



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Rosana

FERNANDA VIANA MIYASAKI

Determinação experimental da densidade e viscosidade de misturas BX a partir de biodiesel produzido do óleo de pinhão manso

Rosana - SP
2021

Fernanda Viana Miyasaki

Determinação experimental da densidade e viscosidade de misturas BX a partir do biodiesel produzido do óleo de pinhão manso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria de Curso de Engenharia de Energia do Campus Experimental de Rosana, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Energia.

Orientadora: Andréia Fátima Zanette

A confecção da ficha catalográfica é realizada exclusivamente pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação e deve ser inserida no lugar desta folha.

Para solicitá-la, comunique a biblioteca do Campus Experimental de Rosana.

obs: Imprimir na parte inferior, no verso da Folha de Rosto.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Rosana

FERNANDA VIANA MIYASAKI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Prof. Dr. José Francisco Resende da Silva
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dra. Andréia Fátima Zanette
Orientadora/UNESP-Rosana

Prof. Dr. Leandro Ferreira Pinto
UNESP-Rosana

Prof. Dr. Leonardo Lataro Paim
UNESP-Rosana

Julho de 2021

Dedico,

À minha amada mãe Sílvia

À minha amada irmã Mariana

Ao meu falecido e amado pai Takeyoshi.

Somos um.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças todos os dias e por todas as minhas oportunidades que me trouxeram onde estou hoje.

Agradeço ao meu pai, Takeyoshi Miyasaki, pela força que temos com o amor. Mesmo em outro plano, sempre o sinto em meu coração. Isso me conforta e me completa.

Agradeço à minha mãe, Sílvia Viana, e minha irmã, Mariana Viana, por me incentivarem a seguir o caminho que me faz feliz e por sempre acreditarem em mim. Vocês são a minha maior força nessa vida e serão sempre minha grande motivação.

Agradeço aos meus avós Ernesta, Washington, Iaeko e Masaji e, também, à toda minha família por tudo que me ensinaram, pelo amor e por sempre torcerem por mim.

Agradeço à minha querida professora e orientadora Andreia Fátima Zanette por todo ensinamento, apoio, incentivo e amizade. Agradeço por fazer parte do meu crescimento profissional, por ter me acolhido durante a graduação e pelos bons momentos.

Agradeço à UNESP de Rosana e a todos os meus professores e profissionais do Campus, que sempre me apoiaram muito durante toda a minha trajetória acadêmica. Em especial agradeço ao professor Leonardo Paim e Leandro Pinto, pelo apoio e amizade, ao professor José Francisco Resende, ao Fagner Oliveira, Bruno Costa e Valdir Luiz da Graça por todo suporte e incentivo que significaram muito para mim.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela oportunidade cedida frente à pesquisa de iniciação científica (Processo: 2018/00806-9) e pelo suporte para a elaboração dos estudos.

Agradeço a Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da UNESP, no departamento de Química do Campus de Presidente Prudente pela parceria, através do laboratório cedido para realização das análises cromatográficas do biodiesel produzido.

Agradeço ao meu companheiro de vida, Kevin Barbosa de Lima, por todo amor, apoio e incentivo. Obrigada por estar ao meu lado e me dar forças diariamente!

Agradeço ao Movimento Empresa Júnior por ter ressignificado tantas coisas na minha vida durante a graduação e à Fontes e todos os membros de fundação e de gestões seguintes que me impulsionaram nesta jornada através do apoio e amizade, em especial aos meus queridos amigos Júlia Vilalva, Luís Gonçalves, João Jenson, Diego Melo e Thiago Fudimori.

Agradeço ao querido Edson Hiroshi Seo por ter me mostrado um caminho de mudança e que foi o que me despertou o interesse pela área de energia renovável.

Agradeço a todos os meus amigos que me deram forças em cada desafio que enfrentei durante a graduação e por acreditarem em mim, especialmente à Júlia Vilalva, Thiago Fudimori e Airton Mattozo.

“Vai, amigo, não há perigo que hoje possa assustar. Não
se iluda, pois nada muda se você não mudar”

Edson Hiroshi Seo

RESUMO

O biodiesel é uma realidade no Brasil e destaca uma produção que aumenta a cada ano com o intuito de reduzir o uso e a dependência de combustíveis fósseis, além da emissão de partículas poluentes que contribuem para a degradação ambiental e prejudicam a saúde humana. O presente trabalho consiste na análise de dois parâmetros importantes para caracterização de um biodiesel apto para uso complementar ao diesel de origem fóssil: a densidade e a viscosidade. O processo de combustão engloba algumas etapas, como a atomização em uma etapa anterior, que contribui para um melhor desempenho do motor, reduzindo as emissões de MPs. Desta forma, para uma boa atomização e conseqüentemente uma boa combustão, a viscosidade - que é inversamente proporcional à velocidade do fluido - deve ser a menor possível dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira ANP. As viscosidades (mm^2/s) encontradas neste estudo foram 3,59; 3,98; 4,41; 6,51; 6,64; 7,70 e 27,95 para B10, B15, B20, B30, B40, B50 e B100, respectivamente. A depender da matéria-prima utilizada para a produção do biodiesel, atrelada às condições do processo de conversão dos ésteres (reator utilizado, temperatura, catalisador etc.) a propriedade se apresenta de formas diferentes. Em relação à densidade, os valores encontrados foram 837,89, 840,88, 841,70, 846,72, 855,51, 865,56 e 888,75 kg/m^3 para as blends B10, B15, B20, B30, B40, B50 e B100, respectivamente. Os valores obtidos para a densidade estão dentro dos limites e foram condizentes com a literatura. Para a viscosidade cinemática, no entanto, até o B20 esteve dentro dos limites, mas seu aumento para cada acréscimo de 10% em volume de biodiesel nas misturas foi muito alta comparada à literatura. Ademais, a partir do B30 a viscosidade encontrada foi excedente ao limite máximo permitido. O estudo focou, assim, em analisar tais valores e compará-los com a literatura para entender suas possíveis implicações.

PALAVRAS-CHAVE: Biodiesel. Diesel. Blends. Viscosidade. Densidade.

ABSTRACT

Biodiesel is a reality in Brazil and highlights a production that increases every year to reduce the use and dependence on fossil fuels and the emission of polluting particles that contribute to environmental degradation and harm human health. The present work consists of two important parameters' analysis for the characterization of suitable biodiesel for use as a complementary fuel to fossil diesel: density and viscosity. The combustion process encompasses some steps, such as atomization in a previous step, which contributes to better engine performance, reducing MPS emissions. Thus, for good atomization and, consequently, good combustion, the viscosity - which is inversely proportional to the fluid velocity - must be the lowest possible within the limits established by the Brazilian ANP standard. The viscosities (mm^2/s) found in this study were 3.59, 3.98, 4.41, 6.51, 6.64, 7.70 and 27.95 for B10, B15, B20, B30, B40, B50 and B100, respectively. Depending on the raw material used for the production of biodiesel, linked to the conditions of the conversion process of the esters (reactor used, temperature, catalyst etc.), the property presents itself in different ways. Regarding density (kg/m^3), the values found were 837.89, 840.88, 841.70, 846.72, 855.51, 865.56 and 888.75 for blends B10, B15, B20, B30, B40, B50 and B100, respectively. The values obtained for density are within the limits and were consistent with the literature. However, for kinematic viscosity, even B20 was within limits, but its increase for each 10% additional biodiesel volume in the blends was very high compared to the literature. Furthermore, from B30 onwards, the viscosity found exceeded the maximum allowed limit. Thus, the study focused on analyzing these values and comparing them with the literature to understand their possible implications.

KEYWORDS: Biodiesel. Diesel. Blends. Viscosity. Density.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Evolução das emissões totais antrópicas associadas à matriz elétrica brasileira em MtCO ₂ - eq	17
Figura 2. Esquema do motor a diesel	19
Figura 3. Influência da viscosidade no processo de injeção.....	21
Figura 4. Consumo final de Biodiesel entre 2005 – 2019 e a política de adição deste combustível no diesel	27
Figura 5. Reação de transesterificação para a produção de biodiesel	30
Figura 6. Produção e purificação convencional de biodiesel	30
Figura 7. Classificação dos biocombustíveis por geração.....	31
Figura 8. Matérias-primas para a produção de biodiesel no Brasil	33
Figura 9. Esquema da reação de transesterificação em batelada com o reator (1), condensador (2), agitador magnético com aquecimento (3) e banho ultratermostático (4)	37
Figura 10. Viscosímetros Cannon-Fenske utilizado no teste da viscosidade dinâmica	37
Figura 11. Picnômetro utilizado no teste da densidade	38
Figura 12. Curva da densidade (kg/m ³) em relação a porcentagem de biodiesel nas misturas BX.....	45
Figura 13. Curva da viscosidade (mm ² /s) em relação à porcentagem de biodiesel nas misturas BX.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação percentual do consumo nos transportes expressa em base energética (2018-2019).....	17
Tabela 2 - Viscosidade cinemática de diferentes biodieseis avaliada na literatura	21
Tabela 3 - Viscosidade cinemática de óleo diesel avaliada na literatura.....	22
Tabela 4 - Viscosidade cinemática de misturas de diesel/biodiesel	23
Tabela 5 - Densidade, em kg/m ³ , de biodiesel proveniente de diferentes matérias-primas	24
Tabela 6 - Densidade de óleo diesel avaliado na literatura	24
Tabela 7 - Eixos estratégicos do RenovaBio	26
Tabela 8 - Classificação do material particulado.....	28
Tabela 9 - Transesterificação Química vs. Enzimática	35
Tabela 10 - Especificação dos materiais.....	36
Tabela 11 - Condições reacionais para a produção do biodiesel	39
Tabela 12 - Proporções de biodiesel consideradas nas misturas BX do presente estudo	40
Tabela 13 - Propriedades do óleo de <i>Jatropha curcas</i> L. a 25°C	44
Tabela 14 - Valores experimentais da densidade para as misturas.....	45
Tabela 15 - Viscosidade dinâmica das blends	46
Tabela 16 - Viscosidade cinemática das misturas BX.....	47

LISTA DE SIGLAS, PARÂMETROS E UNIDADES

SIGLAS

AGL	Ácidos graxos livres
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
BEN	Balanco Energético Nacional
BX	Mistura de diesel/biodiesel com X% de volume de biodiesel
DAG	Diacilglicerol
IEA	International Energy Agency
EN	Norma Europeia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAME	Ésteres metílicos de ácidos graxos
FAEE	Ésteres etílicos de ácidos graxos
GC	Cromatografia Gasosa
JCB	Biodiesel de Jatropha curcas
JCO	Óleo de Jatropha curcas
MAG	Monoacilglicerol
MP	Material Particulado
POB	Biodiesel de Óleo de Palma
TAG	Triacilglicerol

PARÂMETROS

η	Viscosidade dinâmica
η_D	Índice de Refração
ρ	Densidade
ν	Viscosidade Cinemática

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL E NO MUNDO	16
2.2. O DIESEL	18
2.2.1. Motores a Diesel	19
2.2.1.1. Viscosidade	20
2.2.1.2. Densidade	23
2.3. MERCADO DE BIODIESEL NO BRASIL	25
2.4. O BIODIESEL	27
2.4.1. Produção de Biodiesel	29
2.4.1.1. Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel	31
2.4.1.2. Álcool na produção de biodiesel	33
2.4.1.3. Tipos de catalisadores	34
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1. ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS	36
3.2. EQUIPAMENTOS.....	36
3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	38
3.3.1. Análise da matéria-prima utilizada na produção do biodiesel	38
3.3.2. Produção do biodiesel a partir do óleo de pinhão manso	38
3.3.3. Caracterização do biodiesel produzido	39
3.3.4. Misturas BX biodiesel/diesel	39
3.3.5. Determinação da densidade	40
3.3.6. Determinação da viscosidade	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE PINHÃO MANSO	43
4.2. PRODUÇÃO DE BIODIESEL	44
4.3. ANÁLISE DA DENSIDADE	44
4.4. ANÁLISE DA VISCOSIDADE	46
5. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	52
ANEXO A - Variação da densidade da água com a temperatura	57

1. INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento mundial no que tange o uso de energia acompanha um cenário de grande degradação ambiental e que, por consequência, gera a necessidade de promover a discussão para novas alternativas que contribuam com a diversificação da matriz energética no Brasil e no mundo. Dentro do cenário brasileiro, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, em 2019 houve um avanço na oferta de biodiesel e biomassa de cana, bem como no acréscimo de fontes como eólica e solar na matriz energética. Estas conquistas contribuem para manter o país em um patamar elevado em fontes renováveis dentro da matriz energética nacional em relação ao resto do mundo (EPE & MME, 2020).

De acordo com o *International Energy Agency* (IEA), em 2019 houve uma queda combinada de carvão e aumento de gás e energias renováveis no fornecimento total de energia mundial, o que resultou em uma redução, em relação à energia, de quase 3% nas emissões de dióxido de carbono. O incentivo às fontes alternativas, além de intensos estudos para otimizar o desempenho de cada uma das fontes, é extremamente importante para serem cada vez mais competitivas no mercado, tornando-se sinônimo de vetor de crescimento, tirando este título carregado por fontes petroquímicas há tantos anos.

