TAPANES et al., 2013).

Vale ressaltar que, com o uso de biodiesel e etanol ocorre o aumento nas emissões de NO_x e aldeídos, respectivamente. Além disso, a produção da matéria-prima desses biocombustíveis pode gerar grandes impactos ambientais quando não regulamentadas corretamente.

2.2.2 Biocombustíveis atuando como redutores das emissões de gases de efeito estufa

O aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética nacional proporcionou redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) no ano de 2018, sendo estimada em aproximadamente 66,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e). Destes, cerca de 96% (63,7 MtCO₂) foram provenientes de biocombustíveis líquidos, sendo 39% de etanol anidro (26,2 MtCO₂), 34% de etanol hidratado (22,5 MtCO₂) e 23% de biodiesel (15 MtCO₂), conforme ilustrado na Figura 5.

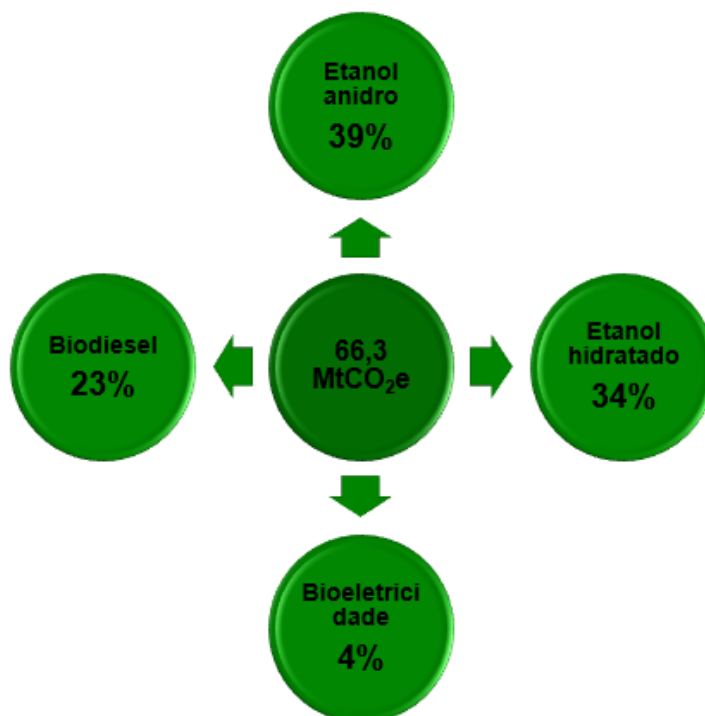


Figura 5. Porcentagem de cada fonte energética na redução da emissão de GEE 2018 (MME, 2020).

A bioeletricidade proveniente da cana-de-açúcar possui a menor parcela na redução dos GEE (2,6 MtCO₂) em relação aos biocombustíveis líquidos, sendo 1,0 MtCO₂ proveniente do autoconsumo e 1,6 MtCO₂ advinda de energia exportada, porém conforme a Empresa de Pesquisa em Energia, as emissões evitadas em 2018 com a bioeletricidade da cana-de-açúcar foram 20% menor em relação a 2017 (3,3 MtCO₂), (EPE, 2019a).

Na estimativa das emissões evitadas foi utilizado um fator de emissão de tonelada de CO₂ (tCO₂) por megawatt-hora (MWh) gerado. Porém esse fator tem

variado nos últimos anos, devido ao aumento da participação de várias fontes de combustíveis fósseis na produção de eletricidade em momentos de escassez hídrica, bem como das outras fontes renováveis, a exemplo da eólica, que apresenta injeção crescente. Conforme a Empresa de Pesquisa em Energia (2020), para o ano de 2018, houve redução da geração térmica fóssil em 13%, aumento de 13% das fontes eólicas e 12% da hídricas, ocasionando redução de 20,2% do fator, passando de 0,093 para 0,074 tCO₂ MWh⁻¹.

2.3 Biodiesel

Biodiesel é o nome da mistura monoalquil de ésteres proveniente de cadeias longas de ácidos graxos; pode ser produzido a partir de gordura animal ou vegetal, através da reação de transesterificação com álcool (metanol ou etanol), catalisada por base (SILVA et al., 2012). Conforme Lima et al. (2013), o biodiesel pode ser filtrado ou destilado, metílico ou etílico, produzido com óleo residual ou degomado.

O biodiesel é visto como alternativa potencial na substituição o diesel mineral, devido ao fato de apresentar características físico-químicas similares ao diesel, permitindo a redução da emissão de poluentes e ser utilizado em motores sem alteração mecânica (GUIMARÃES et al., 2018). Além disso, o biodiesel é considerado como biocombustível renovável (LIMA et al., 2013); isso deve-se ao fato de o gás carbônico emitido na queima do biodiesel ser compensado pelo carbono consumido pelas plantas utilizadas como matéria-prima para a produção do biodiesel.

2.3.1 Evolução do biodiesel como combustível no Brasil

No Brasil, os primeiros estudos para o uso de biodiesel como combustível tiveram início em 2003, quando foi criada a Comissão Executiva Interministerial do Biodiesel (CEIB) e o grupo gestor (GG), porém só passou a ser incorporado na matriz energética com a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) (LOPES et al., 2008). O objetivo inicial do PNPB era inserir o biodiesel na matriz energética brasileira, dando enfoque na geração de emprego e renda, por meio do uso das diversas matérias-primas presentes nas regiões

produtoras, visando à inclusão social e ao desenvolvimento regional (MATTEI, 2010).

A adição do combustível renovável ao diesel fóssil iniciou em 2004, sendo inicialmente em caráter experimental (ANP, 2020a). Entre 2005 e 2007, passou-se a inserir de forma voluntária o teor de 2% de biodiesel no diesel comercializado. A obrigatoriedade foi a partir do artigo 2º da Lei nº 11.097/2005, introduzindo o biodiesel na matriz energética brasileira.

A partir de janeiro de 2008, entrou em vigor a adição legalmente obrigatória de 2% (B₂), no território nacional, 3% em julho de 2008 e 4% em julho de 2009, vindo a ser ampliada sucessivamente pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) até o percentual de 5% (Figura 6). Com o amadurecimento do mercado brasileiro houve a antecipação em três anos da meta estabelecida pela Lei nº 11.097/2005 (ANP, 2020a).

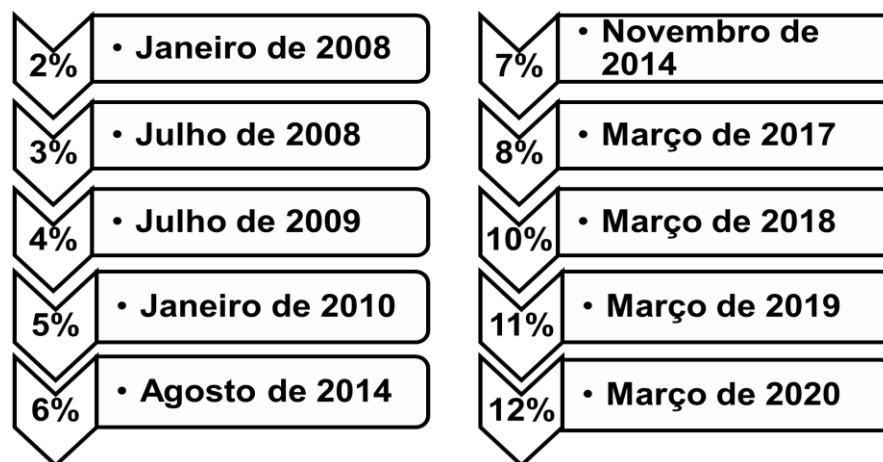


Figura 6. Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no diesel fóssil no Brasil.

Em 2014, a Lei nº 13.033 aumentou o percentual obrigatório do biodiesel de 5% para 6%. Ainda em 2014, o diesel passou a conter 7% de biodiesel. Em 2017, a lei nº 13.263/2016 aumentou para 8% a composição de biodiesel no óleo diesel comercializado. Para o ano de 2018 foi estabelecido o percentual 10% e 11% em 2019, chegando a 12% em março de 2020 (ANP, 2020a).

2.3.2 Produção anual de biodiesel no Brasil

Na produção nacional de biodiesel dos últimos seis anos, ocorreu aumento de 147%, correspondente a 2,5 bilhões de litros entre os anos de 2010 e 2019, passando de 2,39 para 5,90 bilhões de litros, respectivamente (Figura 7). Esse aumento deve-se principalmente ao aumento da proporção de biodiesel no óleo diesel que era de 5% e passou a ser 11% em 2019 (Figura 6).

Conforme a ANP (2020b), no ano de 2018, as 51 usinas do País atingiram aproximadamente 8,5 bilhões de litros de capacidade instalada de processamento de biodiesel, correspondente ao aumento 11,8% em relação ao ano anterior. Desse modo, a produção de 5,35 bilhões de litros correspondeu a 63% da capacidade instalada do País, mostrando que existe potencial para o crescimento da produção desse biocombustível.

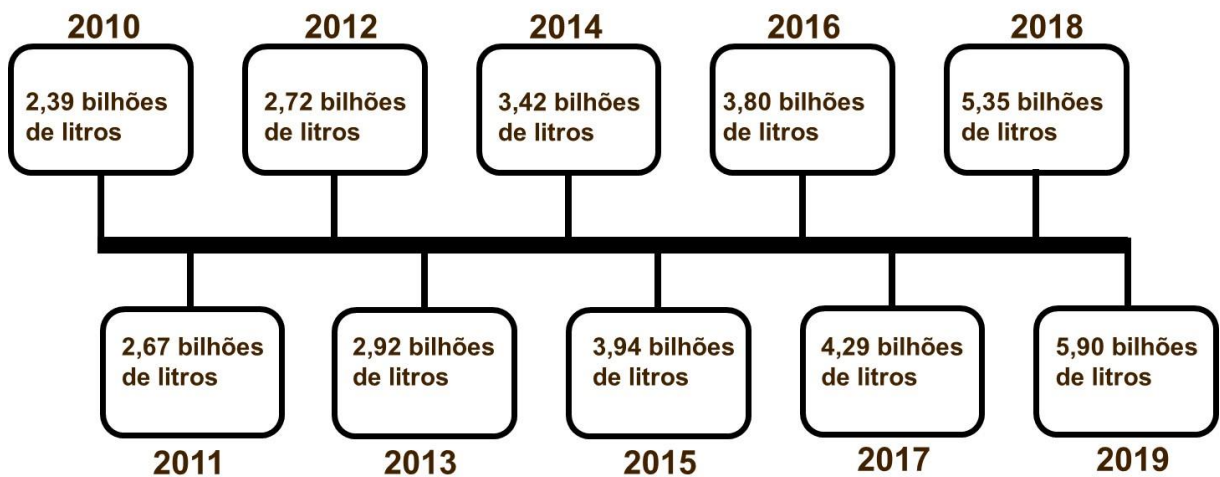


Figura 7. Produção anual de biodiesel no Brasil de 2010 a 2019 (ANP, 2020b)

Em termos de produção regional, as regiões Sul e Centro-Oeste juntas foram responsáveis por 82% de toda a produção nacional, correspondendo a cerca de 4.8 bilhões de litros em 2019 (Figura 8).

A concentração de produção de biodiesel em duas regiões deve-se em parte pelas principais matérias-primas utilizadas na produção do biodiesel das duas regiões, que têm a soja, o algodão, o óleo residual e as gorduras bovina e suína como principais fontes para a produção de biodiesel (LIRA, 2015). Nas demais regiões, são utilizadas outras matérias-primas como dendê, tucumã e mamona.

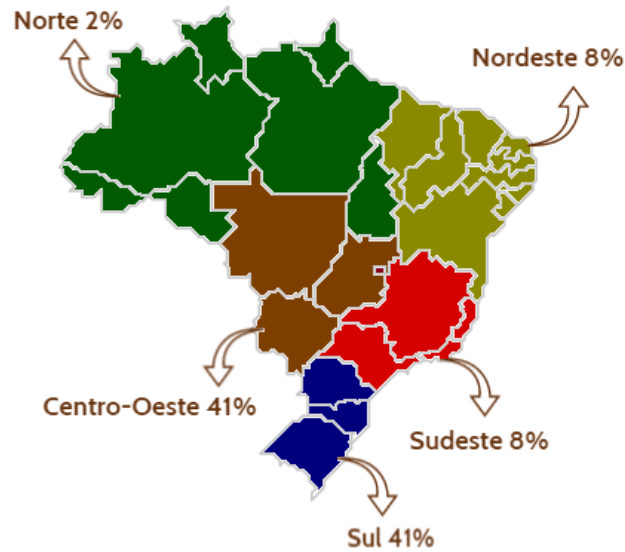


Figura 8. Produção regional de biodiesel em 2019 (ANP, 2020b)

2.3.3 Projeções futuras para a demanda de biodiesel com o aumento da concentração no diesel

Conforme a EPE (2017), a demanda nacional estimada de biodiesel será de 7,3 bilhões de litros para o ano de 2020, com o aumento de 11% para 12% da proporção de biodiesel no diesel (Figura 9). Já para o ano de 2021, será de 8,1 bilhões de litros, com o aumento de 12% para 13% da proporção, chegando 9,8 bilhões em 2023, com o aumento de 14% para 15%.

