

Determinação experimental e aplicação de modelo numérico da densidade e viscosidade de blendas diesel, biodiesel e óleo vegetal

Experimental determination and application of a numerical model of density and viscosity of diesel, biodiesel and vegetable oil blends

Determinación experimental y aplicación de un modelo numérico de densidad y viscosidad de mezclas de diésel, biodiésel y aceite vegetal

Recebido: 22/08/2022 | Revisado: 04/09/2022 | Aceito: 06/09/2022 | Publicado: 15/09/2022

Vitor Ferreira Ocanha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8042-4791>
Universidade Estadual Paulista, Brasil
E-mail: vitor.f.ocanha@gmail.com

Leandro Ferreira-Pinto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0656-9471>
Universidade Estadual Paulista, Brasil
E-mail: leandro.f.pinto@unesp.br

Andreia Fátima Zanette

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2770-2582>
Universidade Estadual Paulista, Brasil
E-mail: andreia.zanette@unesp.br

Resumo

A atual preocupação com o meio ambiente devido a emissões de poluentes originados pela queima de combustíveis fósseis, principal fonte de energia para motores a combustão interna, é um dos principais problemas a serem enfrentados pela humanidade. Sendo assim, a biomassa, fornece de forma alternativa e sustentável, uma solução para a problemática devido a possibilidade de produção de biocombustíveis de fontes renováveis de energia por meio de conversões termoquímicas, como o caso do etanol, biodiesel e óleos vegetais. A utilização de biodiesel e óleos vegetais em motores de combustão interna ciclo diesel pode amenizar as emissões de gases de efeito estufa sem alterar as propriedades físico-químicas do combustível e sem prejudicar o consumo e eficiência da máquina motriz. Com o intuito de provar essa afirmativa, estuda-se neste trabalho a influência das propriedades físico-químicas de diferentes proporções de diesel comercial, biodiesel e óleo de pinhão manso, além da efetividade de métodos numéricos para obtenção de propriedades físico-químicas, como densidade. Foi estudado o comportamento das propriedades físico-químicas de viscosidade e massa específica em diversas concentrações de diesel em mistura com biodiesel (B10 - diesel comercial atual, B20, B40, B60 e B100) e diesel em mistura com óleo de pinhão em proporções de 2, 5, 10 e 20% de óleo em mistura ao diesel. Os resultados identificados são promissores e comprovam a efetividade do modelo numérico aplicado em comparação aos resultados experimentais obtidos, além de obter resultados sobre a vazão de cada mistura de combustível em motores à combustão interna.

Palavras-chave: Biocombustíveis; Blendas de diesel/biodiesel; Blendas de diesel/óleo de pinhão manso; Determinação numérica; Densidade; Viscosidade.

Abstract

The current concern about the environment due to emissions of pollutants from the burning of fossil fuels, the main source of energy for internal combustion engines is one of the main problems to be faced by humanity. As such, biomass provides an alternative and sustainable solution to the problem due to the possibility of producing biofuels from renewable energy sources through thermochemical conversions, such as ethanol, biodiesel and vegetable oils. The use of biodiesel and vegetable oils in diesel cycle internal combustion engines can reduce greenhouse gas emissions without changing the physico-chemical properties of the fuel and without damaging the consumption and efficiency of the engine. In order to prove this, we study the influence of physicochemical properties of different proportions of commercial diesel, biodiesel and Jatropha oil, as well as the effectiveness of numerical methods to obtain physicochemical properties, such as density. It was studied in this college project the behavior of the physicochemical properties of viscosity and specific mass in different concentrations of diesel in mixture with biodiesel (B10 - current commercial diesel, B20, B40, B60 and B100) and diesel in mixture with pinion oil in proportions of 2, 5, 10 and 20% oil in a diesel blend. The results are promising and prove the effectiveness of the applied numerical model in comparison

to the experimental results obtained, besides obtaining results on the flow of each fuel mixture in internal combustion engines.

Keywords: Biofuels; Diesel/biodiesel blends; Diesel/jatropha oil blends; Numerical determination; Density; Viscosity.

Resumen

La preocupación actual por el medio ambiente debido a las emisiones contaminantes provocadas por la quema de combustibles fósiles, principal fuente de energía de los motores de combustión interna, es uno de los principales problemas a los que se enfrenta la humanidad. Así, la biomasa, de forma alternativa y sostenible, aporta una solución al problema por la posibilidad de producir biocombustibles a partir de fuentes de energía renovables mediante conversiones termoquímicas, como es el caso del etanol, biodiesel y aceites vegetales. El uso de biodiésel y aceites vegetales en motores de combustión interna de ciclo diésel puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero sin alterar las propiedades fisicoquímicas del combustible y sin perjudicar el consumo y la eficiencia del motor. Para comprobar esta afirmación, este trabajo estudia la influencia de las propiedades fisicoquímicas de diferentes proporciones de diesel comercial, biodiesel y aceite de jatrofa, además de la efectividad de los métodos numéricos para obtener propiedades fisicoquímicas, como la densidad. Se estudió el comportamiento de las propiedades físico-químicas de viscosidad y masa específica en diferentes concentraciones de diesel mezclado con biodiesel (B10 - diesel comercial actual, B20, B40, B60 y B100) y diesel mezclado con aceite de piñón en proporciones de 2, 5, 10 y 20% de aceite mezclado con diesel. Los resultados identificados son prometedores y prueban la efectividad del modelo numérico aplicado en comparación con los resultados experimentales obtenidos, además de obtener resultados sobre el flujo de cada mezcla combustible en motores de combustión interna.

Palabras clave: Biocombustibles; Mezclas de diesel/biodiesel; Mezclas de diesel/aceite de jatrofa; Determinación numérica; Densidad; Viscosidad.

1. Introdução

Devido ao aumento do consumo de energia no mundo associado ao crescimento da população, é indubitável o esgotamento das reservas de petróleo, o aumento do preço dos combustíveis devido à falta de oferta e grande demanda e legislações ambientais rígidas. Estes são alguns fatores que encorajam a comunidade científica em concentrar pesquisas em energias renováveis (Veljkovic *et al.*, 2016). Desta forma, o biodiesel surgiu como uma viável alternativa aos combustíveis de origem fóssil por apresentar diversas características que o tornam atrativo, como diminuição da emissão de gases tóxicos conforme o acréscimo de seu uso frente aos combustíveis fósseis (Dwivedi, et al., 2013). Segundo, esse combustível é completamente miscível com o óleo diesel, permitindo-se formular misturas desses dois combustíveis em qualquer proporção (Knothe & Steidley, 2007).

Utilizado em misturas com diesel, o biodiesel pode ser aplicado em motores de combustão interna, com a vantagem de não precisar serem feitas alterações do projeto do motor. Contudo, devido às diferenças em sua natureza química, podem resultar mudanças nas propriedades físico-químicas (como número de cetano, ponto de névoa, ponto de entupimento de filtro a frio entre outros), o que pode afetar no funcionamento do motor no que tange o seu desempenho, além das emissões de poluentes (Bilgin *et al.*, 2015). Trabalhos na literatura relatam análises energética e exérgica de diferentes proporções de misturas de diesel e biodiesel de óleo de canola em conjunto moto gerador ciclo diesel nos quais obtiveram importantes resultados (Possa *et al.*, 2021).