O Brasil é um país predominantemente urbano e o setor de transporte cumpre um papel particular, sendo um grande responsável pela emissão de partículas poluentes. O diesel fóssil está entre um dos combustíveis que emitem, em sua combustão, os poluentes atmosféricos mais perigosos (FAZANI ESTEVES SANCHES et al., 2020; HAJJARI et al., 2017; THANGARAJA; KANNAN, 2016). Devido à alta poluição do ar causada pela combustão de combustíveis fósseis como o diesel, o Brasil e os demais países ao redor do mundo trazem cada vez mais forte as discussões acerca dos problemas ambientais, além de rigorosas legislações de emissão (E et al., 2017).

O biodiesel, por sua vez, é um combustível renovável que surge como uma alternativa ao “petrodiesel”. Trata-se de uma mistura de ésteres monoalquílicos de ácidos graxos de cadeia longa e sua rota convencional de produção é a transesterificação através de óleos vegetais ou gordura animal como matéria-prima. O combustível renovável pode ser classificado também como sustentável, biodegradável, não inflamável e com toxicidade baixa. Ademais, promove uma melhor lubrificação no motor, prolongando sua vida útil e melhorando seu desempenho (MAHLIA, 2020).

No entanto, existem algumas desvantagens apresentadas pelo biodiesel, como o custo de produção e algumas propriedades físico-químicas que afetam seu desempenho no motor a

diesel, e que devem ser estudadas para torná-lo mais viável. De acordo com alguns autores, a viscosidade cinemática, a densidade e o valor calorífico caracterizam os parâmetros principais do combustível que afetam a produção da potência do motor e na formação de emissões (HOANG, 2018). Desta forma, a motivação deste trabalho é desenvolver um estudo a fim de entender a relação das propriedades em análise (viscosidade e densidade) das blends de biodiesel com diesel e os motores a diesel.

1.1.OBJETIVO

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo de misturas BX de biodiesel através da análise da viscosidade e densidade das blendas. Desta forma, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização do óleo de pinhão manso;
- Produção de biodiesel por meio do óleo de pinhão manso via catálise enzimática;
- Caracterização do biodiesel produzido;
- Determinação densidade em misturas BX de biodiesel/diesel;
- Determinação da viscosidade em misturas BX de biodiesel/diesel.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL E NO MUNDO

Com o consumo de fontes intensivas na emissão de partículas poluentes mostrando-se cada vez mais em descompasso com as necessidades ambientais, no que tange também o âmbito de disponibilidade, é possível observar relevantes transições energéticas em todo o mundo. A mudança na matriz energética é observada à medida que há um aumento populacional considerável atrelado à expansão de renda e mudanças no padrão de consumo. De acordo com a IEA (2018), os pilares que fundamentam tal mudança são: (i) sustentabilidade, com a visão de reduzir a poluição atmosférica que provocam mortes prematuras a todo ano; (ii) acessibilidade, com a redução nos custos de fontes renováveis; e (iii) fiabilidade, com o importante papel de políticas energéticas e aprimoramentos das tecnologias. Os itens citados são indissociáveis e dependem de mudanças nos cenários políticos para garantir a segurança energética no mundo, bem como o desenvolvimento sustentável (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018). Assim, iniciativas globais como o Acordo de Paris, as Metas de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU e as Contribuições Nacionalmente Declaradas (NDC) adotadas em cada país exercem um papel fundamental para alcançar os objetivos esperados ao redor do mundo (EPE, 2020).

No contexto nacional, a nova transição energética relatada no Plano Nacional de Energia 2050 terá como pilar a eletrificação com destaque das fontes renováveis, os biocombustíveis, a eficiência energética e o gás natural. Os biocombustíveis, segundo o documento, através de políticas de incentivo estão sendo cada vez mais implementados no país por questões de garantia energética e de preservação ambiental (EPE, 2020).

Do ponto de vista do transporte, dado o avanço do consumo de biocombustíveis de 2018 para 2019, o setor teve seu consumo acrescido em 2,67 milhões de tep, apresentando uma matriz energética dentro do setor composta de 25% em fontes renováveis (EPE & MME, 2020). A Tabela 1 apresenta, de o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, a variação do consumo nos transportes.

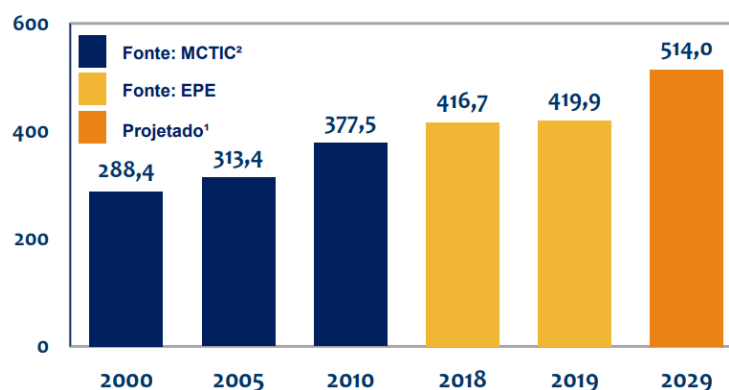
Tabela 1 - Variação percentual do consumo nos transportes expressa em base energética (2018-2019)

Etanol	+11,3%
Gasolina	-0,5%
Óleo diesel	+1,9%
Biodiesel	+9,4%

Fonte: BEN (2020)

Por outro lado, ainda, dados observados do mesmo ano mostram que setor de transporte foi responsável por gerar a maior parte das emissões antrópicas relacionadas à matriz energética do país, com 193,4 MtCO₂-eq de um total de 419,9 MtCO₂-eq (EPE & MME, 2020).

Figura 1. Evolução das emissões totais antrópicas associadas à matriz elétrica brasileira em MtCO₂ - eq



Fonte: BEN (2020)

O crescimento do óleo diesel dentro do setor de transporte no consumo de energia mostra-se uma tendência crescente (EPE & MME, 2020). Este fato traz ainda mais importância ao estudo do biodiesel como combustível complementar em busca da redução da emissão de partículas poluentes no meio.

O aumento das emissões de gases do efeito estufa, retém o calor e contribui para o aumento da temperatura média da superfície terrestre. Portanto, é de suma importância que saibamos a realidade enfrentada hoje, compreendendo que o setor de transporte contribui com boa parte das emissões. Ademais, por estarmos vivendo um momento de transição energética, é preciso encontrar meios para aprimorar a produção de combustíveis alternativos, como o biodiesel, permitindo cada vez mais o aumento de sua proporção em misturas com o diesel em motores Diesel.

2.2.O DIESEL

O óleo diesel fóssil, diferente do que é observado no biodiesel, possui como principais componentes os hidrocarbonetos não ramificados e saturados com número de carbono variando de 12 a 24 (TAMILSELVAN; NALLUSAMY; RAJKUMAR, 2017). Essa diferença na estrutura molecular contribui significativamente para mudanças nas propriedades físico-químicas do diesel em relação ao biodiesel (HOANG, 2018). Além disso, sua produção envolve o processo de destilação do petróleo, sendo obtido a temperaturas na faixa de 160 a 410°C - a gasolina, a título de comparação, é destilada na faixa de 80 a 120°C (GUARIEIRO, 2011). Por ser um derivado do petróleo, este combustível está envolvido em muitas discussões quanto à emissão de MPs na atmosfera, bem como de SO_x, NO_x e CO, contribuindo para a degradação do meio e, por isso, o biodiesel é misturado ao combustível fóssil para contribuir com a redução desta emissão. Associado a este fato, há um grande esforço em produzir um biocombustível (biodiesel) de qualidade e que não afete negativamente o desempenho do motor.

O óleo diesel obtido nas refinarias de petróleo é designado como Diesel A. Este combustível, segundo Resolução ANP nº 50/2013, é autorizado para ser utilizado em motores de ciclo diesel sem a adição de biodiesel. O Diesel B, por sua vez, é aquele com adição de biodiesel conforme legislação vigente (ANP, 2020a).

Quando misturados os combustíveis, a mistura biodiesel/diesel, exige um manuseio mais rigoroso, visto a maior higroscopicidade - propensão de absorver água - e biodegradabilidade do biodiesel e sua menor estabilidade à oxidação. Desta forma, torna-se essencial para a qualidade do combustível a maior atenção e cuidado aos processos de distribuição, transporte e armazenamento, drenagem, limpeza e troca de filtros (PETROBRAS, 2014).

Vale ressaltar, ainda, que para considerar um combustível qualificado para aplicação em motores as seguintes características são necessárias (CAVALCANTI, 2013):

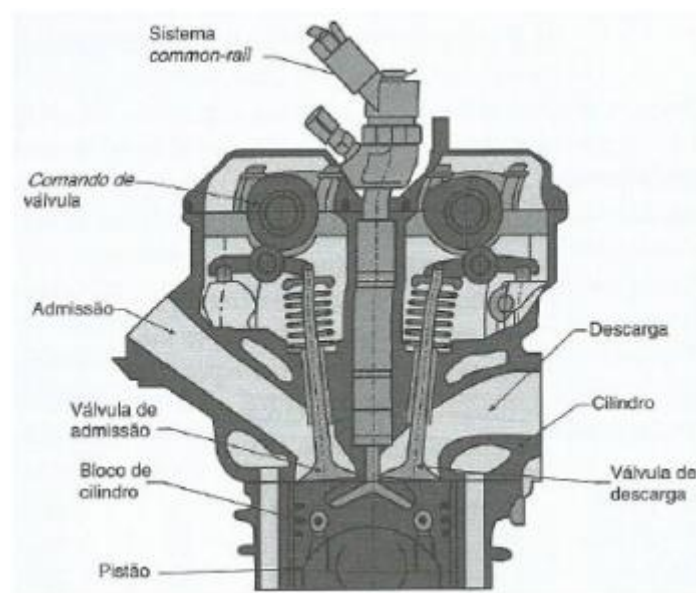
- Qualidade de ignição, promovendo um início rápido da combustão após sua injeção;
- Queima limpa e completa;
- Não corrosivo e não produzir gases tóxicos e corrosivos durante sua combustão;
- Facilmente atomizado, contribuindo para uma boa mistura ar-combustível;
- Bom escoamento em baixas temperaturas;
- Não conter água e/ou sedimentos que possam provocar a interrupção do seu escoamento para os cilindros;

- Favorecer à segurança em seu manuseio e estocagem.

2.2.1. Motores a Diesel

O motor Diesel, como mostrado na Figura 2, trata de uma máquina a combustão interna que atua através de um ciclo diesel, caracterizado pela alta pressão e temperatura em função da compressão do ar que contribui para a ignição do combustível à medida que o óleo diesel é injetado e atomizado na câmara de combustão (CAVALCANTI, 2013; FARAH, 2012).

Figura 2. Esquema do motor a diesel



Fonte: Farah (2012)

Desta forma, os motores a ciclo Diesel são conhecidos pela sua ignição por compressão, diferente do ciclo Otto presente nos motores a gasolina, que possuem ignição por centelha. Neste tipo de motor o ar é comprimido até temperaturas acima da autoignição do combustível - fato que beneficia estes motores, já que somente o ar é comprimido no processo de combustão, evitando a autoignição e possibilitando o uso de combustíveis menos refinados. Após a compressão, o combustível é introduzido por um injetor, dando início à combustão (ÇENGEL; BOLES, 2013).

O processo de combustão e a consequente emissão dos motores a diesel são altamente influenciados pela qualidade da injeção de ar, da mistura ar-combustível e da atomização (spray), por isso torna-se tão importante estudar as variáveis que contribuem para tal performance do motor (SOM; AGGARWAL, 2009).

A atomização é um processo que se configura pela desintegração em pequenas gotas de um jato de líquido, sendo regido por forças aerodinâmicas do meio gasoso a sua volta e pela interação de outras forças do líquido. Assim, a quebra (*break-up*) ou atomização, acontece quando as forças aerodinâmicas do meio superam as forças de tensão superficial do líquido (JÚNIOR, 2017). Este fenômeno pode ocorrer devido a energia cinética do referido líquido, pelo meio externo ou refletido da energia mecânica aplicada de equipamentos rotativos ou vibratórios (AZEVEDO, 2013).

A atomização na câmara de combustão, inclusive, tem suas características atuando na qualidade da mistura ar-combustível. Além disso, essa qualidade é afetada por propriedades do combustível utilizado, como a viscosidade e a densidade (FARIA; PINTO; VALLE, 2010).

As vantagens da inclusão de biodiesel no diesel estão no aprimoramento de um ponto de fulgor mais elevado e melhora a lubrificidade nas misturas. No entanto, há desvantagens também presentes, como o menor calor de combustão e maior ponto de nuvem a depender do caso (RAMÍREZ-VERDUZCO et al., 2011).

2.2.1.1. Viscosidade

A viscosidade configura um dos parâmetros mais importantes para o bom desempenho do combustível no motor, a qual apresenta grande sensibilidade às variações da temperatura. Esta propriedade trata da resistência ao escoamento do fluido, portanto quanto maior for seu valor, pior para este fluido.