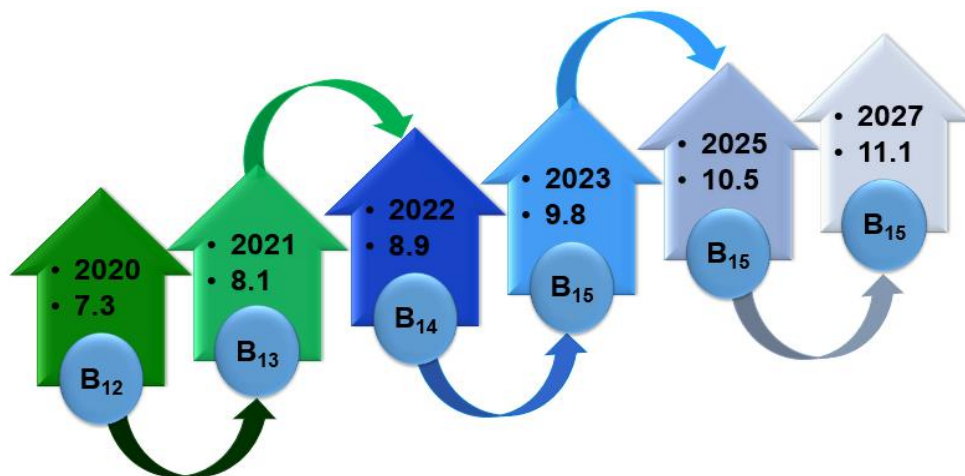


Figura 9. Estimativa da demanda de biodiesel no Brasil em função do aumento da concentração no diesel (EPE, 2017).

A partir de 2023 foi determinado que a proporção de biodiesel no diesel seja mantida em 15%, porém ainda que seja mantida a mesma proporção dos anos anteriores é esperado uma demanda de 10,5 bilhões de litros em 2025 e de 11,1 bilhões de litros em 2027 (EPE, 2017). Tais aumentos na demanda estão diretamente relacionados com o aumento do consumo do diesel.

Analisando a capacidade de processamento e as projeções de consumo de biodiesel regional e nacional, estimadas com base nas solicitações de ampliação de capacidade instalada e nos novos empreendimentos já autorizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, as regiões Sul e Centro-Oeste serão autossuficientes em 2027, enquanto as regiões Norte, Nordeste e Sudeste necessitarão de inserção de biodiesel para suprir a demanda (Tabela 1).

Tabela 1. Capacidade instalada e consumo obrigatório de biodiesel no Brasil estimado para 2027

REGIÃO	Capacidade instalada	Consumo obrigatório	Balanço
	Bilhões de litros		
Norte	530	1.305	775**
Nordeste	506	1.808	1.302**
Sul	3.760	2.222	1.538*
Sudeste	994	4.038	3.044**
Centro-Oeste	3.982	1.729	2.253*
Brasil	9.772	11.103	1.331**

* produção acima do consumo, ** produção necessária para suprir o consumo. Dados adaptado da EPE (2017).

Em relação à capacidade de produção nacional, observa-se déficit de 1.331 bilhões de litros, porém, conforme a EPE (2017), esse déficit não deve comprometer o sucesso do PNPB, nem o eventual aumento da proporção, pois o setor de biodiesel é dinâmico e tem ampliado a capacidade acima das necessidades.

2.3.5 Matéria-prima utilizada na produção de biodiesel

Existem diversas fontes de matéria-prima que podem ser utilizadas na estação de óleos para a produção do biodiesel, podendo ser de origem animal ou vegetal (LIRA, 2015). Globalmente, existem mais de 350 culturas identificadas como matéria-prima potencial para a produção de biodiesel (MENDONÇA et al., 2018). Dentre essas fontes, podemos citar grãos de soja, amendoim, milho, amêndoa do

coco-de-dendê, coco-da-praia, coco-de-babaçu, polpa do dendê, polpa de abacate, caroço de algodão, caroço de oiticica, baba de mamona e sementes de girassol, maracujá, pinhão-manso, linhaça, tomate, dentre outros vegetais em forma de sementes, amêndoas ou polpas (TAPANES et al., 2013).

No Brasil, as fontes para a produção de óleos vegetais são diversas, porém o aproveitamento adequado das potencialidades regionais é o maior desafio das indústrias de biodiesel (LIRA, 2018). Isso é válido tanto em culturas tradicionais (soja, girassol e dendê) com para novas fontes (palmáceas nativas) (LIMA et al., 2017; MENDONÇA et al., 2018).

No ano de 2018 a principal matéria-prima utilizada foi proveniente do óleo de soja, com cerca de 69,8% (3.7 bilhões de litros), representando aumento de 20,5% comparado a 2017 (Figura 10).

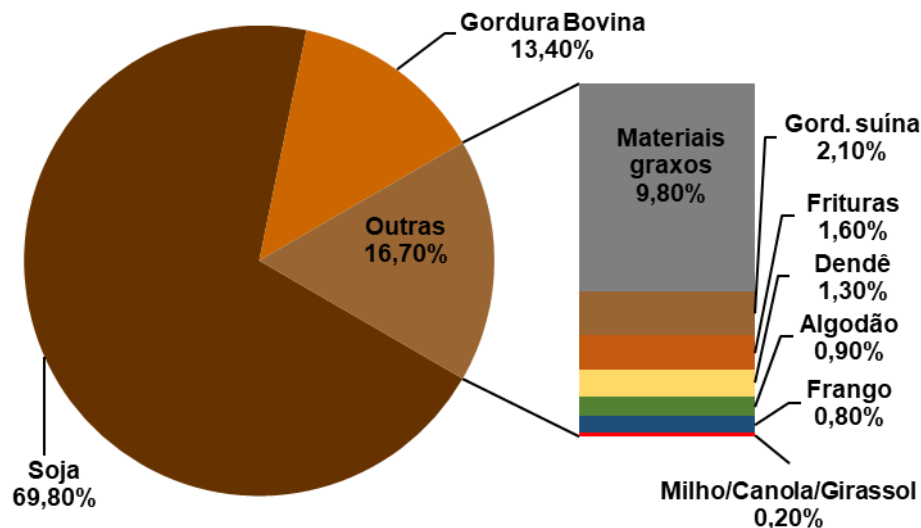


Figura 10. Porcentagem da participação de matérias-primas para a produção de biodiesel em 2019 (ANP, 2020b).

Depois do óleo de soja, a gordura bovina apresenta a maior porcentagem na produção de biodiesel com aproximadamente 13,4%. Isso se deve ao grande potencial agropecuário que o Brasil possui. Além do óleo de soja e da gordura bovina outras matérias-primas como materiais graxos, gordura suína, óleo de frituras, óleo de dendê, óleo de algodão, gordura de frango, milho, canola e girassol representam 16% de todo o biodiesel produzido no Brasil em 2018.

A alta representação da soja na produção total do biodiesel tem como base a alta capacidade produtiva do grão no Brasil, sendo a produção para a safra de 2018 de aproximadamente 121,3 milhões de toneladas, representando aumento de 6,6% comparado a 2017 (CONAB, 2019). Nesse período, a produção de óleo de soja aumentou 3,6%, passando para 8,7 milhões de toneladas (Tabela 2).

A produção de óleo poderia ser ainda maior tendo em vista que, segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE), a capacidade de processamento da soja é de aproximadamente 63,6 milhões de toneladas anuais (ABIOVE, 2018a), contudo a indústria opera de forma ociosa devido ao fato da legislação em vigor e o mercado favorecerem a exportação de soja (ABIOVE, 2018b).

Tabela 2. Resumo da situação do complexo da soja nos anos de 2017 e 2018.

	2017	2018
	Milhões de toneladas	
Produção de soja	113,8	121,3
Capacidade de processamento	63,0	63,6
Exportação do grão	68,2	73,8
Soja processada	41,8	43,6
Óleo de soja produzido	8,4	8,7
Exportação do óleo	1,3	1,4
Consumo de óleo alimentício	4,3	3,9
Consumo com biodiesel	2,8	3,4

Adaptado de ANP (2020b).

De toda a produção de soja brasileira em 2018, cerca de 61% foi destinada à exportação, e 36% utilizada na produção de óleo. Dessa forma, a indústria operou com aproximadamente 69% da capacidade instalada de processamento de soja, o que corresponde a 20 milhões de toneladas não processadas, deixando de produzir cerca de 4 milhões de toneladas de óleos que poderiam elevar a produção de 8,7 para 12,6 milhões de toneladas (Tabela 2). De todo o óleo produzido em 2018, 16% foi destinado à exportação, 45% foi utilizado como óleo alimentício e 39% (3,4 milhões de toneladas) utilizados na produção de biodiesel.

2.3.6 Emissão de gases e fuligem do diesel e biodiesel

As emissões de gases de efeito estufa resultantes da queima de combustíveis fósseis causam preocupação há décadas. Os motores movidos a diesel são os principais responsáveis pelo aumento das emissões no setor de transporte (LIRA, 2018). As concentrações de gases, como o dióxido de carbono, elevaram-se em níveis críticos nos últimos 250 anos, sendo 75% das emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis (LIRA, 2018).

Em motores movidos a diesel as emissões estão relacionadas com a qualidade da combustão, que é influenciada pelas diversas propriedades do óleo diesel (CNT, 2012). Conforme Menezes e Catalunã (2008), o material particulado gerado durante a combustão é bastante complexa e varia conforme o tipo de motor, condições de operação e composição do combustível.

A adição de misturas de biodiesel ao diesel causa redução do material particulado liberado na queima. Isso se deve ao grupo éster e à presença de oxigênio na molécula, que favorecem a queima mais completa, resultando em menor quantidade de fuligem (SAHOO et al., 2009; CHAUHAN et al., 2012; GUIMARÃES et al., 2018). Tais características são de extrema importância, uma vez que a qualidade do ar é comprometida pelo aumento da fuligem, que em sua maioria é constituída por substâncias que tem elevado potencial cancerígeno (RINALDI et al., 2007).

A opacidade da fumaça é utilizada como indicador da intensidade de material particulado resultante da queima. Na avaliação da opacidade da fumaça que indica a impenetrabilidade de luz, os teores de material particulado são maiores em fumaças mais escuras (LIRA, 2018). A opacidade da fumaça do gás expelido é medida com o uso de um opacímetro, que coleta parte do fluxo de gás, por meio de sonda e do tubo de captação inseridos no escapamento do veículo (LIMA et al., 2012).

Dados de diversos pesquisadores (LIMA et al., 2012; LIMA et al., 2013; LIRA, 2015; GUIMARÃES et al., 2018) relatam benefícios provenientes do uso de biodiesel nos motores de combustão interna por compressão, seja em misturas de biodiesel no diesel, seja no uso de 100% biodiesel.

Ao estudar o uso de 20% de biodiesel de canola (B₂₀) no diesel em um motor de ciclo diesel, Bari (2014) observaram que ocorreu redução das emissões de CO e

HC quando utilizado o B₂₀, porém houve aumento do NO_x em 4,4% devido a presença de oxigênio no biodiesel. Além disso, verificaram que a opacidade da fumaça foi 47% menor que o B₀. Pesquisa realizada por Lira et al. (2016) também foi relatada a redução da opacidade comparando B₀ ao B₁₀₀.

Ao avaliar opacidade da fumaça do trator agrícola em função das proporções de biodiesel de palmeiras no diesel, Moreti (2018) inferiu que o uso de biodiesel como combustível reduz os valores de opacidade da fumaça e as emissões de partículas finas na atmosfera. A autora relata que as características físico-químicas dos combustíveis exercem influência no funcionamento do motor ciclo diesel, podendo ocasionar aumento ou redução nos valores de consumo e opacidade da fumaça (Figura 11).

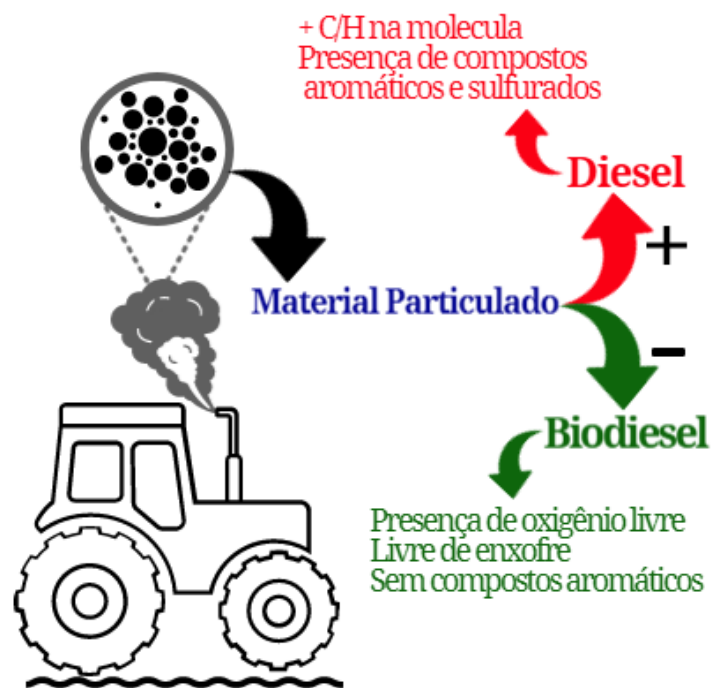


Figura 11. Comportamento do material particulado no diesel e biodiesel.

No Brasil, os estudos realizados com tratores agrícolas funcionado somente com biodiesel (B₁₀₀) obtiveram opacidade variando de 0,95 a 2,12 m⁻¹, consumo horário volumétrico de 10,9 a 14,9 L h⁻¹, consumo horário ponderal de 9,0 a 12,48 kg h⁻¹ e consumo específico de 225 a 487,5 g kWh⁻¹ (Tabela 3).

Tabela 3. Levantamento dos valores de opacidade da fumaça, consumo horário volumétrico (CHV), consumo horário ponderal (CHP) e consumo específico (CE) em estudos com tratores agrícolas.