Equações de regressão podem ser amplamente utilizadas para prever os valores das propriedades físicas do biodiesel sem que medições experimentais sejam efetuadas. Desta forma, torna-se viável a medição das propriedades físicas do biodiesel em cada proporção de misturas BX ou em temperatura do processo (Cavalcanti, 2016).

A viscosidade é a propriedade mais importante do biodiesel devido ao seu papel em relação ao desempenho do motor. A viscosidade do biodiesel é maior quando comparada à viscosidade do diesel comum, o que pode favorecer a atomização do combustível no injetor, causando um aumento do diâmetro de gotas de combustível lançadas em forma de spray pelo injetor. Contudo, valores altos de viscosidade podem aumentar o diâmetro das gotas e acarretar em uma mistura pobre, prejudicando o sistema de injeção e, conseqüentemente, dificultando o processo de combustão dentro da câmara de combustão do motor por meio de combustões incompletas (Chavarria-hernandez & Pacheco-catalán, 2014). Essa problemática se tornou uma das maiores

preocupações dos fabricantes de motores e, sendo assim, deve-se estudar o comportamento do combustível em relação à viscosidade.

Outra propriedade físico-química muito importante é a densidade. Ao se conhecer os valores de densidade da mistura (diesel puro e biodiesel), pode-se estudar os pontos de otimização para um melhor desempenho da mistura dentro do motor (Prieto *et al.*, 2015).

Óleos vegetais estão sendo estudados para adição ao óleo diesel, como o caso do óleo de pinhão manso. Trata-se de um óleo originado de uma semente não comestível e de alto rendimento, com características passíveis de introdução e formar misturas com o diesel puro. Os benefícios da utilização do pinhão manso são inúmeros, desde ser um combustível alternativo ao diesel, até a ausência de competitividade com o mercado alimentício (Siqueira, et al., n.d.).

Pesquisadores têm se dedicado aos estudos que propõem modelos empíricos e semiempíricos para prever a viscosidade cinemática do biodiesel e das misturas diesel/biodiesel, com base nas temperaturas e adição de solventes. Os modelos para predição da viscosidade do B100 e misturas BX são baseados em modelos semiempíricos a partir de regressões dos dados experimentais associados ao modelo de mistura de Arrhenius ou a partir do método de contribuição de grupos (Cavalcanti, 2016).

O trabalho proposto tem por objetivo a definição de parâmetros físicos e químicos, por meio dos quais se pretende identificar alternativas viáveis para o melhor uso dos biocombustíveis, visando maior inserção dos mesmos no mercado energético brasileiro. Além da caracterização por métodos empíricos de regressão, serão realizadas também caracterizações experimentais e, por fim, comparações entre os métodos de regressão e os métodos experimentais, com o intuito de validar os dois processos.

1.1 Energia de biomassa

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada, cujo potencial energético varia de tipo para tipo, quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos (ANEEL, 2010).

A biomassa é uma fonte de energia de caráter renovável devido ao seu curto prazo cíclico, que vai desde o plantio da matéria-prima (cana-de-açúcar, milho, soja, dendê entre outros) até a colheita e, por fim, à utilização dessa fonte primária de energia para realizar aproveitamento energético, gerando subprodutos visando a produção de energia. Pode ser considerada como uma fonte alternativa de energia devido ao seu grande potencial de inserção no mercado energético, tanto para a geração de eletricidade por meio de ciclos de potência, quanto para a geração de biocombustíveis através de conversões químicas da matéria inicial (ANEEL, 2010).

Pode-se considerar que a biomassa é uma fonte sustentável de energia pois a mesma favorece os três pilares que são a base da sustentabilidade: ambiental, social e econômico. No que diz respeito ao meio ambiente, a utilização da biomassa é favorável devido à ausência do extrativismo, ao plantio de culturas (cana-de-açúcar, angiospermas), à eliminação do dióxido de carbono por meio da fotossíntese realizada por todas as plantas, baixa degradação do solo devido ao seu caráter natural entre outras características.

Sobre o âmbito econômico, a biomassa favorece o mercado interno e as exportações devido à grande compatibilidade do território brasileiro para a produção de tal fonte de energia, além de gerar empregos no meio rural, um dos ramos com maiores índices de desemprego no país. Sobre o âmbito social, este é influenciado pelos outros dois pilares já comentados. A vantagem econômica gerada pela utilização da biomassa, principalmente sobre a geração do meio rural, faz com que a renda *per capita* do cidadão brasileiro aumente e, assim, cresça a qualidade de vida da população inserida no local devido ao seu maior poder de

compra, ou seja, o acesso ao emprego que foi permitido pela inserção da biomassa no local teve suma importância em impactos positivos para a sociedade.

Assim como o âmbito econômico contribui para os benefícios do social, o ambiental também contribui. Podemos afirmar que as reduções dos índices de dióxido de carbono ocasionados pelo processo de fotossíntese das fontes de biomassa presentes na região aumentam a qualidade do ar, diminuindo os riscos com doenças respiratórias e alavancando qualidade de vida da população (ANEEL, 2010).

Em suma, comprova-se que a biomassa, quando utilizada como fonte de energia, traz muitos benefícios tanto para a população quanto para a economia e crescimento tecnológico do país, sendo assim um recurso energético muito bom para ser utilizado como uma alternativa às fontes não renováveis de energia.

1.1.1 Biocombustíveis

Devido à instabilidade dos preços dos barris de petróleo ao decorrer do século XX iniciou-se incentivos para produção de combustíveis por meio de rotas alternativas, os biocombustíveis. Os incentivos e investimentos acabaram concomitantemente com a volta da regularização da fonte de energia não renovável em questão (BIODIESELBR, 2015).

Tais investimentos em biocombustíveis só voltaram a crescer devido às questões ambientais, pois são de origem renovável e possuem caráter sustentável. Os biocombustíveis são oriundos da biomassa através de conversões químicas realizadas, sejam elas pela fermentação, síntese de *Fischer-Tropsch*, transesterificação ou esterificação (BIODIESELBR, 2015).

Segundo a ANP (Agência Nacional do Petróleo) “biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, os combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia”. Os biocombustíveis mais conhecidos são o etanol, biodiesel, biogás e o bioetanol. Todos estes biocombustíveis possuem mais de uma matéria-prima para serem sintetizados, o que demonstra uma vantagem sobre os derivados de petróleo, que possuem apenas uma fonte para serem produzidos (BIODIESELBR, 2015).

Cada biocombustível tem uma funcionalidade e um fim energético diferente, por exemplo, o etanol e o bioetanol são utilizados, em sua grande maioria, como combustíveis para motores de ciclo Otto. O biodiesel é utilizado como combustível para motores ciclo Diesel. O biogás é utilizado na substituição do gás natural e pode ter fins térmicos (abastecimento de gás de cozinha) ou fins mecânicos (combustível para motores ciclo Otto) (BIODIESELBR, 2015). Sendo assim, os biocombustíveis possuem uma importância fundamental no que se refere ao futuro da matriz energética mundial, principalmente através da substituição de combustíveis fósseis utilizados em motores de combustão interna.

1.1.2 Biodiesel

Nos últimos 20 anos surgiram preocupações em relação à poluição ambiental e ao aquecimento global, fortalecendo a busca por soluções alternativas ao consumo do petróleo. Acompanhando essa tendência mundial, o biodiesel foi introduzido na matriz energética brasileira por meio do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), um programa interministerial do Governo Federal cujo objetivo era a implementação da produção e do uso do biodiesel de forma sustentável, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, visando também diminuir a dependência de importação do derivado fóssil, o diesel (ANP, 2016).

O biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis que pode ser produzido a partir de gorduras animais e espécies vegetais como soja, palma, girassol, babaçu, amendoim, mamona, abacate e pinhão-manso (Brito *et al.*, 2020). No Brasil, a soja é a principal matéria-prima utilizada (ANEEL, 2010).

O produto final (biodiesel B100) deve cumprir as especificações físico-químicas determinadas pela ANP para que possa substituir total ou parcialmente o óleo diesel derivado de petróleo em motores ciclo diesel automotivos (de caminhões, tratores,

camionetas, automóveis, etc). No Brasil, o biodiesel puro (B100) é adicionado obrigatoriamente ao diesel de petróleo em proporções de acordo com a legislação em vigor. No trabalho de Cruz e colaboradores (2022) é encontrada uma importante revisão das propriedades físico-químicas de biodieséis originados de diversas fontes de óleos vegetais e animais (Cruz *et al.*, 2022), dados importantes para aprofundar o conhecimento do uso de biodiesel e sua aplicação em motores a ciclo diesel.

Existem inúmeras vantagens e desvantagens da utilização do biodiesel como combustível substituto do óleo diesel. Destacam-se os parâmetros ambientais, como redução na emissão de gases, poluição indireta de rios e culturas, além de fatores que acarretam a produção do mesmo, como gestão de recursos e terras de cultivo.

Com a inserção dos projetos de substituição do óleo diesel por derivados de óleos vegetais no mercado de créditos de carbono, os combustíveis de origem renovável tornam-se substitutos competitivos. Sendo assim, um novo mercado emerge para o fomento da produção dos biocombustíveis, porém, necessita-se de maior quantidade de conhecimento no que tange os efeitos da utilização dessas biomassas em seu ciclo de vida (Costa *et al.*, 2013).

1.1.3 Óleo de pinhão manso

O pinhão manso (*Jatropha curcas L.*) pertencente à família Euphorbiaceae, é uma planta nativa da América tropical, naturalizada em partes tropicais e subtropicais da África e Ásia. Sua distribuição geográfica é bastante vasta devido à sua rusticidade, resistência a longas estiagens, bem como à pragas e doenças, sendo adaptável a condições edafoclimáticas muito variáveis. O fruto de *J. curcas* contém óleo viscoso que pode ser usado na indústria de cosméticos, como substituto do querosene, e na fabricação de sabão e combustível para motores diesel (Santos, 2011).

O pinhão manso é uma planta perene da família das Euforbiáceas particularmente resistente às condições adversas de clima e solo, cujo potencial para produção de biodiesel tem sido considerado. Além da produtividade de grãos por árvore, um dos principais componentes do rendimento de óleo deste cultivo é o teor de óleo nos grãos (Birolli *et al.*, 2015).

Assim como descrito por Santos (2015), o biodiesel é produzido principalmente a partir da reação de transesterificação do óleo com um álcool de cadeia curta em presença de um catalisador alcalino, convertendo os triacilglicerídeos em ésteres, mas outros processos para a produção de biodiesel também são aplicados como a esterificação em que é utilizado óleos com alto teor de acidez, com 3% a 40% de ácidos graxos livres. Nessa reação os ácidos graxos livres são convertidos em ésteres e água (Gebremariam e Marchetti 2018). As principais características físico-químicas do óleo de pinhão manso, como massa específica, viscosidade cinemática e índice de acidez, são relatadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físico-químicas do óleo de pinhão manso.

Característica	Método	Unidade	Valor
Massa específica a 20°C	ASTM D4052	Kg/m ³	914,6
Viscosidade cinemática a 40°C	ASTM D445	cSt	33
Índice de acidez	ASTM D664	mg KOH/g	20,4

Fonte: Santos (2011).

1.2 Motores de Combustão Interna Ciclo Diesel: uma breve história

Dugald Clerk (1854) construiu o primeiro motor de combustão de dois tempos. Em seguida, Gottlieb Daimler, 1885, foi pioneiro na construção de motores de combustão interna de dois tempos para automóveis e introduziu a ignição por centelha nos motores, o que tornou viável a construção dos automóveis anos mais tarde. Barsanti e Matteuci (1857) construíram um motor de pistão livre que operava da seguinte forma: a expansão dos gases da combustão impulsionava o pistão verticalmente para cima e quando o pistão descia, pela ação da gravidade, acionava uma catraca, que por sua vez acionava um eixo.

Os motores de combustão interna são classificados em relação ao ciclo de funcionamento em dois tipos: ciclo Otto e ciclo Diesel. O ciclo de funcionamento é o conjunto de transformações na massa gasosa que ocorre no interior dos cilindros, desde sua admissão, até a eliminação para o meio ambiente.

O ciclo Otto foi descrito por Nikolaus A. Otto (1876) e o ciclo Diesel por Rudolf Diesel (1893). Ambos os ciclos podem ser completados em dois ou quatro cursos do pistão. Quando o motor completa o ciclo em dois cursos do pistão é chamado de motor de dois tempos e quando completa o ciclo em quatro cursos é chamado motor de quatro tempos (Varella, 2010).

Os motores de quatro tempos são assim denominados porque realizam o ciclo em quatro cursos do pistão. O ciclo do motor é composto por quatro fases: admissão, compressão, expansão e descarga (Varella, 2010).

No primeiro curso (admissão) o pistão se desloca do PMS (ponto médio superior) para o PMI (ponto médio inferior). Neste curso ocorre a admissão somente de ar interior do cilindro. Durante a admissão a válvula de admissão está aberta e a válvula de descarga está fechada.

No segundo curso (compressão) o pistão se desloca do PMI para o PMS, onde ocorre a compressão do ar. As válvulas de admissão e descarga estão fechadas. A compressão do ar na câmara de combustão produz elevação da temperatura. No fim da compressão para a relação volumétrica de 18:1, a pressão é de 40-45 kgf/cm² e a temperatura de aproximadamente 800°C. No final da compressão, o combustível é dosado e injetado na câmara de combustão. A medida exata do combustível e o momento da injeção são fatores muito importantes para o bom funcionamento dos motores diesel. A injeção do combustível na câmara de combustão é feita pelo bico injetor. Imediatamente após a injeção, o combustível se inflama devido ao contato com o ar aquecido, iniciando-se a combustão.

No terceiro curso (expansão) o pistão se desloca do PMS para o PMI e ocorre a expansão da mistura ar-combustível. As válvulas de admissão e descarga estão fechadas. A medida que o combustível é injetado, vai se inflamando, aumentando a temperatura dos gases que tendem a se dilatar cada vez mais. Durante a expansão o pistão é acionado pela força de expansão dos gases transformando a energia térmica em mecânica. A força vinda da expansão dos gases é transmitida para a árvore de manivelas, através da biela, promovendo assim o movimento de rotação do motor. A expansão é o único curso que transforma energia. Parte da energia transformada é armazenada na árvore e no volante do motor, sendo consumida durante os outros três cursos.

No quarto curso (descarga) o pistão se desloca do PMI para o PMS e ocorre a descarga dos resíduos da combustão. A válvula de admissão está fechada e a de descarga está aberta. O movimento ascendente do pistão expulsa do cilindro os resíduos da combustão através da válvula de descarga (Varella, 2010).