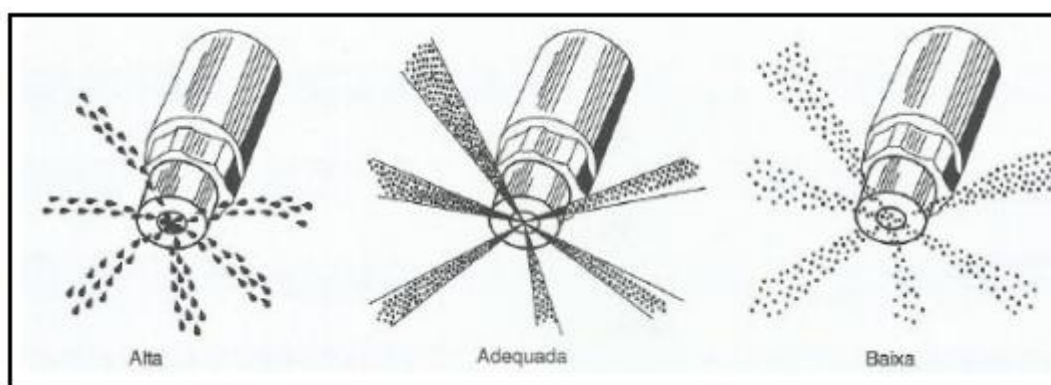
Segundo especificações da ANP, o limite máximo de viscosidade do biodiesel é de 6 mm²/s; valores acima deste limite indicam cadeias carbônicas longas e saturadas, podendo causar atrasos na ignição pela dificuldade de vaporização do combustível e comprometendo, assim, o desempenho do motor, além de reduzir a eficiência energética do sistema e aumentar emissões indesejadas (ROCKEMBACH; PACHECO; PEREIRA, 2013; TEIXEIRA; COLAÇO; CALDEIRA, 2013).

Ainda, altos valores de viscosidade promovem uma atomização mais pobre do *spray* nos injetores devido a um aumento na queda de pressão nos injetores e na bomba e, contribuindo para a diminuição da pressão de injeção. Com a má atomização, há uma penetração excessiva do jato e baixa dispersão do combustível na câmara de combustão, como ilustra a Figura 3, além do sistema ficar passível para a formação de fuligem e depósito no motor (CAVALCANTI, 2013; WU; LIN; CHANG, 2016). A literatura aponta que, com maiores

temperaturas, o fluido consegue escoar com mais facilidade devido à diminuição da viscosidade - fator, então, que contribui para operação dos equipamentos de injeção (AZEVEDO, 2013).

O combustível deve apresentar, no entanto, valores de viscosidade dentro de limites inferiores também. De acordo com o abordado por Cavalcanti (2013), valores muito baixos de viscosidade podem causar outros problemas na bomba de injeção, pois provoca uma dispersão excessiva, também ilustrado na Figura 3, bem como uma lubrificação inadequada do sistema de injeção.

Figura 3. Influência da viscosidade no processo de injeção



Fonte: Farah (2012)

A Tabela 2 agrupa a viscosidade cinemática de diferentes biodieseis estudados na literatura. A Tabela 3 traz, ainda, valores de viscosidade cinemática para óleo diesel em diferentes estudos.

Tabela 2 - Viscosidade cinemática de diferentes biodieseis avaliada na literatura

Matéria-prima do biodiesel produzido	Viscosidade (mm²/s)	Referência
<i>Jatropha Curcas L.</i>	4,4810	(KANAVELI; ATZEMI; LOIS, 2017b)
Macaúba	13,900	
Macaúba	13,500	(FARIA; PINTO; VALLE, 2010)
Soja	5,6000	
Avelã	4,6830	(GÜLÜM; BILGIN, 2017)
Milho	4,0694	(AYDIN et al., 2011)
Soja	4,2100	(AZEVEDO, 2013)
Óleo de Palma	4,7100	(BENJUMEA; AGUDELO; AGUDELO, 2008)

Fonte: Autor

Tabela 3 - Viscosidade cinemática de óleo diesel avaliada na literatura

Viscosidade (mm²/s)	Referência
2,8821	
3,6864	(KANAVELI; ATZEMI; LOIS, 2017b)
2,7559	
2,7000	(GÜLÜM; BILGIN, 2017)
4,3300	(BENJUMEA; AGUDELO; AGUDELO, 2008)

Fonte: Autor

Ao analisar as Tabelas 2 e 3 é possível observar que o valor da viscosidade cinemática apresenta valores menores para o óleo diesel do que para o biodiesel. Desta forma, para a utilização do biodiesel em motores de ciclo diesel sem modificações é preciso produzir um combustível qualificado, através de estudos dessas propriedades para chegar a valores menores. A literatura aponta que a viscosidade diminui com o aumento da temperatura (GÜLÜM; BILGIN, 2017).

Kanaveli & Atzeni & Lois (2017) também analisaram a viscosidade cinemática para diversas misturas de biodiesel/diesel com três combustíveis diesel diferentes. Os resultados mostram o aumento da viscosidade com o aumento da porcentagem de biodiesel presente nas blends, como esperado, partindo de valores em torno de 2,8000 ~ 3,7000 mm²/s para o B5 - considerando resultados de misturas provenientes de biodieseis de várias matérias-primas – e em torno de 3,900 ~ 4,7000 mm²/s para o B90. A Tabela 4 ilustra os valores referentes aos testes para o biodiesel de pinhão manso (JCB) elaborado pelos autores

Tabela 4 - Viscosidade cinemática de misturas de diesel/biodiesel

% JCB	Viscosidade Cinemática [mm²/s]
5	2,9814
7	2,9872
10	3,0442
20	3,1409
30	3,2610
40	3,4147
50	3,7301
60	3,7301
70	3,888
80	4,0633
90	4,2138

Fonte: Kanaveli & Atzeni & Lois (2017)

2.2.1.2. Densidade

A densidade, ou massa específica, é a propriedade que se relaciona diretamente com a estrutura molecular das substâncias, aumentando de acordo com uma cadeia carbônica maior e decrescendo com a maior quantidade de insaturações (LÔBO; FERREIRA; CRUZ, 2009). Assim como a viscosidade, a densidade também é uma propriedade do combustível importante e que deve ser conhecida à medida que é correlacionada a outros parâmetros relevantes como o número de cetano e valor de aquecimento, além de afetar diretamente o desempenho do motor e a emissão de gases. Portanto, a densidade também afeta a injeção do combustível e processo de combustão (GÜLÜM; BILGIN, 2017; SCHAFFNER et al., 2019).

As Tabelas 5 e 6 englobam valores de densidade observados na literatura de biodiesel proveniente de diferentes matérias-primas e óleos diesel, respectivamente.

Tabela 5 - Densidade, em kg/m³, de biodiesel proveniente de diferentes matérias-primas

Matéria-prima do biodiesel	Densidade (kg/m³)	Referência
Pinhão manso	881,70	(KANAVELI; ATZEMI; LOIS, 2017b)
Mamona	911,00	
Mamona	901,00	(FARIA; PINTO; VALLE, 2010)
Soja	879,00	
Avelã	874,07	(GÜLÜM; BILGIN, 2017)
Milho	864,20	(AYDIN et al., 2011)
Pinhão manso	880,00	(HOANG, 2018)
Soja	880,60	(AZEVEDO, 2013)
Óleo de Palma	864,42	(BENJUMEA; AGUDELO; AGUDELO, 2008)

Fonte: Autor

Tabela 6 - Densidade de óleo diesel avaliado na literatura

Densidade (kg/m³)	Referência
835,10	
835,80	(KANAVELI; ATZEMI; LOIS, 2017b)
823,80	
832,62	(GÜLÜM; BILGIN, 2017)
853,97	(BENJUMEA; AGUDELO; AGUDELO, 2008)

Fonte: Autor

Os valores das Tabelas 5 e 6 mostram, assim como o caso da viscosidade, valores menores da densidade do óleo diesel em relação ao biodiesel. A variação da densidade interfere na massa de combustível que chega ao motor, mostrando a relação desta propriedade com o bom desempenho do referido motor (HOANG, 2018).

O biodiesel de óleo de palma (POB) investigado por Benjumea & Agudelo & Agudelo (2008) mostrou valor inferior ao verificado para o óleo diesel para o valor de aquecimento bruto, dada à presença de oxigênio nas moléculas de éster metílico. Os autores explicam que esta diferença observada é ligeiramente reduzida quando expressada como energia por unidade de volume, contrário à expressa por energia por unidade de massa, dada a maior densidade do biodiesel estudado. Seguindo tendências observadas na literatura, tais diferenças resultam no índice de cetano do POB maior do que o observado para o diesel.

Faria & Pinto & Valle (2010), ainda, através da análise do uso de biodiesel de mamona e de soja, puros e misturados com diesel, na qualidade da atomização em motores a diesel, sugerem com seus resultados que o uso de misturas BX, principalmente com teores mais elevados de biodiesel, deve conter ajustes no motor para um melhor desempenho.

2.3. MERCADO DE BIODIESEL NO BRASIL

Com a alta dos preços do petróleo em 2002, conforme explanado por Rutherford (2016), foi impulsionado novamente as discussões pelo uso do biodiesel como forma de segurança energética através de fontes alternativas de energia, trazendo o compromisso do país, também, com as questões climáticas e de sustentabilidade pelo uso de biocombustíveis. Desta forma, algumas regulamentações do biodiesel foram criadas (RUTHERFORD, 2016):

- **PROBIODIESEL:** programa lançado em 2002 com o objetivo de redução do uso do diesel fóssil pelo incremento gradual do biodiesel, inicialmente por meio de pesquisas e desenvolvimento tecnológico da cadeia de produção do combustível. Além disso, tinha como objetivos a expansão do mercado das oleaginosas e do uso de combustíveis renováveis e a redução de impactos ambientais como a emissão de poluentes na atmosfera (MATTEI, 2008; REZENDE et al., 2021).
- **Programa Nacional de Produção e Uso de Biocombustíveis (PNPB):** consiste na adaptação, em 2004, do programa Probiodiesel, tentando dar-lhe um caráter mais social através da inserção da agricultura familiar na produção de matéria-prima (MATTEI, 2008).
- **Lei 11.097/2005 (Lei Biodiesel):** primeiro marco regulatório do biodiesel que introduziu, em janeiro de 2005, o biodiesel na matriz energética brasileira, estabelecendo os percentuais mínimos de biodiesel no diesel para cada ano programado (SILVA; POLLI, 2020).
- **Lei 11.116/2005:** Lei que trata do Registro Especial de produtor ou importador de biodiesel e dispõe isenções ou reduções de PIS/PASEP e COFINS sobre a venda do biocombustível a depender do tipo de produtor-vendedor e matéria-prima e da região de produção da matéria-prima (RUTHERFORD, 2016).

Outros marcos regulatórios mais recentes, como a RenovaBio – Política Nacional de Biocombustíveis criada pela Lei nº 13.576/2017, também surgem com a finalidade de promover a expansão dos biocombustíveis na matriz energética, contribuir para o cumprimento do Acordo de Paris – visando os compromissos estabelecidos pelo Brasil, além de garantir previsibilidade

ao mercado ao mercado de combustíveis, com a redução de emissões de gases que contribuem para o efeito estufa pelos biocombustíveis e aprimorando ganhos de eficiência energética (BRASIL, 2018; MME, 2020).

Segundo alguns autores (SALINA; DE ALMEIDA; BITTENCOURT, 2020), na última década, houve um aumento percentual de 840% na produção de biodiesel, configurando um cenário de avanços tecnológicos e, consequentemente, aumento da viabilidade do setor. O RenovaBio se apresenta como um programa de estímulo ao retorno da expansão dos biocombustíveis, com investimento privado neste setor para avançar a segunda e terceira geração destes combustíveis (SALINA; DE ALMEIDA; BITTENCOURT, 2020).

Assim, as Metas de Descarbonização, a Certificação da Produção de Biocombustíveis e o Crédito de Descarbonização (CBIO) configuram os três eixos estratégicos da RenovaBio, elencados na Tabela 7.

Tabela 7 - Eixos estratégicos do RenovaBio

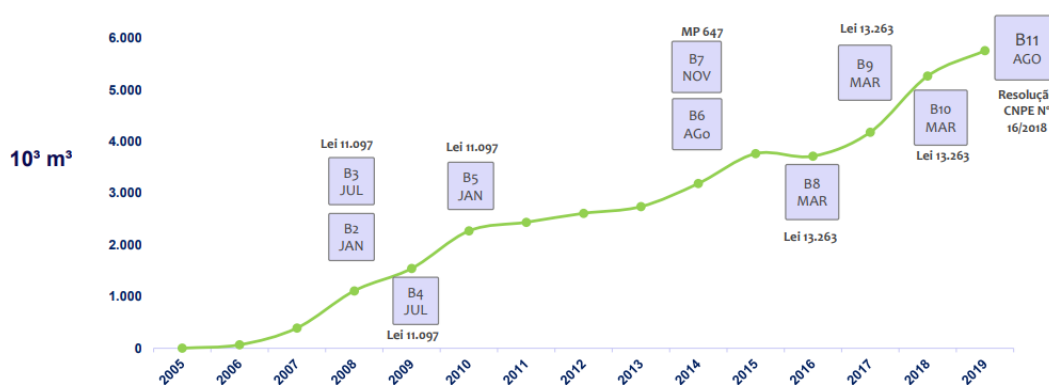
Eixo Estratégico	Descrição
Metas de Descarbonização	• Metas preliminares de redução de emissão de gases causadores do efeito estufa. • Metas individuais compulsórias definitivas de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa: estabelecidas em CBIOs e obtidas através de uma meta compulsória anual (MME/ANP, 2021).
Certificação da Produção de Biocombustíveis	• Os produtores e importadores de biocombustíveis que tiverem a certificação terão a possibilidade de gerar lastro para emissão primária de Créditos de Descarbonização (CBIOs) (ANP, 2021).
Crédito de Descarbonização (CBIO)	• Ativo ambiental criado como parte do RenovaBio. • Cada CBIO emitido por produtores/importadores de biocombustíveis coincide a uma tonelada de carbono que deixa de ser emitida para a atmosfera (MME, 2020).