Autor	Matéria-prima	Opacidade	CHV	CHP	CE
		m ⁻¹	L h ⁻¹	kg h ⁻¹	g kWh ⁻¹
Reis et al. (2006)	Óleo residual	1,14	11,9	9,6	348
Cortez et al. (2007)	Soja	0,97	11,9	9,9	399
Lopes (2006)	Amendoim	1,22	13,3	11,3	356
Lopes (2006)	Girassol	1,15	13,1	11,1	347
Soranso et al. (2008)	Óleo residual	1,13	14,9	12,4	347
Tabile et al. (2009)	Mamona	0,95	12,98	12,33	487,5
Lima et al. (2012)	Dendê	1,38	14,19	12,29	367,28
Lima et al. (2012)	Tucumã	1,03	14,09	12,16	363,55
Lima et al. (2013)	Mamona	1,42	14,21	12,29	366,96
Neves et al. (2013)	Soja	2,12	14,1	12,2	320
Neves et al. (2013)	Murumuru	1,70	12,8	11,1	301
Iamaguti et al. (2016)	Buriti	1,82	14,23	12,48	282,72
Simon et al. (2018)	Pinhão-manso	1,02	10,9	9,0	225
Lira et al. (2019)	Babaçu	0,84	14,8	13,4	321,6

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Legislação – biodiesel**. 2020a. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=53930&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1419273680769>>. Acesso em: 19 janeiro 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Biocombustíveis**. 2020b. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis>. Acesso em: 19 janeiro 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS (ABIOVE).. **Estatística mensal do complexo Soja** (2018a). Disponível em: www.abiove.org.br. Acesso em: 19 janeiro 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS (ABIOVE). **Pesquisa de Capacidade Instalada da Indústria de Óleos Vegetais**. 2018b. Disponível em: www.abiove.org.br/. Acesso em: 19 janeiro 2020.

BARI, S. Performance, combustion and emission tests of a metro-bus running on biodiesel-ULSD blended (B20) fuel. **Applied Energy**, Oxford, v. 124, p. 35–43, 2014.

CAMARA, FT. 2009. **Biodiesel de dendê em trator agrícola: desempenho em função do tempo de armazenamento e da proporção de mistura na operação de preparo do solo**. 100 f. Tese de doutorado em agronomia (ciência do solo), Universidade estadual paulista-Unesp.

CHAUHAN, B. S.; KUMAR, N.; CHO, H. M. A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with Jatropha biodiesel oil and its blends. **Energy**, Rondebosch, v. 37, n. 1, p. 616–622, 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da Safra brasileira de grãos: Décimo segundo levantamento**. V.5, n.12, 2018. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=10>. Acesso em 10 de fevereiro de 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Os impactos da má qualidade do óleo diesel brasileiro**. 2012. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/rio_mais20/resources/cartilhas/Oleo_Diesel_Final.pdf>. Acesso em: 11 fevereiro 2020.

CORTEZ, J. W.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P.; LOPES, A.; CARVALHO FILHO, A.; DABDOUB, J. M. Desempenho de um trator agrícola utilizando biodiesel em duas velocidades na semeadura. **Núcleos**, v.4, n.1, p.55-63, 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2019: Ano-base 2018**. 2019a. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: 10 fev. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2018**. 2019b. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: 10 fev. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano decenal de expansão de energia: oferta de biocombustíveis**. 2017. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: 10 fev. 2020.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS (EPE). Ministério de Minas e Energia. **Plano decenal de expansão de energia**. 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes/dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

GUIMARÃES, C. C.; SANTOS, V. M. L.; CORTEZ, J. W.; SANTOS, L. D. G. Redução da emissão de material particulado em função da inserção de misturas do biodiesel de soja e mamona ao diesel. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro v.23 n.2, p. 355-362, 2018.

IAMAGUTI, P. S.; AFONSO LOPES, A.; OLIVEIRA, M. C.J.; NEVES, M. C. T.; LIRA, T. A. M.; MORETI, T. C. F.; LIMA, L. P.; KOIKE, G. H. A. Operational performance of tractor running with diesel and biodiesel from buriti oil (*Mauritia flexuosa*). **Australian Journal of Crop Science**, v. 10. n.3, p. 336-341, 2016. DOI: 10.21475/ajcs.2016.10.03.p7079

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2019**. 2019 Acesso em: <https://www.iea.org/>. Acesso em: 10 fev. 2020.

LIMA, L. P.; LOPES, A.; OLIVEIRA, M. C. J.; NEVES, M. C. T.; IAMAGUTI, P. W.. Biodiesel em trator agrícola: comportamento operacional em função do tipo e Proporções de mistura no diesel de petróleo. **Engenharia na agricultura**, viçosa, v.21 n.5, p.447-455. 2013.

LIMA, L. P.; LOPES, A.; OLIVEIRA, M. C.J.; NEVES, M. C. T. KOIKE, G. H. A. Comparativo entre biodiesel de dendê e tucumã no desempenho operacional de trator agrícola. **Engenharia na agricultura**, v.20, n.3, p.234-246, 2012.

LIMA, R.P.; DA LUZ, P.T.S.; BRAGA, M.; BATISTA, P.R.S.; COSTA, C.E.F; ZAMIAN, J.R.; NASCIMENTO, L.A.S; ROCHA FILHO, G. N. (2017) Murumuru (*Astrocaryum murumuru* Mart.) butter and oils of buriti (*Mauritia flexuosa* Mart.) and pracaxi (*Pentaclethra macroloba* (Willd.) Kuntze) can be used for biodiesel production: Physico-chemical properties and thermal and kinetic studies. **Industrial Crops Products** 97:536–544.

LIRA, T. A. M.; SANTOS, A. P.; MORETI, T. C. F.; LOPES, A.; OLIVEIRA, M. C. J.; NEVES, M. C. T.; IAMAGUTI, P. S. I.; LIMA, L. P.; KOIKE, G. H. A.; SILVA, R. A. Performance of agricultural tractor consuming diesel and biodiesel derived from

babassu (*Orbinya martiana*). **Australian Journal of crop Science**, v. 13. n.7, p. 1044-1044, 2019. Doi: 10.21475/ajcs.19.13.07.p983

LIRA, T.A M. 2018. **Desempenho de trator agrícola em operação de preparo de solo utilizando biodiesel de palmeiras como combustível**. 97 f. Tese doutorado em agronomia (ciência do solo), Universidade estadual paulista-Unesp.

LIRA, T. A. M.; MORETI, T. C. F.; LOPES, A.; SANTOS, A. P.; OLIVEIRA, M. C. J.; NEVES, M. C. T.; IAMAGUTI, P. S.; LIMA, L. P.; KOIKE, G. H. A.; SILVA, R. A. Smoke opacity of ethyl biodiesel from babassu and two types of diesel at different daytimes. *African Journal of Agricultural Research*, v.11, n.40, p.4055-4061, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016. 11582

LIRA, T.A M. 2015. **Opacidade da fumaça do trator agrícola funcionando com biodiesel etílico destilado de babaçu e diesel b s10 em períodos do dia**. 85 f. Dissertação de mestrado em agronomia (ciência do solo), Universidade estadual paulista-Unesp.

LOPES, A.; SENÔ, M. A. A. F.; CAMARA, F. T.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P.; CORTEZ, J. W. 2008. Biodiesel no Brasil: aspectos gerais e síntese da legislação. **Revista Atualidades Jurídicas**, Brasília, v. 1, p. 1-19.

LOPES, A. 2006. **Biodiesel em trator agrícola: Desempenho e Opacidade**. 158 f. Tese (Livre-Docência, Universidade estadual paulista-Unesp

MATTEI, L. F. 2010. Programa Nacional para Produção e Uso do Biodiesel no Brasil (PNPB): trajetória, situação atual e desafios. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 731-740.

MENDONÇA, I.M.; PAES, O.A.; MAIA, P.J.; SOUZA, M.P.; ALMEIDA, R.A.; SILVA, C.C.; DUVOISIN, J.R .S.; DE FREITAS, F.A. (2018) New heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste tucumã peels (*Astrocaryum aculeatum* Meyer): Parameters optimization study. **Renewable Energy** 130:103-110.

MENEZES, E. W.; CATALUÑA, R. Amostragem do material particulado e fração orgânica volátil das emissões em motor ciclo diesel sem a utilização de túnel de diluição. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 8, p. 2.027-2.030, 2008.

MORETI, T.C.F. 2018. **Proporções de biodiesel de palmeiras x diesel b S50: ensaio de opacidade da fumaça do trator agrícola**. 112 f. Tese doutorado em agronomia (ciência do solo), Universidade estadual paulista-Unesp.

Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB)**. Brasília: MME, 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/programa/objetivos_diretrizes.html>. Acesso em: 10 fev. 2020.

NEVES, M. C. T.; LOPES, A. LIMA, L. P.; MELINA CAIS JEJCIC DE OLIVEIRA, M. C. J.; KOIKE, G. H. A.; Desempenho do trator agrícola em função do tipo de biodiesel (soja x murumuru). **Engenharia na agricultura**, v.21, n.4, p.351-354, 2013.

REIS, G. N.; LOPES, A.; FURLANI, C. E.A.; DABDOUD, M. J.; SILVA, R. P.; GROTTA, D. C. C.; CAMARA, F. T. Análise comparativa entre biodiesel filtrado e biodiesel destilado em trator agrícola. **Revista de ciências agroveterinárias**, v.5, n.2, p. 149-155, 2006.

RINALDI, R.; GARCIA, C.; MARCINIUK, L. L.; ROSSI, A. V.; SCHUCHARDT, U. Síntese de biodiesel: uma proposta contextualizada de experimento para laboratório de química geral. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 5, p. 1.374-1.380, 2007.

SAHOO, P. K. das, L. M.; BABU, M. K. G.; ARORA, P.; SINGH, V. P.; KUMAR, N. R.; VARYANI, T.S. Comparative evaluation of performance and emission characteristics of Jatropha, Karanja and Polanga based biodiesel as fuel in a tractor engine. **Fuel**, Oxford, v. 88, n. 9, p. 1.698–1.707, 2009. Doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.015>.

SIMON, C. P.; VITÓRIA, E. L.; LACERDA, E. G.; FREITAS, I. L. J. Operating performance of a tractor working with different ratios of castor bean and jatropha biodiesel. **Revista engenharia na agricultura**, v26, n.01, p.35-42,2018. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i1.844>

SILVA, M.J.; SOUZA, S.N.M.; SOUZA, A.A.; MARTINS, G.I.; SECCO, D. Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 320-326, 2012.

SORANSO, A. M.; GABRIEL FILHO, A.; LOPES, A.; SOUZA, E. G.; DABDOUB, M. J. FURLANI, C. E. A.; CAMARA, F. T. Desempenho dinâmico de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado de óleo residual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.5, p.553–559, 2008.

TAPANES, N. D. L. O.; ARANDA, D. A. G.; PEREZ, R. S.; CRUZ, Y. R. Biodiesel no Brasil: matérias-primas e tecnologias de produção. **Acta Scientiae et Technicae**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 119-125, 2013.

TABILE, R. A.; LOPES, A.; DABDOUB, M. J.; CAMARA, F. T.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P.; Biodiesel de mamona no diesel interior e metropolitano em trator agrícola. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.3, p.412-423, 2009.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. **Etanol Brasileiro – Evolução da Legislação e Marco Regulatório**. 2007. Disponível em: <http://www.senado.leg.br/comissoes/cae/ap/AP_20070514_Unica_PetroleoGasBiocombustiveis.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2020

CAPÍTULO II - OPACIDADE DA FUMAÇA EM FUNÇÃO DO BODIESEL E DOS HORÁRIOS DE EXECUÇÃO DO ENSAIO

RESUMO

O biodiesel destaca-se como combustível alternativo ao diesel de petróleo, apresentando propriedades semelhantes às do diesel, podendo substituí-lo sem exigir alterações no motor. Teve-se o objetivo de avaliar a opacidade da fumaça de um trator agrícola em função de três proporções de biodiesel e oito horários de execução dos ensaios. O trabalho foi conduzido no laboratório de Biocombustível e Ensaio de Máquinas-BIOEM. Foi utilizado o biodiesel de soja etílico destilado. Utilizou-se de um trator da marca Valtra BM100 4x2 TODA, com potência de 74 kW (100cv) no motor a 2350 rpm. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 8 x 3, com três repetições, porém, em cada repetição realizaram-se sete amostragens, totalizando 504 observações. Os resultados evidenciaram redução da opacidade com o acréscimo de biodiesel no diesel. Nos horários com baixa temperatura ambiente e alta umidade relativa do ar ocorreram reduções da opacidade. A adição de biodiesel no diesel reduziu a opacidade da fumaça do trator, permitindo trabalhar em temperaturas mais elevadas e umidades relativas menores. A opacidade da fumaça é menor nos horários com baixa temperatura ambiente e alta umidade relativa do ar (1 às 7 h e 19 às 22 h).

Palavras-chave: biocombustíveis; umidade; temperatura.

SMOKE OPACITY ACCORDING TO BIODIESEL AND TEST TIME

ABSTRACT

Biodiesel stands out as an alternative fuel to petroleum diesel, presenting properties similar to diesel, being able to replace it without requiring changes in the engine. The objective was to evaluate the smoke opacity of an agricultural tractor based on three proportions of biodiesel and eight different times. The work was carried out in the Biofuel and Machine Testing-BIOEM laboratory. Distilled ethyl soy biodiesel was used. The Valtra BM100 4x2 TODA tractor with 74 kW (100hp) power was used in the engine at 2350 rpm. The experimental design used was completely randomized, in a factorial scheme 8 x 3, with three replications, however, in each repetition seven samples were made, totaling 504 observations. The results showed a reduction in opacity with the addition of biodiesel in diesel. In times with low ambient temperature and high relative humidity, opacity reductions occurred. The addition of biodiesel to the diesel reduced the opacity of the tractor's smoke, allowing it to work at higher temperatures and lower relative humidity. Smoke opacity is lower at times with low ambient temperature and high relative humidity (1 am to 7 am and 7 pm to 10 pm).