1.2.1 Empregabilidade de combustíveis em motores ciclo Diesel

Os combustíveis utilizados em motor diesel são o óleo diesel, biodiesel e etanol. Contudo, o óleo diesel é ainda o combustível mais utilizado em motores diesel. O óleo diesel é um derivado da destilação do petróleo bruto constituído basicamente por hidrocarbonetos. É composto principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio. É um produto pouco inflamável, medianamente tóxico, pouco volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico. Recebeu este nome em homenagem ao engenheiro alemão Rudolf Diesel (Varella, 2010).

Desde 1994 a Petrobrás produz dois tipos de óleo diesel rodoviário: metropolitano e interior. O metropolitano, com menor teor de enxofre, é consumido em regiões que necessitam de um óleo com menor emissão de material particulado e que produza ganho ambiental. O diesel interior é consumido nas demais regiões do país. Dentro desses dois tipos existem ainda os seguintes subtipos: óleo diesel aditivado e óleo diesel inverno. O diesel rodoviário metropolitano comercializado atualmente possui, desde maio de 2006, um teor de enxofre de no máximo 0,05% (500 ppm), visando reduzir ainda mais as emissões de

material particulado. No primeiro semestre de 2005 a Petrobrás passou a fornecer o óleo diesel D 500 nas regiões metropolitanas dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais (Petrobrás, 2010). O óleo diesel rodoviário é classificado conforme o teor de enxofre em três classes (Art. 3, Resolução da ANP nº 42): (a) Óleo diesel A S50 e B S50 são os combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 50 mg/kg; (b) Óleo diesel A S500 e B S500 são combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 500 mg/kg; (c) Óleo diesel A S1800 e B S1800.

Em motores à combustão interna, a energia térmica é obtida através da queima do combustível dentro do cilindro do motor. O combustível então deve satisfazer as seguintes características: alta densidade energética, boas características de combustão, alta estabilidade térmica, baixa taxa de depósitos, compatibilidade com a estrutura do motor, boa segurança contra incêndios, baixa toxicidade, baixa poluição, fácil transferência e aplicabilidade de armazenamento interna.

O processo de combustão no cilindro deve tomar a menor quantidade de tempo possível com a maior quantidade de calor liberado durante o período de operação. Longos períodos de operação resultam em depósitos que em combinação com outros produtos da combustão podem causar desgaste excessivo e corrosão do cilindro, pistão e anéis de pistão.

O biodiesel proveniente de fontes não comestíveis como pinhão manso (*Jatropha*), Pongamia, Mahua, Neem dentre outros atendem as requisições acima e podem ser utilizados como alternativa viável para o óleo diesel (Dwivedi *et al.* 2013).

Levantamentos literários revelam que o biodiesel atende uma performance satisfatória durante o período de operação do motor ciclo Diesel e as misturas B20 causam economias similares às do diesel. Devido a sua alta lubrificação, ele acarreta menos danos ao motor e muitos estudos tem reportado a performance e emissões dos motores CI movidos a biodiesel puro (B100) tão bem quanto movidos à mistura BX. Sua natureza oxigenada causa combustões mais completas, o que ocasiona redução de emissão de gases poluentes devido à maior temperatura de combustão (causada pela grande oxigenação do combustível). As misturas de biodiesel/diesel aplicadas a um motor ocasionam performance similar ao diesel puro, assim como as propriedades físico-químicas das misturas BX são similares às do B0. Enquanto o número de cetano, ponto de ignição e lubrificação do biodiesel são maiores, o combustível perde vantagem no que tange ao poder calorífico (Dwivedi e Sharma, 2013).

1.3 Densidade

A densidade é definida como a razão entre a massa de um corpo e seu volume (Oliveira, Filho e Afonso 2013). Tal propriedade pode ser expressa em quilograma por metro cúbico (kg/m^3) ou grama por centímetro cúbico (g/cm^3), conforme Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde: ρ é a densidade, m é massa do sistema e V é o volume do sistema.

A densidade relativa é uma grandeza adimensional definida como a comparação entre o valor de densidade de uma mistura definida como padrão (parâmetro comparativo) com o valor de densidade da amostra a ser analisada (Oliveira *et al.* 2013).

$$\rho_{\text{relativo}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{padrão}}} \quad (2)$$

A densidade também é definida como “uma grandeza física caracterizada pela razão da massa pelo seu volume, sendo dependente da temperatura”. Além disso, o autor destaca que geralmente para substâncias líquidas um aumento da temperatura

está relacionado com um decaimento na densidade. Sua unidade de medida no sistema internacional é quilogramas por metro cúbico (kg/m^3) (Dapieve, 2015).

O efeito da densidade do combustível é a produção de um spray na saída do injetor mais compacto e penetrante, resultando em menores interações com o fluxo de ar durante a atomização. Pode-se concluir que a relação entre a densidade do líquido sobre o tamanho da gota é secundário (Azevedo, 2013).

Em motores de combustão interna, a energia térmica é liberada devido à queima do combustível dentro do cilindro do motor. A combustão de um combustível em um motor acontece rapidamente, contudo, deve-se atentar ao tempo de preparo da mistura ar/combustível, sendo que a mesma depende muito da natureza e composição do líquido inflamável tratado. Devido a esse processo, os combustíveis devem possuir alta densidade energética, isto é, quanto maior for a densidade do combustível, maior será a sua massa à cada unidade de volume, portanto, maior será seu valor energético (Dwivedi *et al.*, 2013).

A densidade pode ser relacionada a diversas outras propriedades, portanto, a mesma torna-se muito importante. O número de cetano, por exemplo, está completamente associado à densidade do combustível. Segundo (Alptekin & Canakci 2008), o número de cetano “é um parâmetro indicativo do tempo de atraso na ignição de combustíveis para motores ciclo diesel, e ao poder calorífico, afetando diretamente o desempenho do motor”. Como os sistemas de injeção de combustíveis são baseados no volume de combustível inserido, alterações na densidade causam efeitos na potência promovida pelo eixo do motor. Além disso, a densidade também afeta a pressão de injeção e conseqüentemente o desempenho e as emissões que o motor exerce (Dapieve, 2015).

1.3.1 Diferenças de densidades que existem entre os óleos combustíveis

Observa-se na Tabela 2 diferentes valores de densidade para diferentes concentrações de biodiesel em mistura com o diesel, em três diferentes fontes de biodiesel: milho, canola e óleo residual de fritura. Verifica-se, portanto, a diferença entre os óleos e suas misturas junto ao diesel, por matéria-prima, em relação à densidade de cada blenda (Tesfa *et al.*, 2010).

Tabela 2. Densidade de diferentes blendas e diferentes tipos de biodiesel.

X B100 (%)	Tipo de Biodiesel – Pexp, kg/m^3		
	Milho	Canola	Óleo de fritura
0	853,36	-	-
5	856,39	854,96	857,48
10	857,94	859,04	857,58
20	859,10	856,97	860,25
50	866,61	865,09	866,68
75	874,10	971,77	875,32
100	879,65	879,35	879,55

Fonte: (Tesfa *et al.*, 2010).

A literatura apresenta diversos trabalhos com os valores da densidade de diferentes fontes de óleo utilizadas como matéria-prima para obtenção do biodiesel, bem como de biodiesel obtido por algumas destas fontes, como pode se observar na Tabela 3.