Fonte: MME & ANP (2020)

O Brasil, junto com os Estados Unidos, representa cerca de 37% da produção de biodiesel do mundo (EPE, 2020). Para o caso do Brasil, o Plano Decenal Energético – PDE

2030, publicado pela EPE em março de 2020, apresentou dados de 44,2 bilhões de litros do combustível produzidos pela indústria brasileira até julho de 2020, com 74 leilões realizados. Ainda, com base na Resolução CNPE n° 16/2018, o cronograma de misturas BX entre biodiesel e diesel A no mercado foram de 11% em 2019 (a partir de setembro/19), 12% em 2020 (a partir de março/20), 13% em 2021 (a partir de março/21), 14% em 2022 (a partir de março/22) e 15% em 2023 (a partir de março/23). Todavia, a Resolução ANP n° 831/2020, de 7 de outubro de 2020, autorizou a redução da porcentagem mínima de 12% estabelecida para 2020 a partir de março, para 11% dentro do período de 1 de novembro de 2020 a 31 de dezembro de 2020, a fim de garantir o abastecimento nacional de diesel B (ANP, 2020b; BRASIL, 2020). A Figura 4 ilustra a política de adição do biodiesel no diesel.

Figura 4. Consumo final de Biodiesel entre 2005 – 2019 e a política de adição deste combustível no diesel



Fonte: BEN (2020)

Com a adoção do B11 em 2019, dentro do transporte de cargas rodoviário, houve um acréscimo de biodiesel em 9,6%, acompanhado com um avanço menor do diesel no mesmo período em 2,2%. Assim, o consumo final de biodiesel em 2019 aumentou 9,3% de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE & MME, 2020).

2.4. O BIODIESEL

O biodiesel provém da combinação variada de ésteres com diferentes estruturas químicas. A maioria contém de 5 a 6 ésteres alquílicos de ácidos graxos principais, como o ácido láurico, palmítico, esteárico, oleico, linoléico e linolênico (TAMILSELVAN; NALLUSAMY; RAJKUMAR, 2017).

Trata-se de um biocombustível possível de ser utilizado em qualquer tipo de motor a diesel, preferencialmente misturado com o diesel, como por exemplo caminhões, ônibus, máquinas agrícolas e industriais, geradores e locomotivas (UBRABIO, 2021).

Os problemas associados à queima de combustíveis fósseis vão além da sua finitude na natureza e a dependência, muitas vezes, de importação. A emissão de poluentes na atmosfera está associada à degradação ambiental e gera, também, problemas respiratórios e outros relacionados à saúde da população.

O setor de transporte, responsável por expressiva emissão de poluentes atmosféricos, afeta o meio ambiente de forma global, pelo efeito estufa, e local, impactando na saúde humana. Para complementar o Renovabio, no sentido de contribuir com o incentivo e previsibilidade do uso de biocombustíveis, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) fez um estudo profundo sobre o impacto das variações de emissão de partículas poluentes (MP 2,5) na saúde humana. Essa variação foi avaliada de acordo com a quantidade de biocombustíveis utilizada por veículos de carga leve e pesada (EPE, 2021).

As partículas poluentes podem ser classificadas quanto ao seu processo de formação e ao seu tamanho. Quando menores que 10 microns (MP10), especificamente, podem ser divididas em fração fina ou grossa. As classificações estão representadas pela Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação do material particulado

Tipo	Classificação	Explicação
Processo de formação	Primário	Emitidas diretamente para a atmosfera
	Secundário	Formadas por reações químicas na atmosfera
	Fração Fina (MP 2,5)	Partícula Respirável com diâmetro $\leq 2,5 \mu\text{m}$
< MP10		Partícula Inalável
	Fração Grossa	$2,5 \mu\text{m} < \text{diâmetro} < 10 \mu\text{m}$

Fonte: EPE (2021)

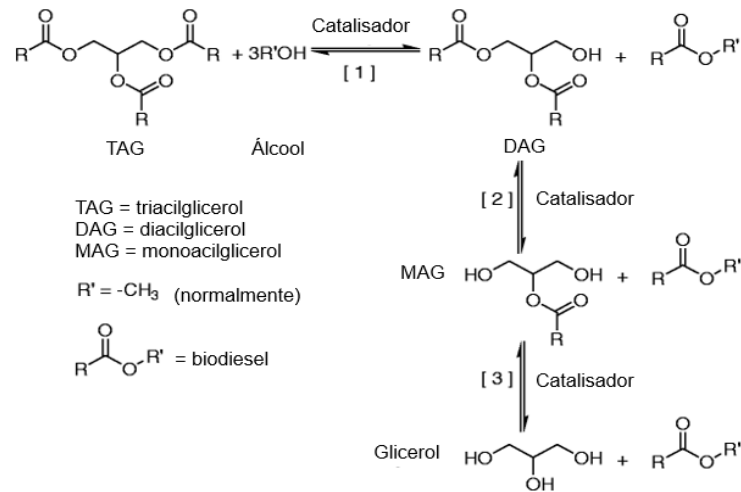
O estudo da EPE, pautado em dados da região metropolitana de São Paulo pelo ano base de 2018, com suporte de dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) e considerando o caso do biodiesel, para incluí-lo em motores diesel, utilizou diferentes proporções de biodiesel no diesel. Para a adição de 10% do biocombustível ao diesel A, o estudo mostrou impactos significativos, evitando em 4,8% das emissões advindas do setor de transportes na região e contribuindo para a melhora na expectativa de vida da população. (EPE, 2021).

2.4.1. Produção de Biodiesel

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a produção de biodiesel B100 em 2019 cresceu 10,7% em relação a 2018. O biodiesel é uma fonte de energia renovável produzido para ser usado em motores a diesel sem a necessidade de transformações no motor.

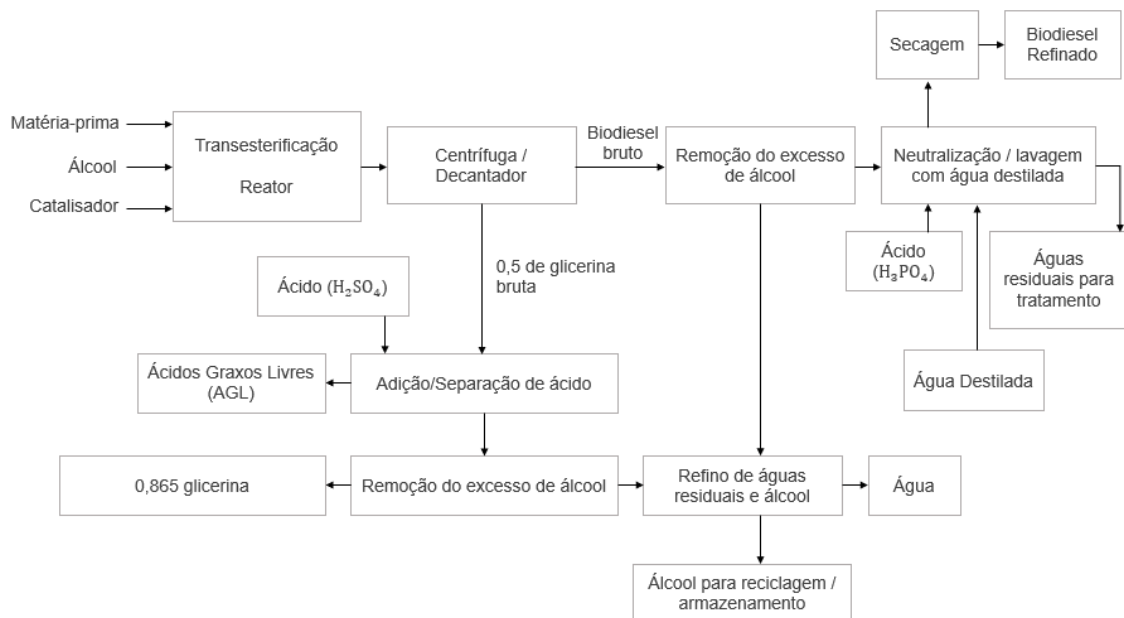
Segundo Zheng et al. (2020), o biodiesel possui um ponto de inflamação mais alto que o óleo diesel, além de reduzir grande parte das emissões. Além disso, algumas outras vantagens como a disponibilidade, baixa toxicidade, por ser neutro de carbono e, ainda, por possibilitar a produção descentralizada, colocam o combustível em uma posição de muito estudo. No entanto, ainda que envolvido por muitas vantagens, principalmente relacionadas ao meio ambiente, o biodiesel apresenta algumas desvantagens como a alta densidade e viscosidade que afetam seu desempenho no motor a diesel não modificado (HOANG, 2018). Além disso, há o fato do custo de produção em larga escala mantendo bons rendimentos de ésteres trazer inviabilidade ao processo.

A produção de biodiesel pode acontecer por diferentes rotas, dentre elas estão a inclusão direta ou por mistura, transesterificação, pirólise e microemulsão. Por ser um processo simples, de baixo custo e pela qualidade do combustível produzido, a principal rota de produção hoje é a transesterificação (ou alcóolise) (ATADASHI; AROUA; AZIZ, 2010; GEBREMARIAM; MARCHETTI, 2017; REZANIA et al., 2019), a qual envolve a transformação de um triglicerídeos em ésteres monoalquílicos de ácidos graxos. O processo, em análise pormenorizada, envolve a reação de um triacilglicerol (TAG), com um álcool de baixo peso molecular, geralmente etanol ou metanol, formando gradativamente diglicerídeos (DAG), monoglicerídeos (MAG) até, enfim, ésteres de ácidos graxos (biodiesel) e glicerol (coproduto) (MOSER, 2009). O processo global, envolvendo as reações intermediárias, está ilustrado na Figura 5.

Figura 5. Reação de transesterificação para a produção de biodiesel

Fonte: Adaptado de Moser (2009)

Ao tratar da rota convencional para a conversão dos ésteres, envolvendo a etapa de purificação do combustível gerado, Atadashi & Aroua & Aziz (2010) esquematizaram os processos (Figura 6):

Figura 6. Produção e purificação convencional de biodiesel

Fonte: Adaptado de Atadashi & Aroua & Aziz (2010)

Em relação à produção deste biocombustível, é importante elencar algumas condições reacionais que devem, de acordo com Gebremariam & Marchetti (2017), sempre serem

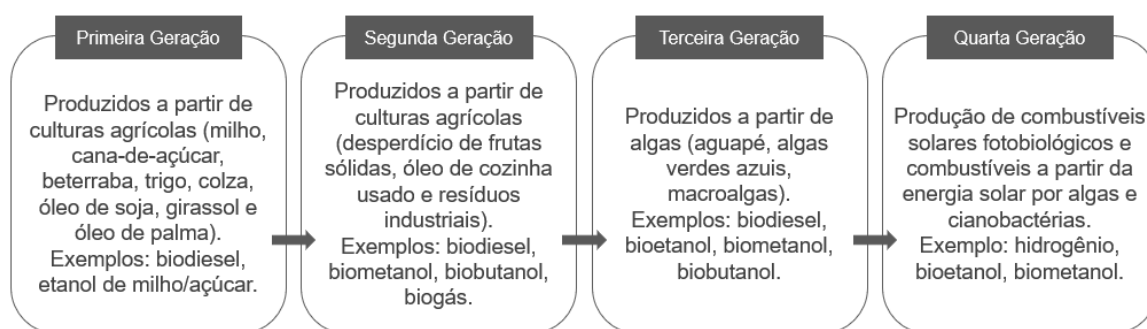
otimizadas para uma conversão eficiente de biodiesel. Algumas condições são: razão molar, tipo e quantidade de catalisador, temperatura, tempo e meio de reação, tipo e quantidade relativa de solventes. Além disso, o tipo de matéria-prima e o teor de ácidos graxos livres são variáveis importantes para estudo e que contribuem para uma boa conversão de ésteres (GEBREMARIAM; MARCHETTI, 2017; SALES et al., 2016).

Por outro aspecto, alguns parâmetros para a produção do biodiesel também são estudados a fim de economizar em sua produção, tornando-o mais competitivo. Gebremariam & Marchetti (2018) colocam algumas alternativas em destaque: (i) uso de catalisadores mais baratos; (ii) tecnologias com entrada de energia total mínima; (iii) reação de transesterificação mais rápida; e (iv) uso de matérias-primas mais baratas (GEBREMARIAM; MARCHETTI, 2018).

2.4.1.1. Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel

Os biocombustíveis estudados ao redor do mundo possuem diferentes rotas de produção, garantindo diferentes rentabilidade e eficiência. A fim de encontrar alternativas cada vez mais energeticamente eficientes, financeiramente viáveis e ambientalmente menos poluentes, diversos estudos são impulsionados por melhores resultados. Além disso, a escolha do insumo influencia no maior ou menor custo de produção. A literatura categoriza, então, os biocombustíveis em quatro gerações, ilustradas na Figura 7 (HAMZAH et al., 2020).