Keywords: biofuels; moisture; Temperature.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da mecanização agrícola tornou viável e eficaz diversas práticas agrícolas no campo, sendo o trator uma das máquinas mais utilizadas para o desenvolvimento dessas atividades (NEVES et al., 2018). Porém, o crescente aumento do uso de tratores resulta em maior demanda por combustível, como o diesel.

Na busca para suprir a necessidade de combustíveis, juntamente com a consciência ecológica, pesquisadores estão estudando o uso de biocombustíveis renováveis que resultem em menos danos ao meio ambiente, além de suprir as necessidades das máquinas (LIRA et al. (2016).

O biodiesel é um biocombustível renovável produzido por meio da reação de óleo vegetal/gordura animal e álcool anidro na presença de catalizadores, destacando-se como uma das maneiras mais eficientes de diversificar a matriz energética (LIMA et al., 2015). Esse produto tem como vantagem a utilização como aditivo ou substituto do diesel de petróleo em motores de ignição por compressão (IAMAGUTI et al., 2016), além de proporcionar a redução da emissão de poluentes para a atmosfera (GUIMARÃES et al., 2018).

Para avaliar a viabilidade do biodiesel, é preciso estudar o funcionamento das máquinas com esse biocombustível em diferentes proporções de mistura ao diesel (LIMA et al., 2015), bem como a concentração de material particulado presente na fumaça por meio da opacidade, que pode variar em função das diferentes proporções de biodiesel.

Conforme resultados obtidos por Simon et al. (2018), ao avaliarem a opacidade em função de seis proporções de biodiesel no diesel, observaram redução de 37% na opacidade da fumaça utilizando-se apenas biodiesel (B₁₀₀) como combustível.

Além do aumento na proporção de biodiesel, o horário de trabalho pode promover variação na opacidade da fumaça, conforme observado por Gonçalves et al. (2013), ao avaliarem a opacidade da fumaça de um trator agrícola em função dos horários de trabalho em Petrolina-PE, com redução significativa da opacidade nas primeiras horas do dia.

Em estudo para verificar a opacidade da fumaça em trator agrícola funcionando com diesel B S10 e biodiesel de babaçu em duas proporções (B₅₀ e B₁₀₀), em seis horários (2 h; 6 h; 10 h; 14 h; 18 h e 22 h), Lira et al. (2016) concluíram que a opacidade da fumaça é influenciada pelo biodiesel de babaçu e pelos períodos do dia, sendo a menor opacidade às 6 horas, quando a temperatura ambiente foi 13,9 °C e a umidade relativa do ar de 95%.

Pressupõe-se que o aumento na proporção de biodiesel, bem como a diminuição na temperatura ambiente reduza a opacidade da fumaça. Diante disso, teve-se o objetivo de avaliar a opacidade da fumaça de um trator agrícola em função de três proporções de biodiesel e oito horários de execução de ensaios.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento

O trabalho foi conduzido no laboratório de Biocombustível e Ensaio de Máquinas-BIOEM, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus Jaboticabal-SP. A localização geográfica da área de realização dos ensaios é definida pelas coordenadas 21°15' latitude sul e 48°18' longitude oeste, sendo a altitude média de 570 m e clima subtropical úmido (Cwa), de acordo com a classificação de Köeppen (Alvares et al., 2013).

2.2 Combustível

Foi utilizado o biodiesel de soja etílico destilado, produzido no Laboratório de Desenvolvimento de Tecnologias Limpas, LADETEL - USP, Ribeirão Preto-SP, conforme parceria desde 2001. O óleo diesel utilizado foi o S50, com 50 mg kg⁻¹ enxofre total, regulamentado no mercado nacional pelo PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), adquirido na rede comercial da cidade de Jaboticabal - SP.

2.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 8 x 3, com três repetições, porém, em cada repetição, realizaram-se sete amostragens, totalizando 504 observações. O fator foi composto por oito horários de execução do ensaio (1 h; 4 h; 7 h; 10 h; 13 h; 16 h; 19 h e 22 h) e três proporções de mistura de biodiesel no diesel (B0, B50 e B100). Nesse tipo de ensaio, o número de amostragem pode variar entre sete e dez, sendo considerada característica inerente ao momento do ensaio, pois o próprio equipamento gerencia o processo em função da homogeneidade dos resultados, que pode ser influenciada pelo estado de conservação do motor, qualidade do combustível, condições do ambiente (temperatura, pressão e umidade), entre outros.

2.4 Trator de teste

O trator utilizado foi da marca Valtra, modelo BM100, 4X2 com tração dianteira auxiliar, potência de 74 kW (100cv) a 2.300 rpm no motor, equipado com pneus 14.9-24 no eixo dianteiro e 23.1-26 no eixo traseiro (Figura 1), sendo tal trator instrumentado para a realização do teste segundo Lopes et al. (2003).



Figura 1. Trator de teste com instrumentação completa. Fonte: Lopes (2006).

2.5 Ensaio de opacidade

A opacidade da fumaça foi medida por um opacímetro de absorção de luz com fluxo parcial, da marca Tecnomotor, modelo TM 133, que está compatível com as normas NBR 13037, Inmetro, CEE 72/306 (Figura 2). O opacímetro foi conectado ao controlador serial da marca Tecnomotor, modelo TM 616, que recebeu os sinais do sensor e os converteu em unidade de medida. Tal equipamento exporta os dados convertidos para o computador por meio de conexão serial, cuja interface é o software denominado IGOR, que gerencia os ensaios.



Figura 2. Vista detalhada do opacímetro. Fonte: Tecnomotor, (2012).

Os ensaios foram realizados de acordo com o método da aceleração livre, que é o regime em que o motor é submetido ao máximo débito de combustível, sendo a potência desenvolvida absorvida somente pela inércia dos componentes mecânicos do motor (embreagem, árvore-piloto da caixa de mudanças), uma vez que o veículo está estacionado. As medições de opacidade foram feitas em K, que é o coeficiente de absorção de luz, e tem como unidade m^{-1} (TECNOMOTOR, 2012).

2.6 Características do ambiente no horário de realização dos ensaios

A temperatura e a umidade relativa do ar foram obtidas na estação meteorológica da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus Jaboticabal-SP,

localizada próxima ao local do ensaio. A caracterização do ambiente no momento de execução dos ensaios é mostrada na Figura 3.

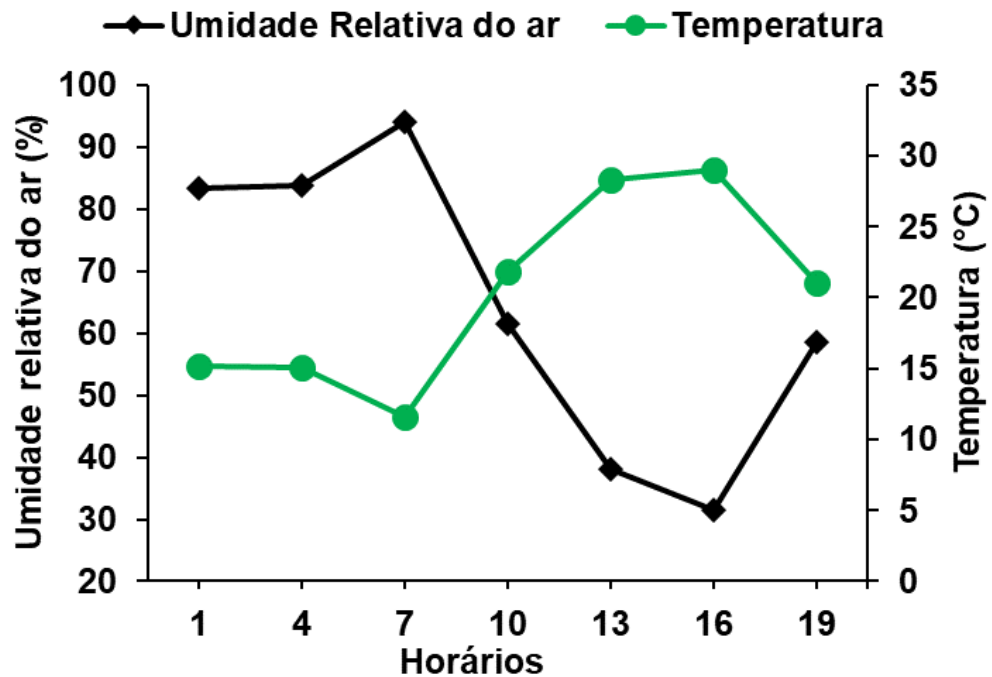


Figura 3. Temperatura ambiente e umidade relativa do ar no horário de realização dos ensaios.

2.7 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância e quando significativos submetidos ao teste de comparação de médias de Tukey, a 5% de probabilidade, e os resultados da opacidade em função dos horários foram submetidos à análise de regressão. Foi utilizada a linguagem de programação em Python 3.6 para ajuste do gráfico de contorno, a fim de observar o comportamento da variável dependente em relação às variáveis independentes; para isso, foi aplicada regressão múltipla de terceira ordem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se que no horário de execução do ensaio ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$), sendo 10 h; 13 h e 16 h com maiores médias de opacidade da

fumaça (Tabela 1). Tais resultados podem estar relacionados às condições climáticas, como temperatura do ambiente e umidade relativa do ar, tendo em vista que nesses horários também ocorreram os maiores valores de temperatura e os menores de umidade relativa (Figura 3).

Tabela 1. Síntese dos valores da análise de variância para a opacidade da fumaça em função do horário de avaliação da proporção de biodiesel.

Fontes de Variação	Opacidade (m ⁻¹)
Horário (H)	106,3**
Proporção (B)	3721,4**
HxB	2,2*
C.V.%	2,6

*: significativo (P<0,05), **: significativo (P<0,01), C.V.: coeficiente de variação.

Conforme Lopes et al. (2009), temperaturas altas do ambiente em conjunto com baixa umidade relativa podem dificultar a combustão no motor, resultando em maior opacidade da fumaça.

Para o fator proporção, ocorreu diferença a 1% de probabilidade com o aumento da proporção de biodiesel, que acarretou na redução de 44,7% na opacidade da fumaça com o uso do B₁₀₀. Tais resultados corroboram com Lima et al. (2015), que observaram redução de 44,6% na opacidade da fumaça quando o trator utilizou biodiesel B₁₀₀ como combustível.

Conforme Lira et al. (2019), a redução da opacidade da fumaça com a utilização de biodiesel pode estar relacionada com a ausência de enxofre no biocombustível, tendo em vista que enxofre compartilha o oxigênio livre na fase tardia da combustão com o carbono originado da queima parcial, contribuindo assim com o aumento da produção de material particulado. Para Guimarães et al. (2018), a redução da opacidade da fumaça com o uso de biodiesel está atribuída à quantidade de oxigênio presente no biodiesel, bem como a ausência de enxofre, permitindo melhor combustão desse biocombustível.

Verificou-se que ocorreu interação significativa (p<0,05) entre os fatores horários de execução do ensaio e proporção de biodiesel (Tabela 1), sendo os resultados dessa interação apresentados na Figura 4 e na Tabela 2.

As três proporções de biodiesel apresentaram significância (p<0,05), com modelo de regressão polinomial de terceira ordem em função do horário de

execução do ensaio. As primeiras horas do dia apresentaram redução da opacidade da fumaça, enquanto os maiores valores foram observados às 16 horas, horário com a maior temperatura ambiente e menor umidade relativa do ar (Figura 3).

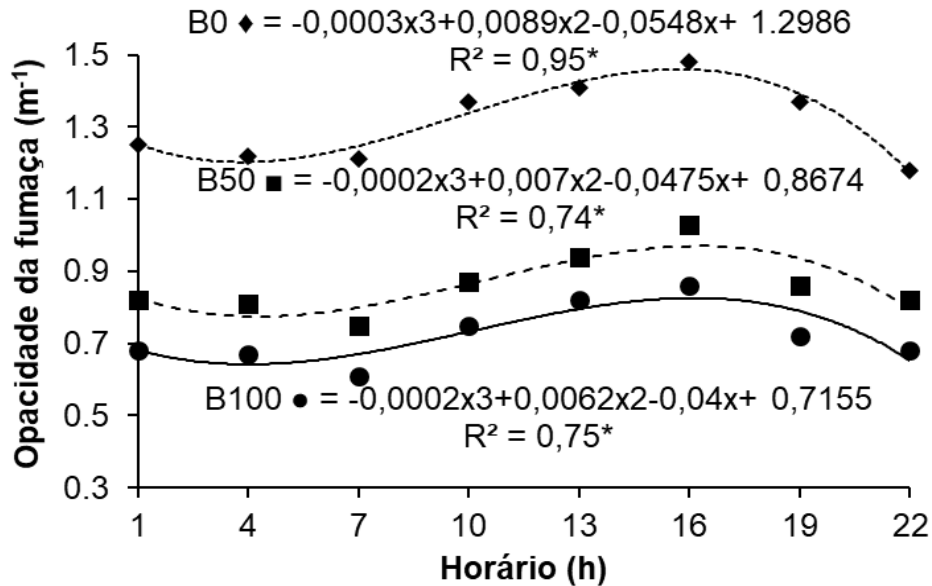


Figura 4. Representação gráfica da opacidade da fumaça em função do horário de execução do ensaio para B₀, B₅₀ e B₁₀₀.

A relação da temperatura e umidade relativa com a opacidade da fumaça pode ser confirmada pelos coeficientes de correlação de Pearson de 0,92; 0,96 e 0,98 para o B₀, B₅₀ e B₁₀₀, respectivamente, na temperatura, indicando que, com o aumento da temperatura, ocorre também aumento na opacidade da fumaça. Já na umidade relativa, os coeficientes foram -0,94; -0,96 e -0,98 para o B₀, B₅₀ e B₁₀₀, respectivamente, indicando que o aumento da umidade relativa causa a redução da opacidade da fumaça.