Tabela 3. Densidade e viscosidade de diferentes biodieseis e diesel.

Matéria-prima	Densidade a 20°C	Viscosidade Cinemática a	Referência
	(g/cm ³)	40°C (cSt)	
Algodão	0,871	3,75	Demirbas, 2007
Babaçu	0,880	4,00	Lima, Silva e Silva, 2007
Canola	0,880	4,34	Alptekin e Canaki, 2008
Girassol	0,863	4,16	Demirbas, 2007
Milho	0,873	3,62	Demirbas, 2007
Pinhão Manso	0,860-0,880	2,35-2,47	Patil e Deng, 2009
Soja	0,865	4,08	Demirbas, 2007
Diesel	0,857	3,17	Tulcán <i>et al.</i> , 2010

Fonte: Adaptada de Dapieve (2015).

1.4 Viscosidade

A viscosidade caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento, isto é, a resistência que um fluido oferece à deformação por cisalhamento. A mesma depende da temperatura e pode ser expressa de duas formas: viscosidade dinâmica ou cinemática (Dapieve, 2015).

A viscosidade cinemática tem sua unidade de medida em centistoke (1cSt = 1 mm²/s) e corresponde à densidade dinâmica dividida pela densidade do fluido (Teixeira, 2010), como mostra a Equação 3:

$$\mu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3)$$

Sendo ρ , densidade; η a viscosidade dinâmica e μ é a viscosidade cinemática.

A viscosidade dinâmica é expressa em unidade de medida centipoise (cP) ou Pascal*segundo (1 Pa*s = 10³ cP) e determina a fricção interna de um fluido. Tal fricção é estudada quando a camada de um fluido é forçada a se mover em relação a outra camada, sendo assim, quanto maior a fricção (tensão de cisalhamento), maior será a força requerida para causar o movimento. É importante observar que quanto maior a tensão de cisalhamento, maior será o valor da viscosidade do fluido (Dapieve, 2015).

A viscosidade dinâmica η pode ser relacionada com a tensão de cisalhamento T (D.cm⁻² – dinas por centímetro quadrado) e a taxa de cisalhamento γ (1.s⁻¹ – 1 sobre segundo) conforme descrito na Equação 4 (Dapieve, 2015):

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4)$$

Segundo Brookfield Eng. Labs (2006), um fluido pode possuir diferentes comportamentos da viscosidade dinâmica em função da taxa de cisalhamento, ou seja, diferentes razões entre tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Quando a viscosidade dinâmica é mantida constante para diferentes taxas de cisalhamento ou quando a relação entre tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento é linear o fluido é dito Newtoniano. A taxa de cisalhamento é dependente da velocidade angular e da geometria do elemento (*spindle*) usado para medir a resistência ao cisalhamento durante a realização do experimento.

Devido a sua alta sensibilidade à variação de temperatura, a viscosidade é a propriedade mais importante em relação a alterações no comportamento de um fluido combustível no processo de atomização. A viscosidade possui relação inversamente

proporcional ao número de Reynolds (parâmetro utilizado para determinar a turbulência do escoamento) e, portanto, a instabilidade do jato de combustível. Sendo assim, o intervalo para desintegração em gotas é diretamente afetado pela viscosidade, além do tamanho das gotas que são dispersadas pelo spray. Altas viscosidades causam o aumento do tamanho das gotas dispersadas pelo spray. Além desse fator específico, a viscosidade influencia no comprimento da folha de líquido não perturbada, penetração do jato, impedimento de formação de ondas e redução de turbulência (Azevedo, 2013).

Qualquer aumento da viscosidade provoca um aumento do diâmetro médio das gotas, o que pode ser atribuído ao aumento das forças viscosas, que tendem a opor-se à desintegração da coluna de líquido em gotas, tanto no processo de atomização primária como secundária (Azevedo, 2013; Lorenzetto & Lefebvre, 1977).

Durante a utilização de um combustível em um motor ciclo diesel, a viscosidade exerce uma forte influência sobre a forma que o combustível assume quando é pulverizado na câmara de combustão e nas propriedades lubrificantes do combustível. (Dapieve, 2015). Viscosidades maiores podem ter efeitos positivos, porém altos valores de viscosidade podem provocar a atomização pobre, como consequência disso, gotas grandes e alta penetração do jato de combustível na câmara de combustão, dificultando a mistura do combustível com o ar, o que acarreta em combustões ineficientes e indesejadas devido à perda de potência e desperdício de combustível. Porém, ao passo que o combustível apresenta viscosidades baixas, a mesma pode colaborar com o desgaste dos componentes do sistema de injeção, além de prejudicar sua pulverização, dificultando a penetração do jato de combustível, não inserindo combustível suficiente na câmara de combustão. Como consequência, ocorre a redução de potência, seguida pela perda de eficiência do motor e aumentando as emissões de poluentes ((Alptekin & Canakci, 2008; Teixeira, 2010).

O aumento de temperatura acarreta na diminuição do valor da viscosidade (Shames, 1999). Conforme o sentido de proporção, uma queda na temperatura implica em um aumento da viscosidade. Nesse sentido, mudanças nas propriedades associadas aos combustíveis podem ser avaliadas por meio do estudo do comportamento da viscosidade dinâmica em termos da temperatura (Dapieve, 2015).

O comprimento da cadeia de hidrocarbonetos do biodiesel exerce influência direta em sua viscosidade, superior do que sua saturação, onde cadeias mais longas aumentam os níveis de viscosidade e que ao comparar ésteres de igual comprimento, a presença de ácidos graxos insaturados na matéria-prima melhora as propriedades de fluidez dos ésteres, diminuindo a viscosidade (Knothe & Steidley, 2007, Oliveira *et al.*, 2013).

1.4.1 Diferenças de viscosidades que existem entre os óleos combustíveis

Observa-se pela Tabela 4 os valores de viscosidade obtidos por meio de diferentes concentrações de mistura entre o diesel e o biodiesel, por diferentes matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel. Na Tabela 3 são observados os valores encontrados na literatura de viscosidade para diferentes tipos de matéria-prima para obtenção de biodiesel.

Tabela 4. Viscosidade cinemática de diferentes blendas e diferentes tipos de biodiesel, em cSt.

X B100 (%)	Tipo de Biodiesel		
	Milho	Canola	Óleo de fritura
0	3,50	3,50	3,50
5	3,80	3,76	3,87
10	3,74	3,90	3,77
20	3,72	4,08	3,95
50	4,35	4,47	4,30
75	4,54	4,62	4,85
100	4,89	5,48	5,21

Fonte: Tesfa *et al.*, (2010).

1.5 Resoluções ANP sobre determinações de densidade e viscosidade

A Resolução ANP N° 50, de 23 de dezembro de 2013 e Resolução ANP N° 45 de 25 de agosto de 2014, estabelecem a utilização da norma NBR 14065 - Destilados de petróleo e óleos viscosos - Determinação da massa específica e da densidade relativa pelo densímetro digital ou ASTM D4052 - *Density and Relative Density of liquids by Digital Density Meter* para determinação da densidade do óleo diesel e do biodiesel. Estas resoluções fixam os limites de 0,815 a 0,85 g/cm³ para o óleo diesel tipo A ou B S10, 0,815 a 0,865 g/cm³ para o óleo diesel tipo A ou B S500 e 0,85 a 0,9 g/cm³ para o biodiesel, na temperatura de 20°C.