Figura 7. Classificação dos biocombustíveis por geração



Fonte: Adaptado de Hamzah et al. (2020)

Assim, uma das peças-chave para viabilidade do biodiesel, tanto em qualidade quanto em custo de produção é a matéria-prima utilizada, sendo amplamente estudada por sua gama de possibilidades, podendo ser óleos convencionais, alternativos (como o óleo de *Jatropha*

curcas L., que será utilizado nesta pesquisa), geneticamente modificados (elevado teor de insaturados), óleos usados, óleos de outras fontes, como àqueles provenientes do lipídeo produzido por algas e microalgas, por exemplo, e gorduras animais (VENTURINI; LORA, 2012).

De acordo com o tipo de matéria-prima utilizada, o biodiesel também pode ser classificado em primeira, segunda ou terceira geração. O biodiesel de primeira geração trata-se daquele obtido através de óleos convencionais, amplamente utilizados ao redor do mundo, como o óleo de soja, girassol, palma, colza, etc., sendo o óleo de soja o mais usado para a produção em larga escala no Brasil e nos Estados Unidos (RICO; SAUER, 2015; VERMA; SHARMA; DWIVEDI, 2016). Apesar da fácil conversão proporcionada por esses óleos, a competição com a alimentação humana que provoca, também, o aumento no custo destes alimentos, além da escassez de terras, traz motivação para uso de outras fontes oleaginosas. Com a grande discussão em torno do alto custo, oferta limitada e competição com safras de alimentos para humanos e animais, configurando o famoso conflito alimento x energia, surge o biodiesel de segunda geração. Este biodiesel, por sua vez, é obtido através de óleos não comestíveis, por serem tóxicos, e são inclusos nesta categoria também, resíduos comerciais e residenciais, como comentado por Mofijur et al. (2021). Dentre os óleos não comestíveis, alguns amplamente estudados na literatura são: óleo de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) (CHHETRI et al., 2008), de árvore de algodão, macaúba, etc. Estes óleos, por sua vez, ainda promovem competição com o uso da terra e demandam tecnologias mais sofisticada para processos *downstream* (MOFIJUR et al., 2021; ZULFIQAR et al., 2021). Desta forma, o biodiesel de terceira geração entra com o benefício de não necessitar de terra para cultivo, além apresentar tendências positivas de rendimento em relação às áreas de plantio. Mas, como desvantagem apresentadas por Mofijur et. al. (2021), observa-se a produção insuficiente de biomassa para comercialização e o alto custo inicial para produção em larga escala. Este combustível de terceira geração é obtido através dos lipídeos presentes na biomassa produzida por microalgas (MOFIJUR et al., 2021; MOREIRA et al., 2021).

Segundo dados da União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (Ubrabio), as principais matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel no país estão elencadas na Figura 8, sendo o óleo de soja o mais amplamente adotado.

Figura 8. Matérias-primas para a produção de biodiesel no Brasil



Fonte: Adaptado de Ubrabio (2021)

O presente estudo foi realizado através do biodiesel de pinhão manso (JCB), óleo não comestível e muito explorado na literatura por ter uma ampla distribuição geográfica de forma favorável, adaptando-se a diferentes condições edafoclimáticas, além de não haver a necessidade de monocultura e não contribuir para a competitividade com a alimentação humana (ARAÚJO; CHAVES; ARAÚJO, 2007).

Wu & Lin & Chang (2016) compararam um biodiesel produzido do óleo de *Jatropha curcas* L. (JCB) com outros biodieseis obtidos de óleos comestíveis e com diesel. Após análises, todos os biodieseis apresentaram maior densidade e viscosidade cinemática em relação ao diesel, mas o JCB demonstrou menor viscosidade em relação ao demais biodieseis. No estudo realizado, ainda, o JCB foi comparado com o diesel premium D em questões de emissão de CO e CO₂ em um motor a diesel. Os resultados mostraram menores emissões de CO tanto para o JCB quanto para o diesel D com o aumento das velocidades do motor, sendo valores menores do biodiesel em relação ao diesel em velocidades mais lentas. Para o CO₂, sua emissão para o JCB reduziu consideravelmente com o aumento da rotação do motor de 1000 para 1200 rpm. O diesel D, por sua vez, se manteve estável. (WU; LIN; CHANG, 2016).

2.4.1.2. Álcool na produção de biodiesel

O tipo de álcool utilizado nas reações de transesterificação caracteriza-se como álcoois monohídricos primários ou secundários, de acordo com Ma & Hanna (1999), com 1 a 8 átomos de carbono. A relação direta observada no biodiesel entre o comprimento e a saturação da cadeia carbônica e a viscosidade, também é válida para os álcoois, portanto quanto maior a cadeia do

álcool utilizado na transesterificação, maior a viscosidade do biodiesel produzido (CAVALCANTI, 2013).

Os álcoois mais amplamente estudados são o metanol e o etanol. Por ser polar e de cadeia curta, além de ser mais barato que o etanol, muitos estudos apontam o metanol como o álcool mais eficiente, garantindo maior atividade de lipase, e mais utilizado (KO et al., 2012).

Por outro lado, o etanol se mostra promissor à medida que advém de fontes renováveis, como a biomassa, através do processo de fermentação – processo este que pode reduzir seu custo. Além disso, como já comentado para o caso das matérias-primas, a depender da região de produção do biodiesel, a escolha do etanol também pode ser facilitada por outras questões, como é o caso do Brasil, por exemplo, no qual este álcool encontra tendências positivas com a disponibilidade de matéria-prima. Outro ponto válido de destaque está no fato de que o etanol é mais solúvel em óleo do que o metanol, o que contribui para minimizar a limitação da transferência de massa ao longo do processo de transesterificação (VERMA; SHARMA; DWIVEDI, 2016).

2.4.1.3. Tipos de catalisadores

Como parte das rotas para a produção do biodiesel, o uso de catalisadores é amplamente utilizado à medida que contribui para acelerar a conversão dos ésteres. Assim, existem vários catalisadores abordados na literatura: catalisadores químicos (ácido e base), por lipase, líquido iônico e nano catalisadores.

Especialmente em processos industriais de larga escala, a transesterificação via catálise alcalina homogênea, como abordado por Remonato (2017), conduz a altos rendimentos em curtos tempos de reação. As principais bases utilizadas hoje são o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH). Algumas desvantagens levantadas na literatura, porém, trazem a atenção e consequente motivação para a busca por catalisadores alternativos para a rota convencional de produção de biodiesel. Duas desvantagens importantes estão acerca de uma separação do catalisador e do glicerol mais complicada e a exigência de baixos teores de água para evitar a formação de sabões e de AGL, necessitando uma matéria-prima de alta qualidade, muitas vezes com maior preço (REMONATTO, 2017).

Apesar da transesterificação química proporcionar níveis elevados de conversão dos TAGs aos seus correspondentes alquil ésteres de ácidos graxos, este processo traz também algumas desvantagens, como: grande gasto de energia, a difícil recuperação do glicerol, a

necessidade de ser retirado do produto, além do efluente alcalino requerer tratamento (MEHER; VIDYA SAGAR; NAIK, 2006)

A depender da escolha da matéria-prima, para óleos que apresentam, geralmente, alto teor de ácidos graxos livres (AGL), algumas dificuldades surgem à medida que seu uso direto como substrato para a catálise alcalina provoca problemas como formação de sabões devido à presença de AGL. Assim, a catálise enzimática é uma alternativa à catálise química por ser tolerante a grandes quantidades de AGL nos óleos, além de gerar benefícios como (REMONATTO, 2017; WANCURA, 2017):

- *Eco-friendly*;
- Alta pureza do biodiesel produzido - geração reduzida de subprodutos;
- Fácil recuperação do biodiesel;
- Pureza da glicerina gerada - presença mínima de contaminações pelo catalisador;
- Possibilidade de reuso do catalisador;
- Condições brandas de reação.

Ainda, as enzimas são caracterizadas por apresentarem elevada especificidade, o que é muito associado ao sistema “chave-fechadura”, pelo qual apenas um substrato ou conjunto de substratos específicos (chave) são capazes de encaixar no sítio ativo (fechadura). Este sistema configura o alcance de apenas uma conversão catalítica, dificultando reações secundárias normalmente indesejadas (WANCURA, 2017).

A Tabela 9 elenca algumas diferenças observadas entre a reação convencional para a produção de biodiesel, pela catálise química (ácida ou básica) e a catálise enzimática (RAVINDRA; JEGANNATHAN, 2015; SANDER, 2018; WANCURA, 2017).

Tabela 9 - Transesterificação Química vs. Enzimática

Característica do Processo	Catálise Química	Catálise Enzimática
Temperatura da reação (°C)	60-70	30-40
AGL em óleos não refinados	Produtos saponificados	Metil Ésteres
Presença de água na matéria-prima	Interferência na reação	Não influencia
Rendimento em ésteres alquílicos	Normal	Alto
Recuperação do glicerol	Difícil	Fácil
Purificação de ésteres	Lavagens consecutivas	Nenhuma
Custo do catalisador	Barato	Relativamente alto
Rendimento do produto	Alto	Alto

Fonte: Adaptado de Ravindra & Jegannathan (2015) e Wancura (2017)

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS

Para realizar os testes de densidade e viscosidade foi utilizado diesel comercial e biodiesel do óleo de pinhão manso. O diesel comercial foi adquirido em posto local e o biodiesel foi produzido com base em resultados de trabalhos anteriores executados pela autora em que utilizou como substratos óleo de pinhão manso e etanol e a lipase Eversa® Transform 2.0 como catalisador da reação de transesterificação. Todos os reagentes utilizados para produção e análise do biodiesel possuem grau analítico e foram utilizados como recebidos, sem tratamento prévio. A Tabela 10 elenca os materiais utilizados e suas descrições.

Tabela 10 - Especificação dos materiais

Material	Descrição
Enzima	Lipase Eversa Transform 2.0
Álcool	Etanol com grau analítico P.A.
Água	Água destilada
Diesel	Diesel B comercial
Biodiesel	Produzido a partir do óleo de pinhão manso (<i>Jatropha curcas</i> L.)

Fonte: Autor

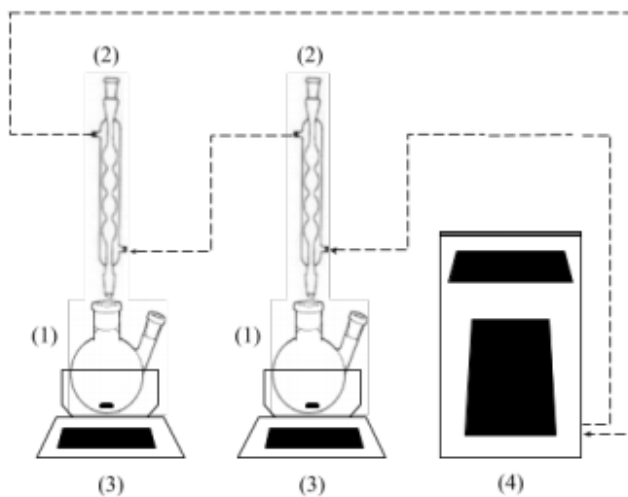
3.2. EQUIPAMENTOS

Para as análises das propriedades das blends de diesel/biodiesel utilizou-se um picnômetro do tipo Gay-Lussac (LABORATORIAL, 2021) para a determinação da densidade e, para a determinação da viscosidade dinâmica, um viscosímetro de Ostwald Cannon-Fenske. Outros equipamentos como balança digital Shimadzu, aquecedor e termômetro também foram utilizados para auxílio na elaboração dos testes. O aparato experimental utilizado neste trabalho é ilustrado pelas Figuras 9, 10 e 11.

A produção do biodiesel foi realizada em reator batelada e seu esquema está representado pela Figura 9 que dispõe os balões de fundo redondo com duas entradas: uma delas foi conectada a um condensador, enquanto a outra foi tampada com uma rolha para evitar a evaporação do etanol. As amostras foram colocadas em reatores associados em série - ligados a um banho ultratermostático SL

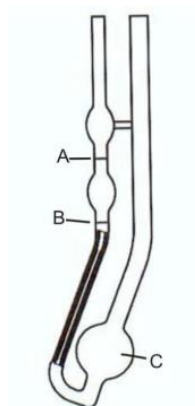
152 da marca Solab, responsável pela circulação de água nos condensadores - e aquecidos em banho maria com controle de temperatura.

Figura 9. Esquema da reação de transesterificação em batelada com o reator (1), condensador (2), agitador magnético com aquecimento (3) e banho ultratermostático (4)



Fonte: Sander (2018)

Figura 10. Viscosímetros Cannon-Fenske utilizado no teste da viscosidade dinâmica



Fonte: Moura (2010)

Figura 11. Picnômetro utilizado no teste da densidade



Fonte: Adaptado de Laboratorial (2021)

3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.3.1. Análise da matéria-prima utilizada na produção do biodiesel

A matéria-prima utilizada para a produção do biodiesel foi o óleo de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.). A escolha foi motivada por seu potencial frente aos benefícios de não competição com a alimentação humana, produzindo um biodiesel de segunda geração, e por ser adaptável às variações edafoclimáticas, ou seja, fatores do meio como o clima, relevo, tipo de solo etc. Além disso, estudos presentes na literatura mostram bons resultados (MOURA, 2010), trazendo a justificativa para analisar as condições reacionais em busca de melhores rendimentos associados às demais variáveis para tornar a produção do JCB economicamente rentável.