Na avaliação da opacidade de um trator agrícola funcionando com diesel em função de sete horários de trabalho, Gonçalves et al. (2013) obtiveram comportamento polinomial significativo ($p < 0,01$), com maior opacidade da fumaça no intervalo entre 12 h e 18 horas. Tais horários também apresentaram os maiores valores de temperatura e menores de umidade relativa, conforme o presente trabalho.

Resultados semelhantes aos de Lira et al. (2016), que observaram influência da temperatura e da umidade relativa na opacidade da fumaça, sendo o menor valor

de opacidade às 6 horas, quando a temperatura atingiu o menor valor (13,9 °C) e a umidade relativa o máximo (95%), enquanto o maior valor de opacidade foi registrado às 14 horas, correspondente ao horário com maior temperatura (28,4 °C) e menor umidade relativa (27%).

O aumento da opacidade da fumaça nos horários com maior temperatura e menor umidade relativa ocorre devido ao princípio de funcionamento dos motores de combustão interna por compressão, em que a termodinâmica da combustão é influenciada pela razão de equivalência, que indica a proporção arbitrária de ar e combustível na mistura estequiométrica (Lira et al., 2016). Desse modo, nos horários com maior temperatura e menor umidade relativa ocorre menor concentração da proporção oxidante, prejudicando a queima do combustível, resultando em aumento da opacidade da fumaça.

Para todos os horários as três proporções de biodiesel apresentaram significância ($p < 0,05$), sendo que o aumento da proporção de biodiesel reduziu a opacidade da fumaça (Tabela 2), com o B100 obtendo os menores valores de opacidade da fumaça.

Tabela 2. Interação entre os fatores horários de execução do ensaio e proporção de mistura para a variável opacidade da fumaça

HORÁRIO	PROPORÇÃO DE BIODIESEL		
	B ₀	B ₅₀	B ₁₀₀
1 h	1,25A	0,82B	0,67C
4 h	1,22A	0,81B	0,67 C
7 h	1,21 A	0,75B	0,61C
10 h	1,37A	0,87B	0,75C
13 h	1,41A	0,94B	0,82C
16 h	1,48A	1,03B	0,86C
19 h	1,37A	0,86B	0,72C
22 h	1,28A	0,84B	0,71C

Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si nas linhas, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Ao estudarem a opacidade da fumaça e o desempenho de um trator agrícola em função das proporções de biodiesel, Neves et al. (2013) observaram redução da opacidade da fumaça com o aumento da proporção de biodiesel, porém obtiveram médias de $1,36 \text{ m}^{-1}$ com o uso de B₁₀₀ como combustível, valor maior que o presente trabalho. Resultados que corroboram Lira et al. (2016), ao observarem menor

opacidade da fumaça nos seis horários avaliados (2; 6; 10; 14 e 22 h), quando foi utilizado 100% de biodiesel de babaçu (B₁₀₀) no trator.

No tratamento com apenas diesel (Figura 5A), verificou-se que o aumento da temperatura em condições de umidade relativa baixa ocasionou aumento da opacidade, ao passo que para os tratamentos com 50% e 100% de biodiesel, mesmo em condições de temperaturas elevadas, ocorre a redução da opacidade. Nesse sentido, observou-se que a opacidade da fumaça proveniente da queima de apenas diesel é influenciada pela temperatura e umidade relativa, enquanto com a adição de biodiesel a opacidade passa a ser mais influenciada pela umidade relativa (Figuras 5B e 5C).

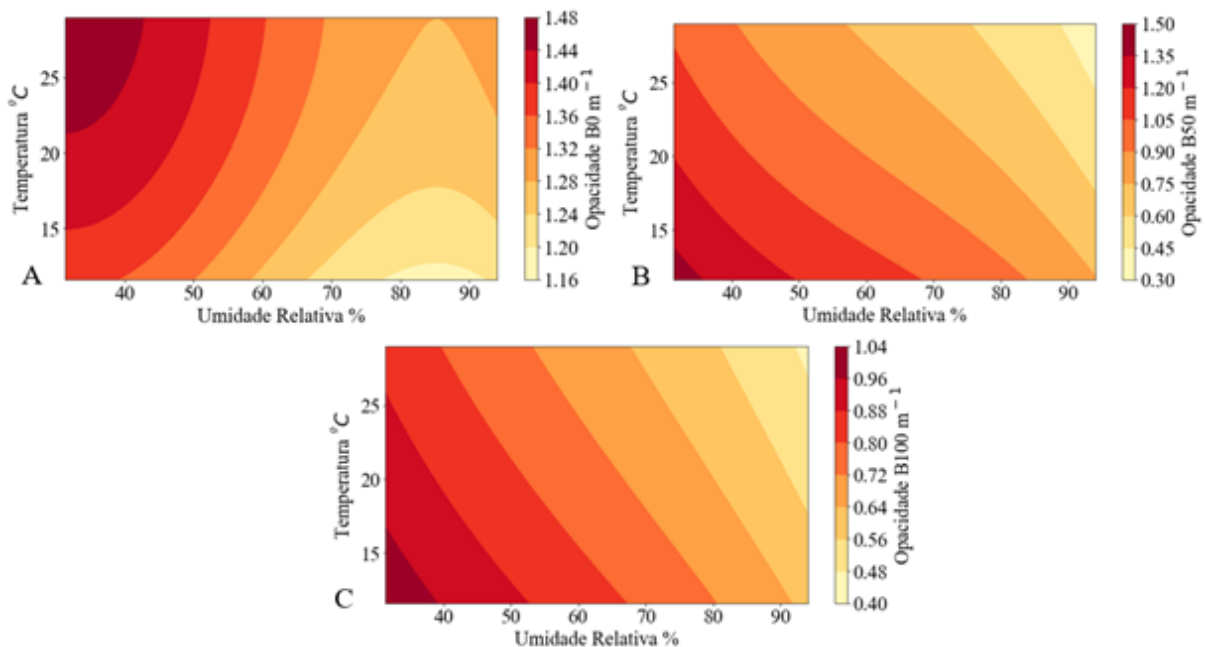


Figura 5. Gráfico de contorno da interação das variáveis independentes (temperatura, umidade relativa) e dependente (opacidade). A - Diesel (B0), B - 50% de biodiesel no diesel (B50) e C - 100% biodiesel (B100).

Nesse sentido, pode-se verificar que o uso de biodiesel no diesel permite trabalhar com temperaturas acima de 20 °C e umidade relativa acima de 40% produzindo baixa emissão de poluentes quando comparado ao diesel. Se considerar a temperatura e a umidade relativa coletada às 13 horas (Figura 3), os valores de opacidade variam de 1,44 a 1,48 m⁻¹ no tratamento com diesel puro (B0), 0,90 a 1,05 para o tratamento com 50% de biodiesel no diesel e de 0,80 a 0,88 com o uso de biodiesel puro (B100).

4. CONCLUSÕES

A adição de biodiesel no diesel reduz a opacidade da fumaça do trator.

A opacidade da fumaça reduz nos horários de menor temperatura ambiente e maior umidade relativa do ar (1 h às 7 h e 19 h às 22 h).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.

GUIMARÃES, C. C.; SANTOS, V. M. L.; CORTEZ, J. W.; SANTOS, L. P. G. Redução da emissão de material particulado em função da inserção de misturas do biodiesel de soja e mamona ao diesel. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23, n.2, p.355-362, 2018.

GONÇALVES, S. S.; CORTEZ, J. W.; ARCOVERDE, S. N. S.; MACHADO, N. S.; NAGAHAMA, H. J. Ensaio de opacidade e nível de ruído de um trator agrícola. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.21, n.3, p.244-252, 2013.

IAMAGUTI, P.S.; LOPES, A.; OLIVEIRA, M. C. J.; NEVES, M. C. T.; LIRA, T. A. M.; MORETI, T. C. F.; LIMA, L. P.; KOIKE, G. H. A. Operational performance of tractor running with diesel and biodiesel from buriti oil (*Mauritia flexuosa*). **Australian Journal of Crop Science** v.10, n.3, p.336-341. 2016. DOI: 10.21475/ajcs.2016.10.03. p7079.

LIMA, L. P.; OLIVEIRA, C. A. A.; PEREIRA, P. S.; SILVA, F. J. Opacidade da fumaça de um trator agrícola funcionando com três fontes de biodiesel como combustível. **Ciência & Tecnologia: FATEC-JB**, v.7, n.1, 39-46, 2015.

LIRA, T. A. M.; SANTOS, A. P.; MORETI, T. C. F.; LOPES, A.; OLIVEIRA, M. C. J.; NEVES, M. C. T.; IAMAGUTI, P. S.; LIMA, L. P.; KOIKE, G. H. A.; SILVA, R. A. Performance of agricultural tractor consuming diesel and biodiesel derived from babassu (*Orbinya martiana*). **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.07, 1037-1044, 2019. doi: 10.21475/ajcs.19.13.07. p983

LIRA, T. A. M.; MORETI, T. C. F.; LOPES, A.; SANTOS, A. P.; OLIVEIRA, M. C. J.; NEVES, M. C. T.; IAMAGUTI, P. S.; LIMA, L. P.; KOIKE, G. H. A.; SILVA, R. A. Smoke opacity of ethyl biodiesel from babassu and two types of diesel at different daytimes. **African Journal of Agricultural Research**. v.11, n.40, p.4055-4061, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016. 11582

LOPES, A. **Biodiesel em trator agrícola: Desempenho e Opacidade**. 2006, 158f. Tese (Livre Docência em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

LOPES, A.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P. Desempenho de um protótipo para medição de combustível em tratores. **Revista Brasileira de Agroinformática**, v.5, n.1, p.24-31, 2003.

LOPES, A.; CÂMARA, F. T.; OLIVEIRA, M. C. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P.; MELLO JÚNIOR, J. G. S. Opacidade da fumaça de trator agrícola utilizando

biodiesel em função das condições climáticas no horário de execução do ensaio. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 38, **Anais SBEA**, p.1- 4, 2009.

NEVES, M. C. T.; LOPES, A.; OLIVEIRA, M. C. J.; IAMAGUTI, P. S.; LIRA, T. A. M.; MORETI, T. C. F.; LIMA, L. P.; KOIKE, G. H. A. Effects of Murumuru (*Astrocaryum murumuru* Mart.) and soybean biodiesel blends on tractor performance and smoke density. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, n.6, p.878-885, 2018. Doi: 10.21475/ajcs.18.12.06.PNE634

NEVES, M. C. T.; LOPES, A.; LIMA, L. P.; OLIVEIRA, M. C. J.; KOIKE, G. H. A. Desempenho do trator agrícola em função do tipo de biodiesel (soja x murumuru). **Engenharia na Agricultura**, v.21 n.4, p. 351-360, 2013.

SIMON, C. P.; VITÓRIA, E. L.; LACERDA, E. G.; FREITAS, I. L. J. Operating performance of a tractor working with different ratios of castor bean and jatropha biodiesel. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.26, n.1. p.35-42, 2018. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i1.844>

TECNOMOTOR, Tecnomotor Eletrônica do Brasil Ltda. 2012. OPACER TM 133 **Opacímetro de amostragem**. Manual de Operação. São Carlos, 26p.

CAPÍTULO III - DESEMPENHO, OPACIDADE DA FUMAÇA E EMISSÃO DE CO₂ EQUIVALENTE EVITADA EM TRATOR AGRÍCOLA FUNCIONANDO COM BIODIESEL

RESUMO

Devido ao desenvolvimento ocorrido na Segunda Guerra Mundial e ao estabelecimento de padrões de consumo cada vez mais intensos, a demanda de energia aumentou, aumentando o interesse em energias renováveis, dentre as quais se destaca o biodiesel. Diante do exposto, o objetivo foi avaliar o consumo de combustível, a opacidade da fumaça e a emissão equivalente de CO₂ evitada em um trator agrícola movido a biodiesel etílico filtrado e destilado de soja, em sete proporções de misturas de biodiesel com diesel. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 7, com três repetições. As combinações de tratamentos foram dois tipos de biodiesel etílico de soja (filtrados e destilados) e sete proporções de mistura (B₀, B₅, B₁₅, B₂₅, B₅₀, B₇₅ e B₁₀₀). A adição de biodiesel ao diesel proporcionou aumento de 7,2%; 8,5% e 9,14% nos consumos horário volumétrico, ponderal e específico de combustível, respectivamente, comparado ao tratamento com diesel e biodiesel. A opacidade da fumaça diminuiu 54% comparada ao tratamento apenas com diesel e 100% de biodiesel. A adição de biodiesel etílico de soja ao diesel aumenta os consumos horário volumétrico, ponderal e específico de combustível. A adição de biodiesel etílico de soja ao diesel reduz a opacidade da fumaça do trator. A adição de biodiesel de soja no diesel fornece redução de CO₂ equivalente de 34 KgCO₂e h⁻¹ com o B₁₀₀.