A Resolução ANP N° 50 de 23 de dezembro de 2013 e Resolução ANP N° 45 de 25 de agosto de 2014 estabelecem especificação para a viscosidade cinemática a 40°C de 2 a 4,5 cSt para o diesel tipo A ou B S10, 2 a 5 cSt para o diesel tipo A ou B S500 e 3 a 6 cSt para o biodiesel.

1.6 Método numérico de contribuição de grupos para obtenção de densidade e viscosidade

O método de contribuição de grupos consiste em modelos numéricos que requerem apenas a estrutura química dos compostos para calcular as propriedades de densidade e viscosidade do fluido. Com isso, é possível estender as teorias de um fluido relativamente simples a misturas mais complexas. Segundo Silva e colaboradores (2020), a contribuição de grupos é uma boa aproximação, no entanto, deve-se trabalhar com cautela, pois a suposição inerente de aditividade das propriedades não é totalmente correta (Silva *et al.*, 2020).

Para Reis e colaboradores (2013) as propriedades fluidodinâmicas podem ser estimadas através de interpolação entre os valores dos componentes puros, no caso, B0 e B100. Para satisfazer essa afirmação, aplicou-se o modelo de Grunberg-Nissan (Equação 5):

$$\ln\Phi(T, x) = \sum_{i=1}^n x_i \ln\Phi_i(T) + \sum_{i \neq j}^n x_i x_j G_{ij}(T) \quad (5)$$

Sendo Φ a propriedade fluidodinâmica média da mistura de líquidos; Φ_i é a propriedade fluidodinâmica do componente i puro; x_i e x_j são as frações volumétricas dos componentes da mistura; G_{ij} é o parâmetro de interação e n é o número de componentes. Desprezando-se as iterações, obtemos (Equação 6):

$$\ln\Phi(T, x) = \sum_{i=1}^n x_i \ln\Phi_i(T) \quad (6)$$

Considerando hipoteticamente que as misturas BX possuem comportamento ideal, podemos utilizar a Equação 6 para avaliar os valores de viscosidade e massa específica em uma determinada temperatura.

$$\ln v_{mist}(x_{bi}, T) = x_{b100} \ln v_{b100}(T) + (1 - x_{b100}) \ln v_D(T) \quad (7)$$

$$\ln \rho_{mist}(x_{bi}, T) = x_{b100} \ln \rho_{b100}(T) + (1 - x_{b100}) \ln \rho_D(T) \quad (8)$$

As Equações 7 e 8 representam o cálculo preditivo das misturas BX para viscosidade (Equação 7) e densidade (Equação 8). Para tanto, devemos obter a densidade do composto B100 e B0 (diesel puro) através da Equação 9:

$$\rho(T) = A_L + B_L \quad (9)$$

Sendo A_L e B_L os parâmetros obtidos pelo modelo de Liew (REID *et al.*, 1987) e T é a temperatura.

2. Material e Métodos

Para realizar as atividades propostas pelo trabalho foi elaborado um cronograma de atividades para a realização das medidas experimentais de viscosidade e densidade. Também foram avaliados os resultados obtidos por aplicação de modelo numérico juntamente aos dados experimentais presentes nas referências utilizadas como instrumento de avaliação dos dados obtidos pelo autor.

Para a realização dos testes foi utilizado diesel comercial I obtido na rede de abastecimento local. O biodiesel (60% de óleo de soja e 40% de gordura animal) foi obtido por empresas produtoras e o óleo de pinhão manso foi doado pela Embrapa Agroenergia. Salienta-se que o diesel comercial já possui uma proporção de 10% de biodiesel, conforme legislação vigente.

Foram realizadas as caracterizações físico-químicas de densidade e viscosidade para misturas de biodiesel e diesel (BX) nas proporções de 10, 20, 40, 60 e 100% de biodiesel em mistura com diesel comercial, além das análises de densidade e viscosidade de misturas de diesel e óleo de pinhão manso (DOX) nas proporções 2, 5, 10 e 20%.

2.1 Aplicações do método numérico para determinação da densidade

Foi utilizado o método da contribuição de grupos para realizar a predição das propriedades físico-químicas de densidade. Desta forma, tanto a estrutura molecular dos componentes misturados, quanto a influência da temperatura e pressão serão considerados para a análise dos dados, seguindo os padrões e normas estabelecidos para métodos numéricos de medição citados por Cavalcanti (2016).

O método da contribuição de grupos possui como metodologia a estimação de propriedades físico-químicas por meio de interpolação entre os valores dos componentes puros, no caso, diesel e biodiesel. Para tanto, foi utilizada a Equação 10, que atende por modelo de Grunberg-Nissan.

$$\ln \Phi(T, x) = \sum_{i=1}^n x_i \ln \Phi_i(T) + \sum_{i \neq j}^n \sum x_i x_j G_{ij}(T) \quad (10)$$

Sendo Φ a propriedade fluidodinâmica média da mistura de líquidos; Φ_i é a propriedade fluidodinâmica do componente i puro; x_i e x_j a fração volumétrica dos componentes da mistura; G_{ij} é o parâmetro de interação e n é o número de componentes. Desprezando-se as iterações, obtemos:

$$\ln \Phi(T, x) = \sum_{i=1}^n x_i \ln \Phi_i(T) \quad (11)$$

As misturas analisadas foram consideradas como misturas de comportamento ideal. Desta forma, pode-se generalizar a Equação 11 para as concentrações que foram utilizadas nas misturas de cada componente. A Equação 12 e 13 expressa a lógica fundamentada do modelo (Cavalcanti, 2016).

$$\ln v_{mist}(x_{bi}, T) = x_{b100} \ln v_{b100}(T) + (1 - x_{b100}) \ln v_D(T) \quad (12)$$

$$\ln \rho_{mist}(x_{bi}, T) = x_{b100} \ln \rho_{b100}(T) + (1 - x_{b100}) \ln \rho_D(T) \quad (13)$$

As equações 12 e 13 representam o cálculo preditivo das misturas BX para viscosidade (Eq. 12) e densidade (Eq. 13). Para tanto, devemos obter a densidade do composto B100 e B0 (diesel puro) por meio da Equação 14:

$$\rho(T) = A_L + B_L T \quad (14)$$

Sendo A_L e B_L os parâmetros obtidos pelo modelo e T é a temperatura (Reid *et al*, 1987).

2.2 Método experimental

Para a realização das misturas (*blendas*) para as concentrações previamente estabelecidas foi utilizada vidraria em geral, como provetas, pipetas, frascos de armazenamento e um agitador magnético para garantir a homogeneidade dos combustíveis. As concentrações das misturas de diesel e biodiesel e diesel e óleo de pinhão manso foram as mesmas analisadas em todos os experimentos.

2.2.1 Densidade

Para realizar as medições de densidade das diferentes concentrações de combustível foi utilizada a técnica de picnometria tipo Gay-Lussac. Para a medição da massa dos picnômetros foi utilizada uma balança digital modelo AUW220, marca SHIMATZU, termômetro digital para monitorar a temperatura de operação, funil e béquer. Todas as medições foram feitas com os picnômetros vazios e cheios de combustíveis e água destilada, higienizando-os entre as medições.