O óleo de pinhão manso foi submetido a quatro análises fundamentais para determinar as características físico-químicas da matéria-prima que influenciarão diretamente na qualidade do biodiesel produzido: densidade, viscosidade, índice de refração e índice de acidez. Todos os testes foram realizados em triplicata.

3.3.2. Produção do biodiesel a partir do óleo de pinhão manso

O biodiesel utilizado neste estudo é fruto de pesquisas anteriores (Processo nº 2018/00806-9), com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Para sua obtenção, foram introduzidos 30g do óleo de pinhão manso no reator batelada, seguindo de uma determinada quantidade de etanol para manter a razão molar fixada de 1:6 (óleo:álcool). Ao atingir a estabilidade da temperatura em 40°C, o biocatalisador (lipase Eversa® Transform 2.0) foi inserido em concentrações de 2% e o tempo de reação foi de 6 horas. A Tabela 11 ilustra a distribuição das variáveis reacionais.

Tabela 11 - Condições reacionais para a produção do biodiesel

Variável	Resultado
Temperatura (°C)	40
Tempo de reação (h)	6
Concentração enzimática (m/m) %	2

Fonte: Autor

3.3.3. Caracterização do biodiesel produzido

A caracterização do combustível produzido se deu através da determinação do teor de ésteres etílicos nas amostras, indicando o rendimento da reação. A análise foi feita por cromatografia gasosa (GC), segundo a Norma nº 14103, do Comitê Europeu para Padronizações, e em parceria com a Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da UNESP, no departamento de Química, no Campus de Presidente Prudente.

O cromatógrafo em questão é equipado com detector de ionização de chama (FID), coluna capilar Rtx – WAX e o programa de temperaturas iniciou em 50 °C com rampa de aquecimento de 15 °C / min até 250 °C.

3.3.4. Misturas BX biodiesel/diesel

A partir do diesel comercial e do biodiesel de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) preparou-se blends com uma concentração de 10, 15, 20, 30, 40 e 50% de biodiesel no diesel, além do B100 que corresponde ao biodiesel puro. As misturas foram elaboradas para estudo da densidade e da viscosidade, propriedades estas que são importantes e que afetam o desempenho dos motores diesel. A Tabela 12 ilustra as proporções de biodiesel no diesel para cada mistura.

Tabela 12 - Proporções de biodiesel consideradas nas misturas BX do presente estudo

Misturas BX de diesel/biodiesel	
B10	10% de biodiesel
B15	15% de biodiesel
B20	20% de biodiesel
B30	30% de biodiesel
B40	40% de biodiesel
B50	50% de biodiesel
B100	100% de biodiesel

Fonte: Autor

3.3.5. Determinação da densidade

A densidade dos combustíveis foi determinada em triplicata através do picnômetro do tipo Gay-Lussac de 50 mL para cada amostra das blends. As medições foram realizadas a temperatura ambiente (20°C) com a aferição inicial da massa do picnômetro vazio (m_1) e com água destilada (m_3) por meio da balança digital. Em seguida, uma amostra de cada mistura (m_3) foi obtida também. A densidade foi determinada, então, através da relação entre as massas (Equação 1):

$$\rho_{BX} = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1} \right) \rho_{\text{água}} \quad (1)$$

Sendo ($m_2 - m_1$) a relação que define a massa da mistura BX analisada, ($m_3 - m_1$) a relação que define a massa de água e $\rho_{\text{água}}$ a densidade da água a uma dada temperatura. Os dados da densidade da água foram obtidos através do ANEXO A, conforme a temperatura estabelecida para o teste realizado.

3.3.6. Determinação da viscosidade

A viscosidade dinâmica das amostras das misturas foi obtida por meio do viscosímetro Ostwald Cannon-Fenske, um equipamento que apresenta um capilar ligado a uma pequena

seção expandida que possibilita a medição da resistência do fluido à tensão de cisalhamento. A equação que determina a viscosidade dinâmica de um fluido é dada pela Equação 2:

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (2)$$

Sendo

τ = tensão de cisalhamento;

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (dv/dy) .

O viscosímetro foi introduzido em um béquer com água a uma temperatura determinada e controlada (40°C) em que esperou-se atingir um equilíbrio na temperatura para a realização dos testes. Assim, para cada medição foi colocado uma amostra das blends no viscosímetro e succionada por uma pêra de borracha até imediatamente acima do segundo menisco da seção expandida; em seguida, a pêra é retirada da extremidade do equipamento e o cronômetro é ativado para medir o tempo que o líquido demora para atingir o primeiro menisco que se encontra mais próximo do capilar.

De acordo com Souza (2005), os viscosímetros de capilar são classificados como secundários, medindo a razão da tensão cisalhante e a taxa de deformação indiretamente. Com estes equipamentos, a viscosidade dinâmica é adquirida através da variação de pressão de um escoamento laminar em um tubo. No regime laminar, a velocidade do escoamento no centro do tubo é máxima, enquanto na parede do tubo é nula.

A mistura atravessa o capilar do viscosímetro Ostwald Cannon-Fenske através da ação da gravidade, logo a variação da pressão depende apenas da altura do tubo. A medição da propriedade foi realizada através dos combustíveis misturados (misturas BX de diesel/biodiesel) e com um líquido padrão para complemento da análise, a água. Desta forma, volumes iguais de água e do fluido analisado foram utilizados, relacionando os fluidos através da Equação 3:

$$\eta_{BX} = \eta_{\text{água}} \frac{\rho_{BX} t_{BX}}{\rho_{\text{água}} t_{\text{água}}} \quad (3)$$

Segundo normas de padronização, a medida da viscosidade do fluido sempre deve ser coletada a uma temperatura de 40°C por relacionar-se à temperatura de operação em máquinas no geral (MONTREAL, 2021).

A viscosidade cinemática, por sua vez, com base na metodologia vista na literatura (KANAVELI; ATZEMI; LOIS, 2017a; RAMÍREZ-VERDUZCO et al., 2011) foi determinada a partir da divisão da viscosidade dinâmica pela densidade. Logo, a Equação 4 é dada por:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$

Em que:

η = viscosidade dinâmica;

ρ = densidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE PINHÃO MANSO

As propriedades do óleo mostraram valores condizentes com os obtidos na literatura, todavia o índice de acidez, com um valor encontrado de 6,548 mg KOH/ g óleo, excede os valores ideais que apontam 2 mg KOH/g óleo o limite para um valor ideal para a matéria-prima. Apesar do alto valor observado, a rota alternativa com o uso de enzimas na catálise – como é o caso da lipase Eversa Transform 2.0 usada neste trabalho, contribui para reduzir essa desvantagem à medida que as lipases têm a capacidade de esterificar os ácidos graxos livres (AGL) do meio e convertê-los em ésteres.

A densidade obtida de 911,5 kg/m³ está dentro dos valores encontrados na literatura. Garcia-Muentes et. al. (2018), em estudos feitos sobre as propriedades do óleo de pinhão manso, encontraram valores semelhantes, dentro de um intervalo observado, enquadrando valores máximos de 940 kg/m³ para este óleo (JCO).

Os autores estudaram, também, valores para a viscosidade cinemática de diferentes trabalhos. A viscosidade, que demonstrou valores variados de 28 a 35 mm²/s pela literatura, classificados com grau de viscosidade ISO VG 32, também apresentou outros valores em torno de 36,90 até 52,76 mm²/s. O valor encontrado para o óleo na presente pesquisa foi de 42,75 mm²/s.

O índice de refração é uma propriedade física interessante para analisar a pureza do fluido e está muito atrelado ao grau de saturação das ligações, além de ser afetado por fatores como a oxidação, por exemplo (MOURA, 2010). Os valores encontrados para o óleo de pinhão manso estudado condizem com aqueles observados na literatura (AZEVEDO, 2013; MOURA, 2010).

As propriedades dos óleos são dependentes da sua forma de extração e armazenamento, por isso valores diferentes declarados na literatura também podem justificar-se por estas questões. A elevação encontrada no índice de acidez do óleo pode ser determinado por diversos fatores como, também, condições de manuseio, armazenamento, além de condições ambientais (OKULLO et al., 2012). Uma sugestão para reduzir o índice de acidez é a exploração de pré-tratamentos do óleo.

Os resultados estão apresentados a seguir pela Tabela 13:

Tabela 13 - Propriedades do óleo de *Jatropha curcas* L. a 25°C

Parâmetro Avaliado	Unidade	Resultado
Índice de Acidez	mg KOH/ g óleo	6,548
Viscosidade	mm ² /s	42,750
Índice de Refração	-	1,4692
Densidade	kg/m ³	911,500

Fonte: Autor

4.2. PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Através da produção em lotes (batelada), a conversão de ésteres obtida foi de 88,36% para as condições estabelecidas. A norma europeia (EN 14214) e a brasileira (ANP 07/2008) determinam que a conversão mínima em ésteres metílicos deve atingir 96,5%. Apesar do rendimento encontrado não estar dentro das normas padrões, a porcentagem de ésteres obtida foi consideravelmente boa para uma investigação inicial. Assim, o biodiesel produzido foi estudado mais a fundo para analisar dois parâmetros importantes que influenciam em sua eficiência enquanto combustível: a densidade e a viscosidade.

4.3. ANÁLISE DA DENSIDADE

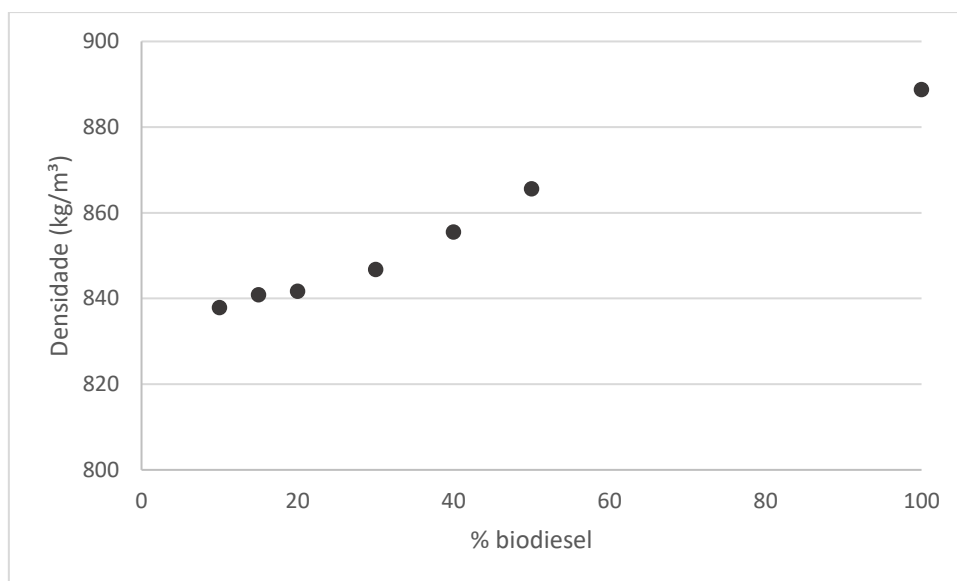
A norma brasileira de padronização do biodiesel estabelece limites de 850-900 kg/m³ para a densidade do combustível a 20°C (VALLE, 2016). Para misturas de diesel/biodiesel, no entanto, a Resolução ANP nº 45/2014, determina os limites de 820-880 (ANP, 2012).

Naturalmente, devido à composição do óleo diesel com a presença de hidrocarbonetos com volatilidades diferentes, a maior densidade do biodiesel é justificada (BENJUMEA; AGUDELO; AGUDELO, 2008). Cabe analisar a proximidade desta propriedade para ambos os combustíveis e a resposta quando misturados. Os valores experimentais obtidos para a densidades estão expostos na Tabela 14:

Tabela 14 - Valores experimentais da densidade para as misturas

BX	Densidade (kg/m³)
B10	837,89
B15	840,88
B20	841,70
B30	846,72
B40	855,51
B50	865,56
B100	888,75

Fonte: Autor

Figura 12. Curva da densidade (kg/m³) em relação a porcentagem de biodiesel nas misturas BX

Fonte: Autor

Os valores verificados se encontram dentro dos limites, porém suas variações a cada acréscimo de 10% em volume são consideravelmente elevadas quando comparadas com a literatura.

De acordo com o expresso no trabalho de Ramírez-Verduzco et. al. (2011), seus resultados experimentais mostraram valores de densidade entre 777,9 kg/cm³ para o diesel puro, ou B0, a 100°C e 886,9 kg/cm³ o B100 a 20°C. Para tanto, os autores obtiveram, a uma

temperatura fixa, um aumento de aproximadamente 1,0062 vezes a cada 10% em volume de biodiesel, o que pode estar alinhado com o tipo de óleo utilizado.

Benjumea & Agudelo & Agudelo (2008) demonstraram que a uma determinada faixa de temperatura não foram obtidas diferenças qualitativas no comportamento dos combustíveis em análises com misturas e com os combustíveis puros. A importância da densidade para o desempenho da atomização é reduzida pelo fato da maioria dos líquidos apresentarem pequenas diferenças nesta propriedade.