Palavras-chave: biocombustível, ensaio de trator, material particulado

PERFORMANCE, SMOKE OPACITY AND EQUIVALENT CO₂ EMISSIONS IN AN AGRICULTURAL TRACTOR FUELED WITH BIODIESEL BLENDS

ABSTRACT

Due to the great development that took place on the planet after the Second World War and the establishment of increasingly intense consumption patterns, energy demand arose to such an extent, putting non-renewable energy sources at risk, such as oil, coal, among others, with growing interest in renewable energies, among which biodiesel has been highlighted. In view of the foregoing, the objective was to evaluate the fuel consumption, smoke opacity and equivalent CO₂ emission on an agricultural tractor running on filtered and distilled ethyl soy biodiesel, in seven proportions of biodiesel blends with diesel fuel. A completely randomized design was used, in a 2 x 7 factorial scheme, with three replications. The treatments combination were two types of ethyl soy biodiesel (filtered and distilled) and seven mixing proportions (B₀, B₅, B₁₅, B₂₅, B₅₀, B₇₅ and B₁₀₀). The addition of biodiesel to diesel provided an increase of 7.2%, 8.5% and 9.14% in volumetric, weighted and specific fuel hourly consumption, respectively, when compared to diesel fuel treatment and biodiesel. Smoke opacity decreased by 54% when compared to treatment with diesel fuel only and 100% biodiesel. The addition of ethyl soy biodiesel to diesel fuel increases the volumetric, weighted and specific fuel hourly consumption. The addition of ethyl soy biodiesel to diesel fuel reduces the tractor smoke opacity. The addition of soy biodiesel in diesel fuel provides a reduction equivalent CO₂ by 34 KgCO₂e h⁻¹ with B₁₀₀.

Keywords: Biofuel, Tractor test, Particulate matter

1. INTRODUÇÃO

Biodiesel é o nome dado à mistura monoalquil de ésteres derivados de cadeias longas de ácidos graxos, podendo ser produzido com gorduras animal ou vegetal, por meio da reação de transesterificação com álcool (metanol ou etanol), catalisada por base (Pandian et al., 2017). Conforme Lima et al. (2013), o biodiesel pode ser filtrado ou destilado, metílico ou etílico, produzido com óleos residual ou degomado.

O biodiesel destaca-se como alternativa potencial para substituir o diesel mineral, por apresentar características físico-químicas similares, reduzir a emissão de poluentes e ser utilizado em motores sem alteração mecânica (Guimarães et al., 2018). Além disso, o biodiesel é um combustível renovável (Pandian et al., 2017).

Em estudo para avaliar as emissões de poluentes de um motor-gerador ciclo diesel com variação nas concentrações de biodiesel de soja, Reis et al. (2013) observaram que acima de 65% de biodiesel no diesel ocorre redução na emissão de gases poluentes e emissão de enxofre. Conforme Cunha et al. (2015), uma das principais vantagens do uso de biodiesel é a ausência de compostos de enxofre na composição.

Ao avaliar o consumo de combustível e a opacidade da fumaça de trator agrícola em função do tipo de biodiesel (dendê e mamona) e das proporções de biodiesel no diesel, Lima et al. (2013) concluíram que o aumento de biodiesel acima de 50% eleva o consumo específico, podendo elevar em 26,34% em relação ao diesel quando utilizado 100% de biodiesel como combustível. Notaram, ainda, que ocorreu redução de 36,04% na emissão de poluentes (opacidade), quando o trator trabalhou com 100% de biodiesel como combustível. Resultados semelhantes aos de Neves et al. (2018), ao estudarem efeitos do tipo de combustível e misturas no desempenho operacional do trator, que observaram redução na opacidade da fumaça de 30; 38 e 37% com uso do biodiesel 90S10M (90% Soja e 10% Murumuru), 80S20M e 70S30M, respectivamente, em relação ao diesel.

Como observado na literatura, a queima de combustíveis fósseis em motores de combustão interna origina gases como UHC, NOX e CO (Pandian et al., 2017; Mahla et al., 2018; Subramanian et al., 2018). Nesse sentido, o suprimento de oxigênio necessário para a conversão em CO₂ se origina de aditivos oxigenados em

diesel, o que reduz as emissões (Kumar e Saravanan, 2016; Hagos et al., 2017; He et al., 2018).

Em virtude do exposto acima, teve-se o objetivo de avaliar o consumo de combustível, a opacidade da fumaça e a emissão de CO₂ equivalente evitada em um trator agrícola funcionando com biodiesel de soja etílico filtrado e destilado, em sete proporções de misturas de biodiesel ao diesel.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento

O trabalho foi conduzido no laboratório de Biocombustível e Ensaio de Máquinas-BIOEM, da Universidade Estadual Paulista, Câmpus Jaboticabal-SP. A localização geográfica da área de realização dos ensaios é definida pelas coordenadas 21°15' latitude sul e 48°18' longitude oeste, sendo a altitude média de 570 m.

2.2 Combustível

O biodiesel etílico de soja filtrado e destilado utilizado foi produzido no Laboratório de Desenvolvimento de Tecnologias Limpas (LADETEL), da Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto-SP.

O óleo diesel utilizado foi o S50, com 50 mg kg⁻¹ enxofre total, regulamentado no mercado nacional pelo PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) e classificado conforme a resolução ANP n. 50/2013 (ANP, 2013), adquirido na rede comercial da cidade de Jaboticabal – SP.

2.3 Condução do experimento

O presente trabalho foi realizado em dois ensaios: ensaio I - consistiu no teste dinâmico de consumo de combustível, e o ensaio II - estático, testando a opacidade da fumaça do cano de escape de trator agrícola em função do combustível utilizado.

Para ambos os ensaios, utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, esquema fatorial 2×7 , com três repetições, totalizando 42 observações. As combinações dos fatores foram dois tipos de biodiesel de soja etílico (filtrado e destilado) e sete proporções de mistura (B_0 , B_5 , B_{15} , B_{25} , B_{50} , B_{75} e B_{100}), em que o número subscrito indica a porcentagem de biodiesel no diesel.

Cada parcela experimental possuía 40 m de comprimento, com espaços de 15 m entre cada parcela na direção longitudinal, reservado para realização de manobras, tráfego de máquinas e estabilização do conjunto mecanizado, conforme a Figura 1.

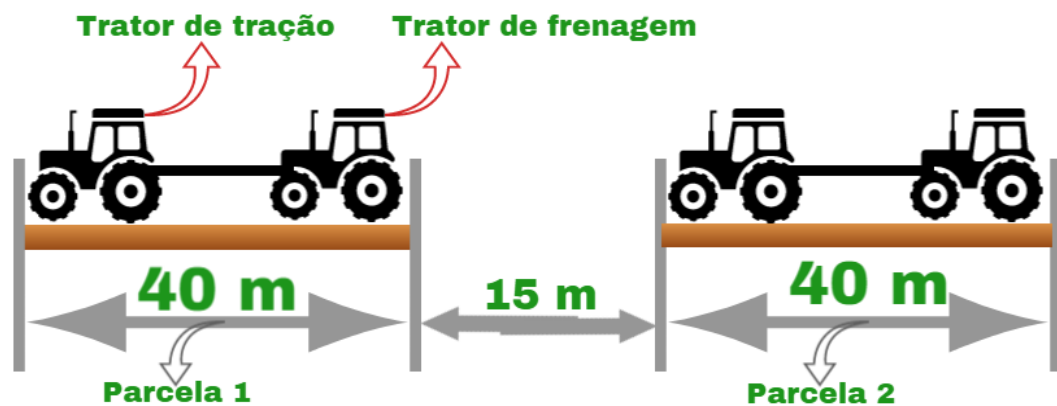


Figura 1. Esquema das parcelas experimentais.

2.3.1 Ensaio I

Para o ensaio I, foi necessária a utilização de um trator de frenagem unido ao trator de tração por meio de um cabo de aço, formando um comboio, para obtenção de carga controlada na barra de tração do trator de testes de 20 kN.

Os tratores utilizados no experimento foram denominados trator de tração (trator 1), da marca Valtra, modelo BM100, 4X2, com tração dianteira auxiliar, 74 kW (100 cv) a 2.300 rpm no motor, equipado com pneus 14.9-24 no eixo dianteiro e 23.1-26 no eixo traseiro, sendo tal trator instrumentado para a realização do teste Figura 2.



Figura 2. Trator de teste com instrumentação completa. Adaptado de Lopes (2006).

O referido trator possui um protótipo medidor de consumo de combustível, desenvolvido e construído na UNESP, Câmpus de Jaboticabal - SP, constando de três depósitos auxiliares confeccionados em aço inox para alimentação do trator de testes, sendo um de 4,0 L e dois de 1,5 L de capacidade (Figura 3). Tais depósitos permitiram a realização de ensaios com três proporções de biodiesel sem contaminar o tanque original do trator. Os depósitos ficaram posicionados a 1,1 m de altura em relação ao sistema de alimentação original (bomba injetora), sendo tal procedimento capaz de permitir o escoamento do biodiesel pela ação da gravidade e, dessa forma, evitou-se a utilização de bomba alimentadora.

Logo após o biodiesel sair de quaisquer dos depósitos auxiliares, o produto passava através de um sistema de filtragem independente daquele original do trator, com a finalidade de proteger os sensores de fluxo, de temperatura e o sistema de alimentação do trator, mesmo sabendo-se da boa procedência do biodiesel de teste (Figura 3). O filtro auxiliar utilizado no protótipo seguiu a mesma especificação do trator, evitando-se assim problemas relacionados com a vazão e a alimentação de combustível.

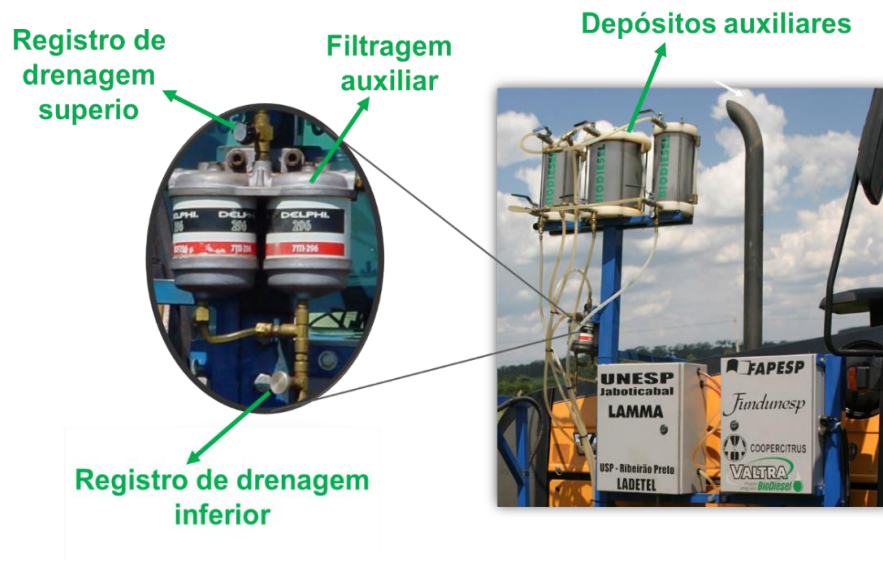


Figura 3. Depósitos e sistema de filtragem auxiliar do protótipo medidor de consumo de combustível.

Outra característica desse protótipo era a permissão de drenagem de combustível, bem como a retirada de ar de todo o sistema de alimentação, sem a utilização de ferramentas. Ressalta-se que, para este trabalho, a utilização deste protótipo teve como finalidade apenas a alimentação do trator com biodiesel sem contaminar o depósito original.

O denominado trator de frenagem (Trator 2) foi da marca Valtra, modelo BH140, 4X2, com tração dianteira auxiliar, 103 kW (140 cv) a 2.400 rpm no motor, utilizado para oferecer resistência de 20 kN ao trator de tração, engrenado em 3ª marcha.

2.3.1.1 Coleta de dados

O consumo de combustível foi medido, em cada parcela, em unidade de volume (mL), obtendo-se o volume total de alimentação na entrada da bomba injetora e o volume total retornado, sendo o combustível consumido a diferença entre as duas medidas. O sistema de medição do consumo de combustível consiste em dois conjuntos, um para a alimentação da bomba injetora e o outro para o retorno. Cada conjunto contém um medidor de fluxo da marca Oval Corporation, modelo Flowmate LSN 48, com precisão de 1% sobre a vazão nominal e vazão

máxima de 100 L h^{-1} , e um sensor de temperatura do tipo resistivo, modelo PT 100 (resistência de 100 ohms a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) com faixa de medida de $-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 4).

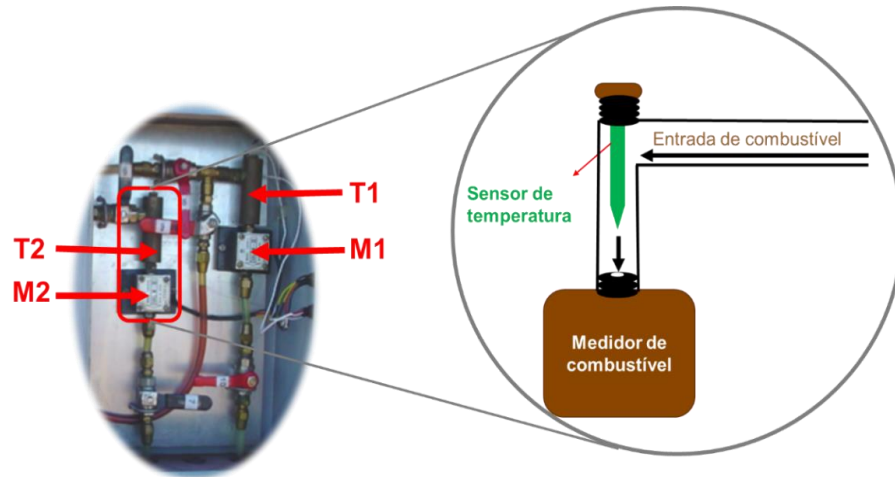


Figura 4. Esquema dos medidores de temperatura e consumo de combustível. T1 e M1 = medidor de temperatura e combustível da alimentação, respectivamente. T2 e M2 = medidor de temperatura e combustível do retorno, respectivamente.

A força na barra de tração foi obtida utilizando célula de carga da marca M. Shimitsu, modelo TF 400, com escala nominal de 0 a 100 kN, acoplada a barra de tração, com os valores de força obtidos em kN. Os dados referentes à força de tração e ao consumo de combustível foram monitorados e armazenados no sistema de aquisição de dados da marca Campbell Scientific, modelo Microllogger CR23X, sendo posteriormente transferido para computador.