Para a obtenção da massa de combustível e da água foi usada a seguinte relação (Equação 15):

$$m_{comb.} = m_{cheio} - m_{vazio} , m_{H2O} = m_{cheio} - m_{vazio} \quad (15)$$

Para obter a densidade do líquido em questão, deve-se respeitar a Equação 16:

$$\rho_{comb.} = \frac{m_{comb.}}{m_{H2O}} \rho_{H2O} \quad (16)$$

Para obter o valor de ρ_{H2O} conforme a variação de temperatura utilizou-se dados da literatura para minimizar os erros de medição indireta. As medidas em laboratório foram realizadas a 28°C, portanto, o valor utilizado para o cálculo da densidade foi o de $\rho = 0,99626 \text{ g/cm}^3$.

2.2.2 Viscosidade

Foram obtidos valores de viscosidade dinâmica por meio do viscosímetro de Ostwald Cannon, com unidade de medida em centipoises (cP). O aparato possui geometria em forma de U e contém um reservatório para líquidos, um tubo capilar e uma

expansão para o tubo. Inicialmente, o viscosímetro foi colocado em um béquer com água a fim de monitorar a temperatura do sistema. A posição do viscosímetro foi padronizada para todas as medições. Por conseguinte, foi realizado o procedimento para todas as misturas propostas para análise. Os experimentos foram realizados em duplicata para cada blenda.

No intervalo entre as medições, o instrumento foi higienizado e seco para que pudessem ser feitas novas leituras. Foi calculado o tempo no qual a água destilada toma para percorrer todo o trajeto citado acima e o cálculo da viscosidade é dado pela Equação 17.

$$\eta_{liquido} = \eta_{agua} \frac{\rho_{liquido} t_{liquido}}{\rho_{agua} t_{agua}} \quad (17)$$

Portanto, para calcular a viscosidade dinâmica do fluido, primeiramente, devemos calcular a densidade do mesmo.

3. Resultados e Discussões

3.1 Resultados experimentais da densidade

Os resultados obtidos experimentalmente para densidade das blends de biodiesel/diesel nas proporções B10, B20, B40 estão listados na Tabela 5. É possível observar que um aumento na proporção de diesel/biodiesel leva a um aumento na densidade, como o esperado. Os resultados de densidade para a mistura B100 foram comparados com outras referências bibliográficas que foram demonstradas na Tabela 3. Nota-se a semelhança dos dados da literatura às aferições realizadas neste trabalho da mistura B100, além da mesma respeitar a resolução ANP N° 50, de 23 de dezembro de 2013 e Resolução ANP N° 45 de 25 de agosto de 2014. É importante mencionar que a fornecedora do biodiesel garantiu a proporção de 60% de óleo de soja e 40% de sebo bovino para a produção de seu biodiesel.

Tabela 5. Resultados das densidades obtidos experimentalmente

Blendas	ρ (g/cm ³)
Diesel (fornecedor local)	0,872
B10	0,839
B20	0,841
B40	0,849
B60	0,854
B100	0,872

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se pela Tabela 6 a comparação entre os resultados obtidos de densidade para a mistura B10, B20 e B40 deste trabalho e dos dados reportados por Cavalcanti (2016). A pequena variação entre as duas medições pode ser explicada pela matéria-prima do biodiesel utilizado na mistura. Cavalcanti (2016) utilizou biodiesel com proporções de 50% de sebo bovino e 50% de óleo de soja, enquanto o biocombustível da fornecedora utilizado neste trabalho detém cerca de 40% de sebo bovino e 60% de óleo vegetal. No entanto, ambos os dados estão em conformidade com a resolução ANP vigente, portanto, podemos confirmar a precisão e exatidão do método utilizado, dando confiabilidade ao valor medido.

Tabela 6. Comparação entre valores de densidade autor x literatura.

Mistura BX	Cavalcanti, 2016	Neste trabalho
ρ B10 (g/cm ³)	0,837	0,839
ρ B20 (g/cm ³)	0,841	0,841
ρ B40 (g/cm ³)	0,848	0,849

Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim como na análise da mistura B40, o percentual de variação dos resultados obtidos neste trabalho foi semelhante em relação aos resultados da literatura. Os resultados enquadram-se nas regras estabelecidas pela ANP N° 50, de 23 de dezembro de 2013 e Resolução ANP N° 45 de 25 de agosto de 2014, portanto, os resultados podem ser validados perante à sua conformidade com a norma, além da baixa variação para com outras referências que utilizaram outros métodos para obtenção do resultado de massa específica.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos de densidade para as blendas de diesel/óleo de pinhão manso nas proporções DO2, DO5, DO10 e DO20 (2, 5, 10 e 20%, respectivamente) e para o óleo de pinhão manso puro. Observa-se que, ao aumentar a proporção de óleo no diesel, ocorre um aumento na densidade da mistura.

Tabela 7. Resultados das densidades obtidos experimentalmente para pinhão manso.

Blendas	ρ (g/cm ³)
DO2	0,840
DO5	0,842
DO10	0,846
DO20	0,853
Óleo PM Puro	0,912

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pode-se perceber que o aumento da densidade acontece ao passo que aumenta-se a concentração de óleo de pinhão manso na mistura. A explicação para este fato é de que a densidade do pinhão manso é superior à do óleo diesel, portanto, ao passo que aumenta-se a concentração de óleo de pinhão manso, a densidade da mistura sofre o mesmo efeito. Altas densidades podem favorecer a densidade energética da mistura, uma vez que a mesma está atrelado à composição da mistura; se a blenda apresentar uma maior quantidade de massa por unidade de volume, conseqüentemente haverá maior densidade energética no sistema.

Sendo assim, até 20% de óleo em mistura (máxima concentração utilizada pelo autor), o combustível mostrou-se em conformidade com as normas e legislações estabelecidas pela ANP para densidade de combustíveis em motores CI ciclo diesel.

3.2 Resultados da densidade por aplicação de modelo

Ao aplicar o cálculo das densidades via modelo de regressão linear, entender a lógica das equações propostas é primordial. Assim, adaptando a equação em termos de concentração de biodiesel na mistura, obtém-se a Equação 18.

$$\rho_{mist}(x_{b100}) = A_i + B_i[x_{b100}] \quad (18)$$

Para tanto, os valores de A e B podem ser representados pelas equações 19 e 20, respectivamente.

$$A_i = C_i + \frac{D_i}{T} \quad (19)$$

$$B_i = E_i + \frac{F_i}{T} \quad (20)$$

Sendo assim, obtém-se a Equação 21, que será a base para os cálculos via regressão linear para densidade.

$$\rho_{mist}(x_{b100}, T) = C_i + \frac{D_i}{T} + (E_i + \frac{F_i}{T})x_{b100} \quad (21)$$

A Tabela 8 mostra os parâmetros C, D, E e F para o modelo proposto, equalizados para 3 diferentes tipos de matéria-prima (sebo bovino, soja e algodão).

Tabela 8. Valores obtidos para C, D, E e F.

Biodiesel	C_i (kg/m ³)	D_i (kg/m ³)	E_i (kg/m ³)	F_i (kgK/m ³)
Sebo/soja/algodão	590,39	72.284,81	32,45	2.627,04

Fonte: Cavalcanti (2016).

Os parâmetros do modelo foram aplicados nos dados do trabalho pela aplicação do método de contribuição de grupos. Os resultados estão descritos na Tabela 9, com dados importantes e congruentes com os obtidos experimentalmente.

Tabela 9. Dados obtidos através do modelo numérico.