Os estudos externos mostram, com isso, uma diferença pequena para os acréscimos em volume de biodiesel nas misturas com diesel. Os valores tendenciosos de aumento da densidade conforme a maior presença de biodiesel no presente trabalho confere o correto desempenho da propriedade. Por estarem dentro dos limites estabelecidos em normas de qualificação, também indicam a certa viabilidade das blends. Por outro lado, a subida da densidade para cada 10% em volume de biodiesel acrescido, do B20 ao B50, foram relativamente elevadas. Não foram encontradas explicações para tal comportamento na literatura, o que traz um maior interesse a uma investigação por meio de novos testes atrelados a outras análises do biodiesel. (ANP, 2012)

4.4. ANÁLISE DA VISCOSIDADE

Os resultados obtidos pela viscosidade dinâmica neste trabalho estão ilustrados na Tabela 15:

Tabela 15 - Viscosidade dinâmica das blends

BX	Viscosidade Dinâmica (cP)
B10	3,01
B15	3,35
B20	3,71
B30	5,51
B40	5,68
B50	6,70
B100	24,84

Fonte: Autor

Joshi & Pegg (2007) analisaram em seu estudo a relação da temperatura com a viscosidade dinâmica. Os resultados mostraram o aumento da viscosidade com a redução da

temperatura. A relação também é expressa no trabalho feito por Azevedo (2013), que indicou a viscosidade como uma propriedade do fluido afetada pela temperatura.

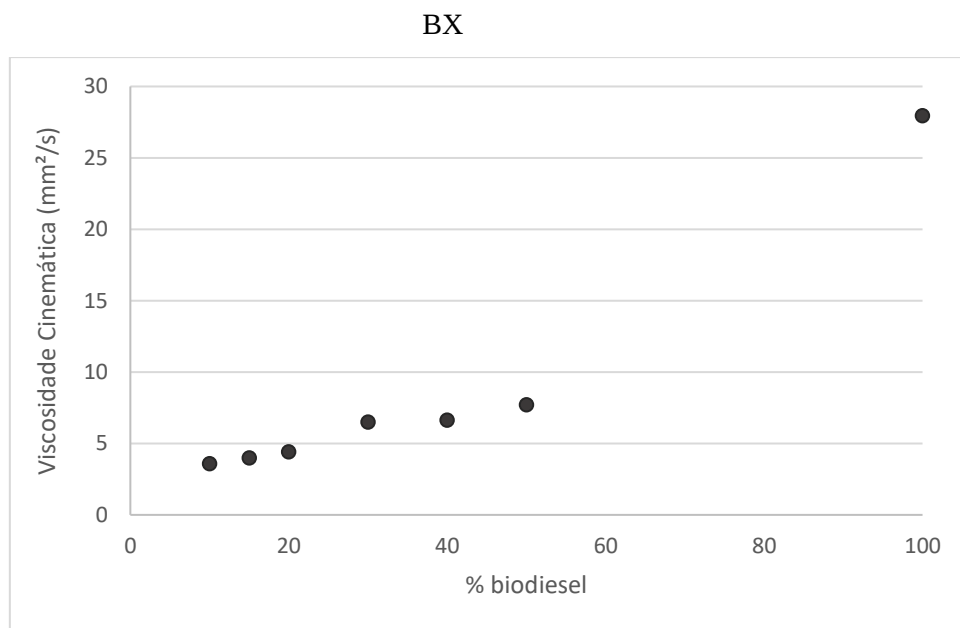
Ramírez-Verduzco et. al. (2011) obtiveram valores de viscosidade dinâmica entre 0,89 e 10,93 mPa.s englobando amostras de biodiesel, diesel e suas blends. Com estes valores os autores chegaram a valores no intervalo de 1,14 a 12,32 mm² /s para a viscosidade cinemática.

Para analisar qualitativamente o combustível e suas misturas frente ao parâmetro de viscosidade cinemática, enquanto a norma ASTM D 6751 estabelece os limites aceitáveis para a viscosidade do biodiesel entre 1,9 e 6 mm²/s, a norma brasileira (ANP) estabelece valores de 3,0 a 6,0 mm²/s (ANP, 2012; LÔBO; FERREIRA; CRUZ, 2009). Por outro lado, para misturas de diesel/biodiesel, a faixa permitida segundo a norma NBR 10441 é de 2,0 - 5,0 mm²/s (ANP, 2012). Os valores encontrados para a viscosidade cinemática, calculada através da Equação (4), estão descritos na Tabela 16.

Tabela 16 - Viscosidade cinemática das misturas BX

BX	Viscosidade Cinemática (mm²/s)
B10	3,59
B15	3,98
B20	4,41
B30	6,51
B40	6,64
B50	7,70
B100	27,95

Fonte: Autor

Figura 13. Curva da viscosidade (mm^2/s) em relação à porcentagem de biodiesel nas misturas

Fonte: Autor

Benjumea & Agudelo & Agudelo (2008) analisaram as curvas do óleo diesel e das misturas (diesel/biodiesel) para verificação da viscosidade cinemática. Os autores identificaram que todas as curvas se assemelharam, além de mostrarem tendências semelhantes com a variação da temperatura.

De acordo com os dados apresentados pela Tabela 16 e pela curva da Figura 13, foi possível observar valores atendendo às expectativas até conteúdos de 20% em volume do JCB. A partir do B30, no entanto, a viscosidade mostrou valores acima do limite máximo permitido pela norma de qualificação das misturas. Para o B100, igualmente; neste caso, o valor de $27,95 \text{ mm}^2/\text{s}$ ultrapassou excessivamente o limite máximo permitido.

Segundo Zuniga et al. (2011), a alta viscosidade dos óleos in natura - que geralmente se utilizam como matéria-prima na produção do biodiesel - é a principal justificativa para seu abandono como combustível alternativo nos motores a diesel. Assim, a viscosidade do biodiesel deve ser inferior àquela do óleo de origem. Os autores comentam, ainda, que os óleos vegetais in natura podem ser até 100 vezes maiores que a do biodiesel (ZUNIGA et al., 2011).

A viscosidade alcançada pelo biodiesel no presente trabalho foi consideravelmente abaixo daquela observada para o óleo de pinhão manso ($42,75 \text{ mm}^2/\text{s}$), no entanto ainda esteve aquém do esperado para a viabilidade do combustível em sua aplicação nos motores a diesel. Como já discutido anteriormente, a viscosidade é uma propriedade que, em valores elevados, conduz a uma atomização ineficiente, com baixa dispersão do combustível na câmara de

combustão. Portanto, as misturas com volumes elevados do biodiesel produzido não são sugestivas à aplicação em motores diesel, mas se assim aplicado, necessitaria de adaptações no motor e acompanhamento de seu desempenho.

Para tentar entender os números da viscosidade obtidos nos testes é preciso se atentar a três importantes fatores: a rota de produção, a conversão dos ésteres e os erros implícitos ao próprio teste da viscosidade.

A produção do biodiesel, já comentada, se deu através de uma rota não convencional, com o uso de um óleo alternativo (*Jatropha curcas* L.) com expressivas quantidades de AGL. O uso da catálise enzimática foi implementado com a sugestão de investigar a atuação da lipase Eversa® Transform 2.0, à medida que o óleo não foi contemplado com o processo de neutralização anterior à reação de transesterificação. Este procedimento adotado contribuiu para uma conversão total investigada de 88,36% de ésteres etílicos, o que pode ter contribuído para os elevados valores da viscosidade.

O teste da viscosidade dinâmica que foi realizado com um aquecedor a fim de manter a temperatura conhecida em 40°C, pode estar associado a erros inerentes ao equipamento utilizado. Assim, equipamentos que melhor atingissem a estabilidade do sistema contribuiriam para resultados mais próximos com àqueles obtidos na literatura

Desta forma, fica expressa a necessidade de investigar mais a fundo, sugestivamente para projetos posteriores, o comportamento da viscosidade com as diferentes misturas, aprimorando a rota de produção do biodiesel - ainda com a utilização do óleo de pinhão manso como matéria-prima e da lipase Eversa® Transform 2.0 como biocatalisador. A neutralização inicial do óleo pode ser uma implementação interessante. O uso de equipamentos auxiliares mais precisos também é importante para uma maior acurácia dos testes.

A configuração (cis ou trans) das duplas ligações possui certa influência na viscosidade, sendo a ligação trans a que contribui para um combustível mais viscoso (CAVALCANTI, 2013). Tal consideração traz a importância, também, de realizar uma análise qualitativa do biodiesel a fim de compreender a composição dos ésteres, bem como analisar sua composição com o arranjo das cadeias carbônicas.

5. CONCLUSÃO

Os valores alcançados nos testes para a densidade estiveram dentro do esperado vis-à-vis os dados analisados na literatura e dentro dos padrões estabelecidos pela norma ANP 45/2014. Os valores encontrados foram 837,89; 840,88; 841,70; 846,72; 855,51; 865,56 e 888,75 kg/m³ para as blendas B10, B15, B20, B30, B40, B50 e B100, respectivamente. Bons valores de densidade garantem vantagem para um bom desempenho no motor a diesel. Já os valores encontrados para a viscosidade cinemática se mostraram condizentes aos valores observados na literatura até o B20. A partir das misturas B30 os valores ultrapassaram o limite máximo estabelecido em norma brasileira, demonstrando sua inviabilidade de aplicação em motor a diesel sem adaptações, visto que comprometeria o processo de atomização, reduzindo a eficiência da combustão. Os valores encontrados neste estudo foram 3,59; 3,98; 4,41; 6,51; 6,64; 7,70 e 27,95 para B10, B15, B20, B30, B40, B50 e B100, respectivamente. A viscosidade é uma propriedade que se apresenta de formas diferentes dependendo da matéria-prima utilizada para a produção do biodiesel e está atrelada às condições do processo de conversão dos ésteres.

Desta forma, os valores mostraram que algum processo na produção do biodiesel não correspondeu às expectativas, justificando a necessidade de maiores pesquisas acima das propriedades estudadas, bem como da produção do biocombustível para viabilizar o uso de matérias-primas alternativas, como o pinhão manso, e o conhecimento de novas enzimas que têm entrado no mercado, mas que possuem ainda poucos estudos, como é o caso da lipase Eversa® Transfom 2.0.

6. TRABALHOS FUTUROS

A grande motivação para dar sequência nesta pesquisa – e que justifica a relevância do trabalho – está na contribuição do biodiesel como combustível no Brasil e no mundo. Viabilizar uma produção com peças-chave, como a matéria-prima e o catalisador, que possam somatizar ao benefício do combustível e sua produção, como a não competição com a alimentação humana, melhoria da rentabilidade, além de parâmetros que deixam a produção mais barata, fortalecem o setor dos biocombustíveis.

Com os resultados obtidos e com a motivação do tema estudado, algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas a seguir:

- Estudo de modelos preditivos para as propriedades fluidodinâmicas (viscosidade e densidade) dos combustíveis e correlações empíricas para estimativa no biodiesel;
- Aplicação do combustível produzido em um motor Diesel.

REFERÊNCIAS

ANP. **RESOLUÇÃO Nº 45, DE 20 DE DEZEMBRO DE 2012**, 2012. Disponível em: <<http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127>>

ANP. **Glossário**. 2020a. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/acesso-a-informacao/glossario>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

ANP. **RESOLUÇÃO ANP Nº 831, DE 7 DE OUTUBRO DE 2020**, 2020. b.

ANP. **RenovaBio**. 2021. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio>>. Acesso em: 2 jun. 2021.

ARAÚJO, F. D. S.; CHAVES, M. H.; ARAÚJO, E. C. E. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE PINHÃO-MANSO (*Jatropha curcas* L.). In: (E. Meio-Norte, Ed.) CONGRESSO INTERNACIONAL DE AGROENERGIA E BIOCMBUSTÍVEIS 2007, Teresina. **Anais...** Teresina

ATADASHI, I. M.; AROUA, M. K.; AZIZ, A. A. High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 1999–2008, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.020>>

AYDIN, F.; KAFADAR, A. B.; ERDOGAN, S.; SAYDUT, A.; KAYA, C.; HAMAMCI, C.; KAFADAR, A. B.; ERDOGAN, S.; SAYDUT, A.; KAYA, C.; HAMAMCI, C. Environmental Effects The Basic Properties of Transesterified Corn Oil and Biodiesel-Diesel Blends The Basic Properties of Transesterified Corn Oil and Biodiesel-Diesel Blends. v. 7036, 2011.

AZEVEDO, C. G. **Desenvolvimento de um sistema compacto de combustão sem chama visível utilizando um injetor blurry para queima de biocombustíveis**. 2013. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

BENJUMEA, P.; AGUDELO, J.; AGUDELO, A. Basic properties of palm oil biodiesel-diesel blends. **Fuel**, v. 87, n. 10–11, p. 2069–2075, 2008.

BRASIL. **LEI Nº 13.576, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2017**, 2018.

BRASIL. **Diário Oficial da União - Seção 1**, 2020.

CAVALCANTI, L. A. P. **REOLOGIA E MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES DE ESCOAMENTO A FRIO DE BODIESEL DE DIVERSAS ORIGENS E SUAS MISTURAS BX**. 2013. Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Ciclos de Potência a Gás. In: **Termodinâmica**. 7. ed.. p. 487–554.