De posse desses dados, determinaram-se a potência na barra de tração, consumo horário do combustível volumétrico, ponderal e específico.

A potência na barra de tração foi determinada de forma indireta, conforme a equação (1)

$$PB = FT \cdot v \quad (1)$$

em que,

PB= potência na barra de tração (kW);

F_T = força de tração na barra (kN), e

v = velocidade real de deslocamento (m s^{-1}).

O consumo horário volumétrico foi medido com base no volume consumido e no tempo de percurso em cada parcela, conforme a equação (2):

$$\mathbf{CHV} = \left(\frac{\mathbf{Va} - \mathbf{Vr}}{\mathbf{t}} \right) * \mathbf{3,6} \quad (2)$$

em que,

CHV = consumo horário volumétrico (L h^{-1});

Va = volume do combustível de alimentação (mL);

Vr = volume do combustível de retorno (mL);

t = tempo de percurso na parcela (s), e

3,6 = fator de conversão.

Para o cálculo do consumo horário ponderal, considerou-se a influência da densidade do combustível de alimentação e de retorno no momento do teste, conforme equação (3)

$$\mathbf{CHP} = \frac{(\mathbf{Va} * \mathbf{Dca} - \mathbf{Vr} * \mathbf{Dcr})}{\mathbf{t}} * \mathbf{0,0036} \quad (3)$$

em que,

CHP = consumo horário ponderal (kg h^{-1});

Va = volume do combustível de alimentação (mL);

Dca = densidade do combustível de alimentação (kg m^{-3});

Vr = volume do combustível de retorno (mL);

Dcr = densidade do combustível de retorno (kg m^{-3});

t = tempo de percurso na parcela (s), e

0,0036 = fator de conversão.

O consumo específico é o consumo de combustível expresso em unidade de massa por unidade de potência requerida na barra de tração, conforme equação (4):

$$\mathbf{CE} = \left(\frac{\mathbf{CHP}}{\mathbf{PB}} \right) * \mathbf{1000} \quad (4)$$

em que,

CE = consumo específico (g kW h^{-1});

CHP = consumo horário ponderal (kg h^{-1});
 PB = potência na barra de tração (kW), e
 1000 = fator de conversão.

2.3.2 Ensaio II

No ensaio II, referente à opacidade da fumaça proveniente da queima dos combustíveis no motor do trator, foi utilizado opacímetro de absorção de luz com fluxo parcial, da marca Tecnomotor, modelo TM 133, que está compatível com as normas NBR 13037, Inmetro, CEE 72/306.

O opacímetro estava ligado ao controlador serial da marca Tecnomotor, modelo TM 616, que recebeu os sinais do sensor e os converteu em unidade de medida. Tal equipamento serve para exportar os dados convertidos para computadores por meio de conexão serial, cuja interface é o *software* denominado IGOR, que gerencia os ensaios realizados de acordo com o método da aceleração livre, regime em que o motor é submetido ao máximo débito de combustível, sendo a potência desenvolvida absorvida somente pela inércia dos componentes mecânicos do motor (embreagem, árvore-piloto da caixa de mudanças), uma vez que o veículo está estacionado. As medições de opacidade são feitas em K, coeficiente de absorção de luz, e tem como unidade m^{-1} (TECNOMOTOR, 2012).

A opacidade da fumaça foi determinada no trator de testes marca Valtra, modelo BM100. Ao término de cada determinação, realizou-se a drenagem completa do sistema de alimentação, evitando contaminação do ensaio seguinte. Além disso, depois de trocado o combustível, o motor ficou em funcionamento por dez minutos antes do início de cada teste.

2.4 Emissão de CO₂ equivalente evitada

O cálculo da emissão de CO₂ equivalente evitada foi realizado conforme a equação (5):

$$\text{CO}_2\text{e} = F * C \quad (5)$$

Em que,

CO_{2e} = emissão do poluente (kg CO_{2e} L^{-1});

F = fator de emissão evitada;

C= consumo de combustível ($L h^{-1}$).

Conforme EPE (2005), para cada litro de biodiesel etílico de soja (B100) é evitado 2,53 kg CO_2 equivalente. Desse modo, foi considerado como fator de emissão evitada o valor de 2,53 kg CO_2 equivalente por litro.

2.5 Análise de dados

Os dados foram tabulados e submetidos à análise de variância e quando significativo foram comparados pelo teste de médias de Tukey, a 5% de probabilidade, para o tipo de biodiesel, enquanto para as proporções de biodiesel no diesel realizou-se a análise de regressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se na Tabela 1 que não ocorreu interação entres os fatores avaliados, sendo possível verificar o efeito dos tratamentos separados, por meio do teste de médias.

De acordo com a Tabela 1, observou-se que o processo de purificação do biodiesel de soja etílico não influenciou na potência na barra de tração, consumo de combustível horário volumétrico e ponderal, resultado este importante para a definição do melhor processo de purificação do biodiesel, uma vez que, para efetuar a destilação do biodiesel, é necessário filtrá-lo primeiro, aumentando o custo de produção.

Resultados semelhantes foram obtidos por Reis et al. (2006), ao estudarem o consumo de combustível de um trator agrícola com biodiesel filtrado e destilado em operação de semeadura direta, não verificaram influência do processo de purificação no consumo de combustível.

Tabela 1. Síntese da análise de variância e do teste de médias para as variáveis potência na barra de tração (PB), consumo horário volumétrico (CHV), consumo horário ponderal (CHP).

Fontes de Variação	Valores de F		
	PB kW	CHV L h ⁻¹	CHP kg h ⁻¹
Biodiesel (B)	1,53 ^{NS}	0,84 ^{NS}	0,95 ^{NS}
Proporção (P)	0,57 ^{NS}	13,77 ^{**}	23,03 ^{**}
B x P	0,33 ^{NS}	0,11 ^{NS}	0,20 ^{NS}
CV%	1,63	1,70	1,73
Fatores	Teste de Médias de Tukey (p<0,05)		
	PB	CHV	CHP
BIODIESEL	--kW--	--L h ⁻¹ --	--kg h ⁻¹ --
Filtrado	32,0 a	13,0 a	11,0 a
Destilado	32,2 a	12,9 a	11,0 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. **: significativo (P<0,01); *: significativo (P<0,05); NS: não significativo; C.V.: coeficiente de variação

Para o fator proporção de biodiesel no diesel (Tabela 1), ocorreu significância (p<0,01) para o consumo de combustível horário volumétrico e ponderal. Corroborando Lima et al. (2013), que ao estudarem variações de biodiesel no diesel observaram significância de 1% de probabilidade nos valores de consumo de combustível horário volumétrico e ponderal, com aumento de 21,8% e 28,4%, respectivamente, comparado com os tratamentos com biodiesel (B100) e os com diesel (B0).

Para a análise de regressão, não foi observada significância para a potência na barra de tração, sendo o valor médio de 32,7 kW. Tal resultado corrobora Camara (2009), que ao estudar proporções de biodiesel de dendê, não observou diferença na potência na barra de tração, atribuindo tais resultados ao fato de o menor poder calórico do biodiesel ser compensado pelo aumento do consumo de combustível, não alterando assim a potência na barra de tração.

Nos consumos de combustível horário volumétrico e ponderal, a análise de regressão foi significativa (p<0,01) para o modelo linear (Figura 5). Verifica-se que o acréscimo de biodiesel no diesel proporcionou aumento de 7,2% e 8,5% nos consumos de combustível horário volumétrico e ponderal, respectivamente, comparado com o tratamento diesel (B0) e biodiesel etílico de soja (B100). O aumento dos consumos horário volumétrico e ponderal com a adição de biodiesel no

diesel deve-se ao menor poder calorífico do biodiesel comparado ao diesel, sendo necessária maior combustão para realizar o mesmo trabalho (SIMON et al., 2018).

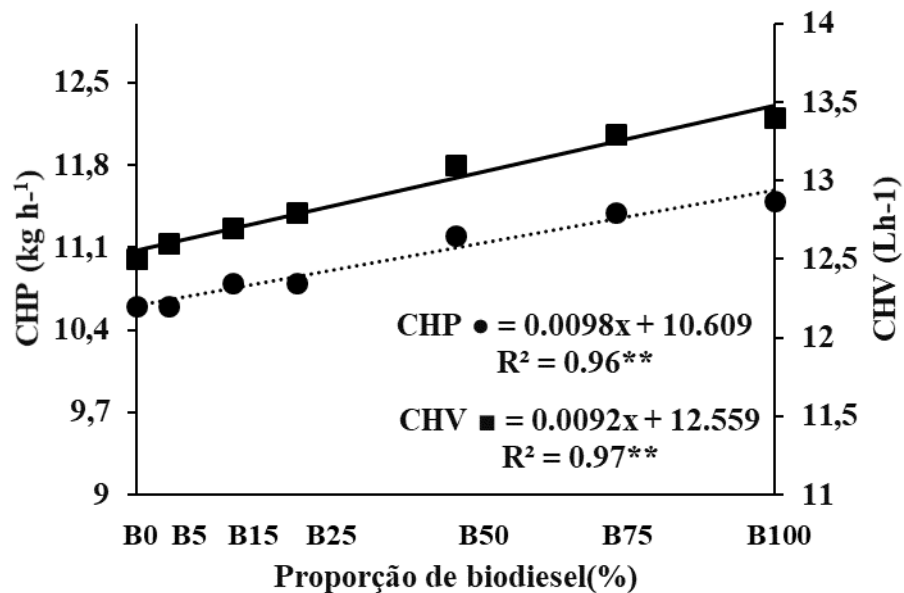


Figura 5. Consumos horário de combustível volumétrico (CHV) e ponderal (CHP) em função da proporção de biodiesel no diesel.

Na Tabela 2, não ocorreu interação nas variáveis consumo específico (CE), opacidade da fumaça e CO₂ equivalente evitado. Pode-se observar ainda que o processo de purificação do biodiesel de soja etílico não influenciou no consumo específico e na opacidade da fumaça.

Tabela 2. Síntese da análise de variância e do teste de médias para as variáveis consumo específico (CE), opacidade da fumaça (OPACIDADE) e CO₂ equivalente evitado.

Fontes de Variação	Valores de F		
	CE g kwh ⁻¹	OPACIDADE m ⁻¹	CO ₂ EQUIVALENTE EVITADO kg CO ₂ h ⁻¹
BIODIESEL (B)	1,91 ^{NS}	0,95 ^{NS}	0,53 ^{NS}
PROPORÇÃO (P)	10,64 ^{**}	97,10 ^{**}	244 ^{**}
B x P	0,40 ^{NS}	0,85 ^{NS}	0,25 ^{NS}
CV%	2,48	1,79	0,04
Fatores	Teste de Médias de Tukey (p<0,05)		
	CE g kW h ⁻¹	OPACIDADE m ⁻¹	CO ₂ EQUIVALENTE EVITADO kg CO ₂ h ⁻¹
BIODIESEL			
Filtrado	344 a	1,00 a	12,89a
Destilado	341 a	0,99 a	12,88a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. **: significativo (P<0,01); *: significativo (P<0,05); NS: não significativo; C.V.: coeficiente de variação.

Com relação às proporções de mistura de biodiesel no diesel (Tabela 2), observou-se que a adição de biodiesel ao diesel apresentou significância ($p < 0,01$) no CE e na opacidade da fumaça, corroborando Perin et al. (2017), que ao estudarem o desempenho de motor agrícola utilizando variações de biodiesel no diesel observaram aumento significativo no consumo específico, sendo na utilização de biodiesel (B₁₀₀) o consumo foi 13% maior em relação à adição de 5% (B₅) de biodiesel no diesel.

No consumo específico, a análise de regressão foi significativa ($p < 0,01$) para o modelo de regressão linear (Figura 6). Nota-se que o acréscimo das proporções de biodiesel no diesel proporcionou aumento de 9,14% no consumo específico comparado ao diesel (B₀) com biodiesel (B₁₀₀). Simon et al. (2018) observaram aumento no consumo específico (12, 9%) com a adição de biodiesel de mamona no diesel. Tal resultado deve-se à maior densidade e ao menor poder calorífico do biodiesel em relação ao diesel.

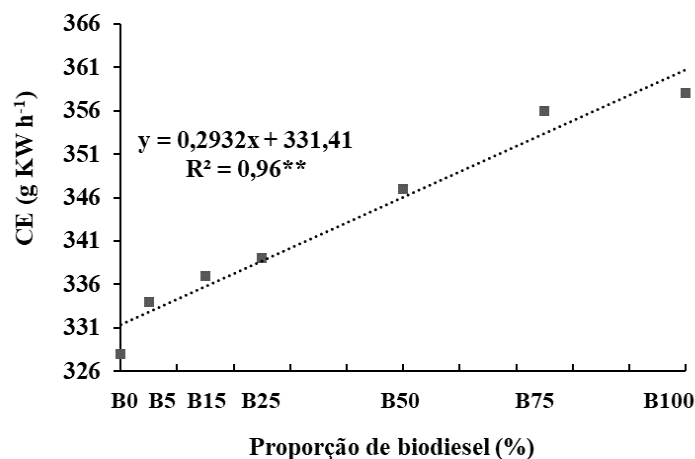


Figura 5. Consumo específico (CE) em função da proporção de biodiesel no diesel.

Na opacidade da fumaça, a análise de regressão foi significativa ($p < 0,01$) para o modelo de regressão linear (Figura 6). Observou-se ainda que o acréscimo de biodiesel no diesel reduziu em 54% a opacidade da fumaça comparado ao tratamento com diesel (B₀) e com biodiesel (B₁₀₀). Lima et al. (2013) e Simon et al. (2018) também observaram redução de 36,04% e 24,5%, respectivamente, na opacidade da fumaça comparado com os tratamentos somente com diesel ou biodiesel como combustível.