CHHETRI, A. B.; TANGO, M. S.; BUDGE, S. M.; WATTS, K. C.; ISLAM, M. R. Non-edible plant oils as new sources for biodiesel production. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 9, n. 2, p. 169–180, 2008.

E, J.; PHAM, M.; ZHAO, D.; DENG, Y.; LE, D. H.; ZUO, W.; ZHU, H.; LIU, T.; PENG, Q.; ZHANG, Z. Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 620–647, 2017.

EPE. **Plano Nacional de Energia - PNE 2050**, 2020.

EPE. Impacto na saúde humana pelo uso de biocombustíveis na Região Metropolitana de São Paulo. p. 22, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-570/NT-EPE-DPG-SDB-2020-01_NT_Impacto_saude_uso_bios.pdf>

EPE & MME. **Balanço Energético Nacional 2020: Relatório Síntese / Ano Base 2019**, 2020.

FARAH, A. M. **Petróleo e seus Derivados: Definição, constituição, aplicação, especificações e características de qualidade.**, LTC, 2012.

FARIA, M. D. C.; PINTO, R. R. da C.; VALLE, M. L. M. Efeito do Biodiesel na Atomização do Combustível em Motores Diesel de Injeção Direta. 2010.

FAZANI ESTEVES SANCHES, R.; GASPAR NEGRINI YAMASHIRO, M.; LIMA SANTOS, P.; MACHADO TAMBOR, J. H. Biodiesel and the search for a balance between society, environment and healthy. **Revista Eniac Pesquisa**, v. 9, n. 2, p. 345–365, 2020.

GEBREMARIAM, S. N.; MARCHETTI, J. M. Biodiesel production technologies: Review. **AIMS Energy**, v. 5, n. 3, p. 425–457, 2017.

GEBREMARIAM, S. N.; MARCHETTI, J. M. Economics of biodiesel production: Review. **Energy Conversion and Management**, v. 168, n. April, p. 74–84, 2018.

GUARIEIRO, A. L. N. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, NANOPARTÍCULAS EMITIDAS POR MOTOR DIESEL UTILIZANDO MISTURAS BIODIESEL/DIESEL**. 2011. Universidade Federal da Bahia, 2011.

GÜLÜM, M.; BILGIN, A. Measurements and empirical correlations in predicting biodiesel-diesel blends' viscosity and density. **Fuel**, v. 199, n. x, p. 567–577, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.001>>

HAJJARI, M.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; GHANAVATI, H. A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 445–464, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.034>>

HAMZAH, N. H. C.; KHAIRUDDIN, N.; SIDDIQUE, B. M.; HASSAN, M. A. Potential of *Jatropha curcas* L. as biodiesel feedstock in Malaysia: A concise review. **Processes**, v. 8, n. 7, p. 1–11, 2020.

HOANG, A. T. Prediction of the density and viscosity of biodiesel and the influence of biodiesel properties on a diesel engine fuel supply system. **Journal of Marine Engineering and Technology**, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1532734>>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, I. World Energy Outlook 2018. **International Energy Agency**, p. 14, 2018. Disponível em: <www.iea.org/t&c/>

JÚNIOR, C. A. G. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE INJEÇÃO, CONTRAPRESSÃO AMBIENTE E TIPO DE COMBUSTÍVEL NOS PARÂMETROS DA ATOMIZAÇÃO DE UM INJETOR DE INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL HIGH - PRESSURE SWIRL**. 2017. Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

KANAVELI, I.; ATZEMI, M.; LOIS, E. Predicting the viscosity of diesel/biodiesel blends. **Fuel**, v. 199, p. 248–263, 2017. a. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.077>>

KANAVELI, I. P.; ATZEMI, M.; LOIS, E. Predicting the viscosity of diesel/biodiesel blends. **Fuel**, v. 199, p. 248–263, 2017. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.077>>

KO, C. H.; YEH, K. W.; WANG, Y. N.; WU, C. H.; CHANG, F. C.; CHENG, M. H.; LIOU, C. S. Impact of methanol addition strategy on enzymatic transesterification of jatropha oil for biodiesel processing. **Energy**, v. 48, n. 1, p. 375–379, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.042>>

LABORATORIAL. **Laboratorial: Produtos & Serviços para laboratório**. 2021. Disponível em:

<http://www.laboratorialce.com.br/site/index.php?option=com_sobi2&catid=11&limitstart=25>. Acesso em: 20 jul. 2021.

LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. Da. Biodiesel: Parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1596–1608, 2009.

MATTEI, L. F. PROGRAMA NACIONAL PARA PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL NO BRASIL (PNPB): TRAJETÓRIA, SITUAÇÃO ATUAL E DESAFIOS. In: XLVI CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL 2008, Florianópolis, SC. **Anais**. Florianópolis, SC

MEHER, L. C.; VIDYA SAGAR, D.; NAIK, S. N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 3, p. 248–268, 2006.

MME/ANP. **Diário Oficial da União: Despacho ANP nº 351, de 26 de março de 2021.**, 2021.

MME. **RenovaBio**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>>. Acesso em: 2 jun. 2021.

MOFIJUR, M.; SIDDIKI, S. Y. A.; SHUVHO, M. B. A.; DJAVANROODI, F.; FATTAH, I. M. R.; ONG, H. C.; CHOWDHURY, M. A.; MAHLIA, T. M. I. Effect of nanocatalysts on the transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources- A mini-review. **Chemosphere**, v. 270, 2021.

MONTREAL. **Você sabe o que é ISO VG que aparece em nossos rótulos?** 2021.

Disponível em: <<https://oleomontreal.com.br/site/conteudo/37-voce-sabe-o-que-e-iso-vg-que-aparece-em-nossos-.html>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

MOREIRA, B. R. de A.; VIANA, C. R. de A.; CRUZ, V. H.; LOPES, P. R. M.; VIANA, R. da S.; RAMOS, R. A. V. Meta-Analytic Review on Third-Generation Biodiesel. **Bioenergy Research**, 2021.

MOSER, B. R. Biodiesel production, properties, and feedstocks. **In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant**, v. 45, n. 3, p. 229–266, 2009.

MOURA, B. Transesterificação Alcalina de Óleos Vegetais para Produção de Biodiesel: Avaliação Técnica e Econômica. p. 146, 2010.

OKULLO, A.; TEMU, A. K.; OGWOK, P.; NTALIKWA, J. W. Physico-Chemical Properties of Biodiesel from Jatropha and Castor Oils. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 2, n. 1, p. 47–52, 2012. Disponível em:

<<http://www.fox10tv.com/story/35627895/swimming-advisories-issued-for-mobile-bay-perdido-bay>>

PETROBRAS. **ÓLEO DIESEL: Informações técnicas**, 2014.

RAMÍREZ-VERDUZCO, L. F.; GARCÍA-FLORES, B. E.; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, J. E.; DEL RAYO JARAMILLO-JACOB, A. Prediction of the density and viscosity in biodiesel blends at various temperatures. **Fuel**, v. 90, n. 5, p. 1751–1761, 2011.

RAVINDRA, P.; JEGANNATHAN, K. R. **Production of biodiesel using lipase encapsulated in κ -carrageenan**. 2015. Disponível em:
<<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-10822-3>>

REMONATTO, D. **SÍNTESE ENZIMÁTICA DE ÉSTERES DE ÁCIDOS GRAXOS A PARTIR DE DIFERENTES MATÉRIAS GRAXAS UTILIZANDO AS LIPASES EVERSA TRANSFORM E EVERSA TRANSFORM 2.0**. 2017. Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

REZANIA, S.; ORYANI, B.; PARK, J.; HASHEMI, B.; YADAV, K. K.; KWON, E. E.; HUR, J.; CHO, J. Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications. **Energy Conversion and Management**, v. 201, n. July, p. 112155, 2019. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112155>>

REZENDE, M. J. C.; LIMA, A. L. De; SILVA, B. V.; MOTA, C. J. A.; TORRES, E. A.; ROCHA, G. O. Da; CARDOZO, I. M. M.; COSTA, K. P.; GUARIEIRO, L. L. N.; PEREIRA, P. A. P.; MARTINEZ, S.; ANDRADE, J. B. De. Biodiesel: An Overview II. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, p. 1–44, 2021.

RICO, J. A. P.; SAUER, I. L. A review of Brazilian biodiesel experiences. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 513–529, 2015. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.028>>

ROCKEMBACH, C. T.; PACHECO, B. S.; PEREIRA, C. M. P. **ESTUDO DA QUALIDADE DE BIODIESEL DE DIFERENTES MATRIZES POR ANÁLISE DA VISCOSIDADE EX V ENPOS**. 2013..

RUTHERFORD, A. P. Regulatory framework for biofuels in Brazil: history and challenges under the law of the WTO. **Journal of Energy & Natural Resources Law**, v. 34, n. 2, p. 213–238, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/02646811.2016.1147900>>

SALES, R. F.; VITALE, R.; DE LIMA, S. M.; PIMENTEL, M. F.; STRAGEVITCH, L.; FERRER, A. Multivariate statistical process control charts for batch monitoring of transesterification reactions for biodiesel production based on near-infrared spectroscopy. **Computers and Chemical Engineering**, v. 94, p. 343–353, 2016. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.08.013>>

SALINA, F. H.; DE ALMEIDA, I. A.; BITTENCOURT, F. R. RenovaBio Opportunities and Biofuels Outlook in Brazil. In: SAYIGH, A. (Ed.). **Renewable Energy and Sustainable Buildings: Selected Papers from the World Renewable Energy Congress WREC 2018**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 391–399.

SANDER, R. F. **Síntese enzimática heterogênea do biodiesel a partir do óleo de pinhão manso**. Rosana, SP.

SCHAFFNER, R. D. A.; JÚNIOR, E. S.; MARCOS, D.; POZZ, D.; SANTOS, R. F.; NEVES,

A. C. OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIODIESEL DE DIFERENTES ÓLEOS VEGETAIS. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, p. 623–628, 2019.

SILVA, C. C. Da; POLLI, S. A. O programa nacional de produção e uso do biodiesel - PNPB e a atuação da agricultura familiar. p. 3542–3555, 2020.

SOM, S.; AGGARWAL, S. K. ASSESSMENT OF ATOMIZATION MODELS FOR DIESEL ENGINE SIMULATIONS. **Atomization and Sprays**, v. 19, n. 9, p. 885–903, 2009.

TAMILSELVAN, P.; NALLUSAMY, N.; RAJKUMAR, S. A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, n. May, p. 1134–1159, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.176>>

TEIXEIRA, C. V.; COLAÇO, M. J.; CALDEIRA, A. B. Viscosidade e desempenho de misturas diesel / biodiesel em um motor monocilíndrico. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, p. 3–12, 2013.

THANGARAJA, J.; KANNAN, C. Effect of exhaust gas recirculation on advanced diesel combustion and alternate fuels - A review. **Applied Energy**, v. 180, p. 169–184, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.096>>

UBRABIO. **O que é Biodiesel**. 2021. Disponível em: <<https://ubrabio.com.br/o-que-e-biodiesel/>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

VALLE, M. L. M. **Estudo da adição de biodiesel S10 e S500 e seus efeitos nas propriedades do combustível e na atomização**. 2016.

VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S. **Biocombustíveis**. 2012. 6. ed. Rio de Janeiro.

VERMA, P.; SHARMA, M. P.; DWIVEDI, G. Impact of alcohol on biodiesel production and properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 319–333, 2016.

WANCURA, J. H. C. **PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO A LIPASE *Thermomyces lanuginosus* COMO CATALISADOR**. 2017. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 2017.

WU, Y. P. G.; LIN, Y. F.; CHANG, S. H. Emissions study and estimation of carbon dioxide production from jatropha curcas oil biodiesel. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 16, n. 5, p. 1222–1233, 2016.

ZULFIQAR, A.; MUMTAZ, M. W.; MUKHTAR, H.; NAJEEB, J.; IRFAN, A.; AKRAM, S.; TOUQEER, T.; NABI, G. Lipase-PDA-TiO₂ NPs: An emphatic nano-biocatalyst for optimized biodiesel production from Jatropha curcas oil. **Renewable Energy**, v. 169, p. 1026–1037, 2021.

ZUNIGA, A. D. G.; PAULA, M. M.; COIMBRA, J. S. dos R.; MARTINS, E. C. A.; SILVA, D. X. Da; TELIS-ROMERO, J. REVISÃO: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIODIESEL. p. 55–72, 2011.

ANEXO A - Variação da densidade da água com a temperatura

Temperatura (°C)	$\rho_{\text{água}}$ (g/cm³)	Temperatura (°C)	$\rho_{\text{água}}$ (g/cm³)
0	0,99987	17	0,99880
1	0,99993	18	0,99862
2	0,99997	19	0,99843
3	0,99999	20	0,99823
4	1,00000	21	0,99802
5	0,99999	22	0,99782
6	0,99997	23	0,99756
7	0,99993	24	0,99732
8	0,99988	25	0,99707
9	0,99981	26	0,99681
10	0,99973	27	0,99654
11	0,99963	28	0,99626
12	0,99952	29	0,99597
13	0,33340	30	0,99567
14	0,99927	31	0,98813
15	0,99913	32	0,95889
16	0,99897		

Fonte: Azevedo (2013)