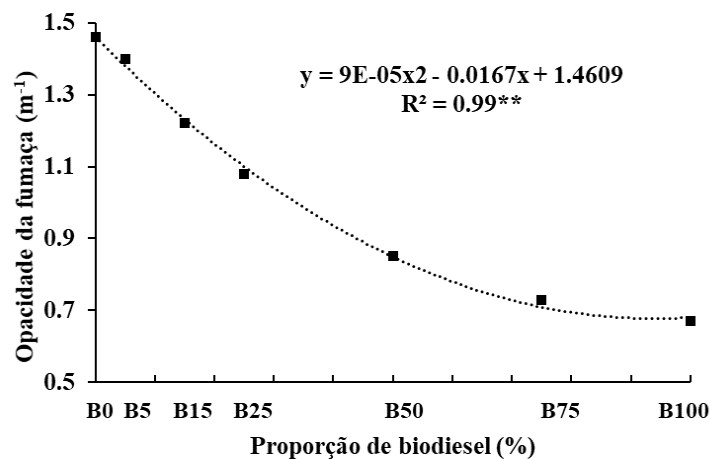


Figura 6. Opacidade da fumaça em função da proporção de biodiesel no diesel.

Na emissão de CO₂ equivalente evitada em função da proporção de biodiesel no diesel, a análise de regressão foi significativa ($p < 0,01$) para o modelo de regressão linear (Figura 7). Observa-se ainda que o acréscimo de biodiesel proporcionou aumento do CO₂ equivalente por hora evitado de 0,00 no B0 para 34 kg de CO₂ equivalente por hora evitados com a utilização do B100, indicando que a adição de biodiesel ao diesel contribui significativamente com a redução de CO₂ equivalente emitido durante as operações agrícolas que fazem uso de tratores.

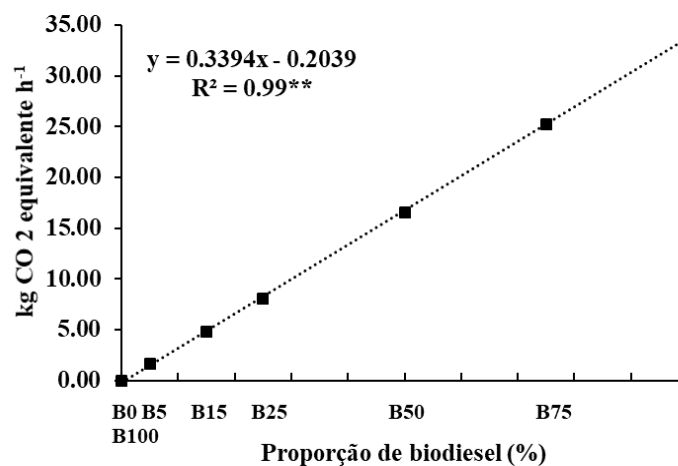


Figura 7. Emissão de CO₂ equivalente evitada com a adição de biodiesel no diesel.

O gráfico de contorno mostra o comportamento da opacidade da fumaça devido ao aumento do biodiesel no diesel e ao aumento do consumo específico (Figura 8). Nota-se redução de 43% na opacidade da fumaça em condições em que o consumo específico é superior a 350 g kW h⁻¹ e a proporção de biodiesel superior a 60%.

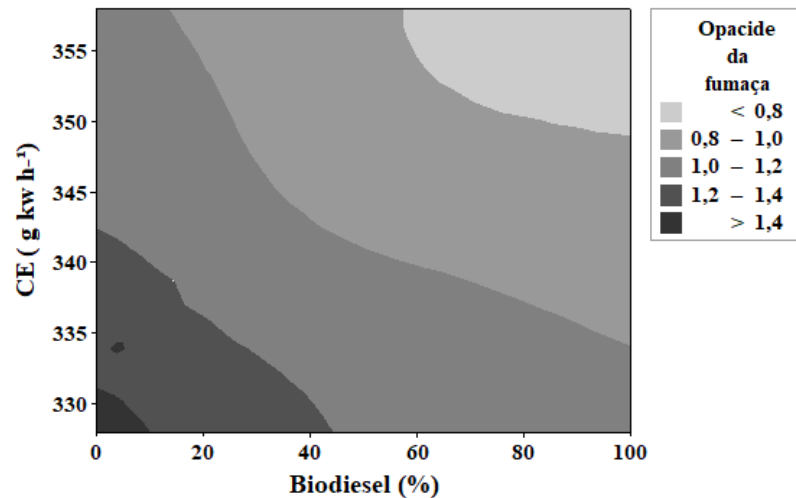


Figura 8. Gráfico de contorno para a opacidade da fumaça em função da proporção de biodiesel no diesel e consumo específico.

A redução da opacidade da fumaça à medida que aumenta a proporção de biodiesel etílico de soja ao diesel, deve-se à ausência de enxofre no biocombustível, tendo em vista que o enxofre compartilha o oxigênio na fase tardia da combustão com o carbono oriundo da queima parcial, resultando em aumento do material particulado (Pandian, 2017).

No gráfico de contorno apresenta-se o comportamento da emissão equivalente de CO₂ devido ao aumento do biodiesel no diesel e ao aumento no consumo específico (Figura 9). Observou-se que o uso de biodiesel a 100% em condições de consumo específico superiores a 355 g kW h⁻¹ é possível evitar cerca de 29 kgCO_e h⁻¹.

Considerando que em uma operação de subsolagem a 40 cm de profundidade, com trator de 169 kW (230 cv), o consumo médio é de 25 L h⁻¹, se o trator utilizar como combustível apenas o B100, a emissão de CO₂ equivalente por hora evitada seria de 63,25 kg de CO₂ equivalente por hora. Considerando que o tempo mínimo de trabalho anual para esse trator é de 1000 horas, seria possível evitar aproximadamente 63,2 toneladas de CO₂ equivalente por ano com um único trator.

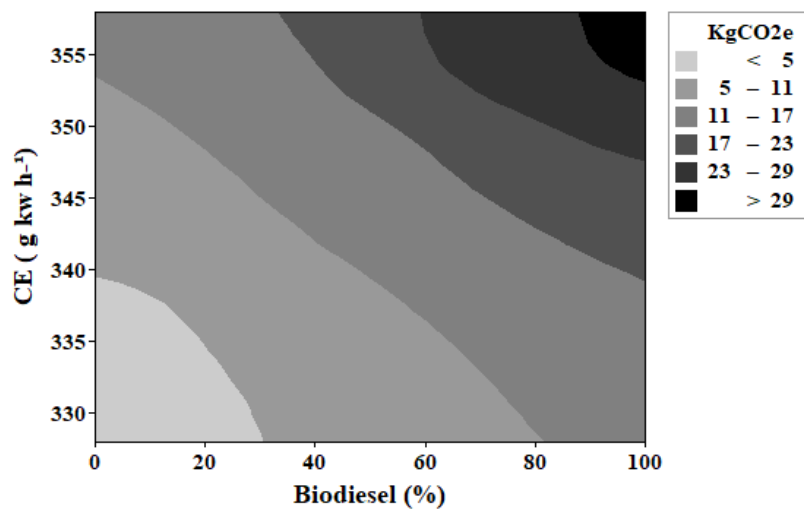


Figura 9. Gráfico de contorno para a emissão de CO₂ equivalente evitada em função da proporção de biodiesel no diesel e consumo específico.

4. CONCLUSÕES

A utilização de proporções de mistura de biodiesel de soja etílico filtrado e destilado no diesel como combustível não compromete o funcionamento do motor do trator de teste.

A adição de biodiesel de soja etílico no diesel aumenta os consumos horário de combustível volumétrico, ponderal e específico.

A adição de biodiesel de soja etílico no diesel reduz a opacidade da fumaça do trator.

O processo de purificação (filtrado ou destilado) do biodiesel etílico de soja não influencia na potência na barra de tração, no consumo horário de combustível e na opacidade da fumaça.

A adição de biodiesel de soja etílico no diesel proporciona aumento do CO₂ equivalente evitada em 34 kg de CO₂e h⁻¹ com B100.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP nº 50/2013**. 2013. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2011/dezembro/ranp%206%20%202011.xml> Acesso em: 25 mai. 2018.

CAMARA, FT. **Biodiesel de dendê em trator agrícola: desempenho em função do tempo de armazenamento e da proporção de mistura na operação de preparo do solo**. 2009. vii, 92 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/100856>>.

CUNHA, JPB.; REIS, EF.; COUTO, RF.; HOLTZ, V.; MACHADO, TA.; LEONÍDIO, D.M. Efeito de diferentes concentrações de biodiesel nas emissões gasosas de um trator agrícola em operação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 2015, 10, 564-569. DOI: 10.5039/agraria.v10i4a5245

EMPRESA DE PESQUISA EM ENERGÉTICA (EPE). **Potencial de redução de emissões de co2 em projetos de produção e uso de biocombustíveis 2005**. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesadosbertos/publicacoes/publicacoesarquivs/publicacao0/topico4/epe%20-%2020%20c2%ba%20biocombust%20c3%adves%20x%20mdl\[1\].pdf#search=fator%20de%20emiss%20co2](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesadosbertos/publicacoes/publicacoesarquivs/publicacao0/topico4/epe%20-%2020%20c2%ba%20biocombust%20c3%adves%20x%20mdl[1].pdf#search=fator%20de%20emiss%20co2). Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.

GUIMARÃES, CC.; SANTOS, VML.; CORTEZ, JW.; SANTOS, LDG. Redução da emissão de material particulado em função da inserção de misturas do biodiesel de soja e mamona ao diesel. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2018, 23, 355-362.

HAGOS, FY.; ALI, OM.; MAMAT, R.; ABDULLAH, AA. Effect of emulsification and blending on the oxygenation and substitution of diesel fuel for compression ignition engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, 75,1281–1294. doi:10.1016/j.rser.2016.11.113

HE, T.; CHEN, Z.; ZHU, L.; ZHANG, Q. The influence of alcohol additives and EGR on the combustion and emission characteristics of diesel engine under high-load condition. **Applied Thermal Engineering**, 2018, 140, 363–372. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.05.064

LIMA, LP.; LOPES, A.; OLIVEIRA, MCJ.; NEVES, MCT.; IAMAGUTI, PW. Biodiesel em trator agrícola: comportamento operacional em função do tipo e Proporções de mistura no diesel de petróleo. **Engenharia na agricultura**, 2013, 21,447-455.

LOPES, A. **Biodiesel em trator agrícola: desempenho e opacidade**. 2006. 158p. Tese Livre-Docência em Agronomia - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

KUMAR, RB.; SARAVANAN, S. Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2016, 60, 84–115. doi:10.1016/j.rser.2016.01.085 .

MAHLA, SK.; SINGLA, V.; SANDHU, SS.; DHIR, A. Studies on biogas-fuelled compression ignition engine under dual fuel mode. **Environmental Science and Pollution Research**, 2018 25, 9722–9729. doi.org/10.1007/s11356-018-1247-4.

NEVES, MCT.; LOPES, A.; OLIVEIRA, MCJ.; IAMAGUTI, PS.; LIRA, TAM.; MORETI, TCF.; LIMA, LP.; KOIKE, GHA. Effects of Murumuru (*Astrocaryum murumuru* Mart.) and soybean biodiesel blends on tractor performance and smoke density. **Australian Journal Crop Science**, 2018, 12,878-885. doi: 10.21475/ajcs.18.12.06.PNE634

PANDIAN, AK.; RAMAKRISHNAN, RBB.; DEVARAJAN, Y. Emission analysis on the effect of nanoparticles on neat biodiesel in unmodified diesel engine. **Environmental Science and Pollution Research**, 2017, 24, 23273–23278. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9973-6

PERIN, GF.; SCHLOSSER, JF.; GALON, L.; RODRIGUES, FA.; FRANTZ, UG. Desempenho de um motor agrícola a diesel utilizando diferentes combustíveis. **Engenharia Agrícola**, 2017, 37, 91-97.

POUR, AH.; ARDEBILI, SMS.; SHEIKHDAVOODI, MJ. Multi-objective optimization of diesel engine performance and emissions fueled with diesel-biodiesel-fusel oil blends using response surface method. **Environmental Science and Pollution Research**, 2018, 37, 1-11. doi:10.1007/s11356-018-3459-z

REIS, EF.; CUNHA, JPB.; MATEUS, DLS.; DELMOND, JG.; COUTO, RF. Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2013, 17, 565-571. doi.org/10.1590/S1415-43662013000500015.

REIS, GN.; LOPES, A.; FURLANI, CEA.; DABDOUB, MJ.; SILVA, RP.; DANILO, CC.; CAMARA, FT. Análise comparativa entre biodiesel filtrado e biodiesel destilado em trator agrícola. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 2006, 5, 149-155

SIMON, CP.; VITÓRIA, EL.; LACERDA, EG.; FREITAS, ILJ. Operating performance of a tractor working with different ratios of castor bean and jatropha biodiesel. **Engenharia na Agricultura**, 2018, 26, 35-42.

SUBRAMANIAN, T.; VARUVEL, EG.; GANAPATHY, S.; VEDHARAJ, S.; VALLINAYAGAM, R. Role of fuel additives on reduction of NOX emission from a diesel engine powered by camphor oil biofuel. **Environmental Science and Pollution Research**, 2018, 25, 15368–15377, 2018. doi:10.1007/s11356-018-1745-4

TECNOMOTOR, Tecnomotor Eletrônica do Brasil Ltda., **OPACER TM 133**
Opacímetro de amostragem. Manual de Operação. São Carlos, 2012. Ed. 07/01,
26p.