Misturas BX	x_{b100}	ρ (kg/m ³)	ρ (g/cm ³)
B10	0,1	834,660	0,835
B20	0,2	838,774	0,839
B40	0,4	847,010	0,847
B60	0,6	855,246	0,855
B100	1,0	871,717	0,872

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Tabela 10 é apresentada uma comparação entre os dados de densidade obtidos pelo método numérico, experimental e a literatura. Assim como o esperado, o método numérico mostrou-se efetivo perante aos resultados experimentais coletados pelo autor. A variação foi menor que 0,8% entre os aceitáveis 5%. Em todos os casos, os resultados mostraram-se uniformemente distribuídos em torno da origem, concluindo que o modelo é válido para cálculo de massa específica.

Tabela 10. Comparação do método numérico com a literatura.

Misturas	Método numérico	Experimental	Literatura *
BX	ρ (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)
B10	0,835	0,839	0,837
B20	0,839	0,841	0,841
B40	0,847	0,849	0,848
B60	0,855	0,854	-
B100	0,872	0,872	0,871

Fonte: Cavalcanti (2016).

O modelo numérico atendeu às expectativas e mostrou-se eficiente na determinação de valores de massa específica para diversas misturas de biodiesel ao diesel puro, obtendo variação percentual menor que 3% frente aos dados obtidos na literatura. Desse modo, pode-se afirmar que os modelos preditivos para densidade podem ser utilizados para obter resultados de propriedades fluidodinâmicas (massa específica), sem a necessidade de realizar diversas medições experimentais nos combustíveis.

3.3 Viscosidade

Os resultados obtidos experimentalmente pelo autor para viscosidade dinâmica e cinemática das blendas de diesel comercial e biodiesel de óleo de pinhão manso, nas proporções B10, B20, B40, B60 e B100 estão listados na Tabela 11. É possível observar um aumento na viscosidade com o aumento da proporção de biodiesel no diesel.

Tabela 11. Resultados das viscosidades obtidos experimentalmente das misturas de diesel x biodiesel de PM.

Blendas	η (cP)	μ (cSt)
B10	2,939	3,501
B20	3,195	3,799
B40	3,512	4,137
B60	3,578	4,187
B100	4,803	5,511

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Tabela 12 compara os resultados obtidos por Cavalcanti (2016) para a propriedade físico-química de viscosidade cinemática, em cSt (centistokes), com os resultados obtidos neste trabalho. A variação entre os valores pode ser explicada mediante a diferença de temperatura entre as medições realizadas e equipamento utilizado. Contudo, o valor obtido pelo autor enquadra-se nas normas estabelecidas pela ANP.

Tabela 12. Comparação autor x literatura para a viscosidade cinemática.

Misturas BX	Elaborado pelo autor	Cavalcanti (2016)
μ (cSt) B100	5,511	6,300
μ (cSt) B40	4,600	4,140
μ (cSt) B20	3,799	4,000
μ (cSt) B10	3,501	3,700

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados obtidos experimentalmente pelo autor para viscosidade dinâmica e cinemática das blendas de diesel comercial e óleo de pinhão manso, nas proporções DO2, DO5, DO10 e DO20 estão listados na Tabela 13. Como esperado, um aumento na proporção de óleo no diesel ocasiona um aumento no valor de viscosidade.

Tabela 13. Resultados das viscosidades obtidas experimentalmente.

Blendas	η (cP)	μ (cSt)
DO2	2,974	3,540
DO5	3,227	3,834
DO10	3,438	4,066
DO20	4,443	5,208
Óleo de PM Puro	50,810	55,700

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pode-se perceber que o aumento da viscosidade acontece concomitantemente ao aumento da concentração de óleo de pinhão manso na mistura. Isto deve-se ao fato da viscosidade do pinhão manso ser muito superior à viscosidade do óleo diesel. Portanto, ao passo que aumenta-se a concentração de óleo de pinhão manso, a viscosidade da mistura aumenta exponencialmente, o que pode ser bom na atomização do combustível ou ruim (o aumento da viscosidade causa melhor atomização, porém, viscosidades altas podem prejudicar a superfície de contato das bolhas ejetadas pelo spray, prejudicando a atomização do combustível) (Azevedo, 2013). Sendo assim, até 20% de óleo em mistura (máxima concentração utilizada pelo autor), o combustível mostrou-se em conformidade com as normas e legislações estabelecidas pela ANP para viscosidade de combustíveis em motores CI ciclo diesel.

4. Conclusão

As blendas que obtiveram melhores resultados para vazão de combustível, seguindo a metodologia estabelecida pelo autor com base em referências na literatura foram, respectivamente: B60, DO10, DO20, B100, B40, DO5, B20, DO2. A metodologia utilizada experimentalmente para caracterização de propriedades físico-químicas (densidade e viscosidade) foram precisas quando comparadas à literatura existente e ao modelo numérico aplicado, acarretando na validação da mesma para quantificação de massa específica e viscosidade.

Os modelos numéricos propostos para viscosidade cinemática e massa específica do diesel comercial, biodiesel e suas misturas apresentaram incerteza perante aos valores obtidos na literatura, porém, as variações foram mínimas e enquadram-se na margem aceitável de erros para caracterizações físico-químicas diante das normas estabelecidas pela ANP. Como consequência, pode-se afirmar que os modelos preditivos utilizados para obtenção de resultados de propriedades fluidodinâmicas sem a necessidade de realizar diversas medições são formas rápidas, econômicas, isto é, não demandam gastos monetários e são seguras para obtenção de dados.

Conclui-se que os biocombustíveis estudados obtiveram boas relações em mistura com os combustíveis fósseis empregados atualmente e sua maior utilização dos mesmos na matriz energética brasileira é viável ao visar diversidade, confiabilidade e independência perante aos combustíveis fósseis e ao mercado mundial de petróleo atual. A inserção de combustíveis alternativos aumenta a gama de indústrias de refino e, conseqüentemente, novas oportunidades de mercado de trabalho no Brasil e no mundo, além da contribuição para o avanço tecnológico, diminuição de gases de efeito estufa e incentivo à agricultura por meio da biomassa.

Sugere-se para trabalhos futuros o uso das blendas deste estudo em um motor ciclo diesel afim de avaliar o rendimento e consumo do combustível. Também sugere-se realizar testes com outras fontes de óleo, como por exemplo, óleo de abacate, óleo residual de frigoríficos de frango, entre outros.

Referências

- Alptekin, E., & Canakci, M. (2008). Determination of the Density and the Viscosities of Biodiesel – Diesel Fuel Blends. *Renewable Energy*, 33:2623–30.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Fontes renováveis: biomassa. (2010). <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>.
- ANP. Agência Nacional de Petróleo. BIODIESEL. (2016). <<http://www.anp.gov.br/component/content/article/63-dados-estatisticos/789-producao-de-biodiesel>>.
- ANP. Agência Nacional de Petróleo. RESOLUÇÃO ANP Nº 50, DE 23.12.2013 - DOU 24.12.2013. (2013). <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2013/dezembro&item=ramp-50--2013>>.
- Azevedo, C. G. (2013). Desenvolvimento De Um Sistema Compacto De Combustão Sem Chama Visível Utilizando Um Injetor Blurry Para Queima De Biocombustíveis. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/combustão e Propulsão, Inpe, São José dos Campos.
- Bilgin, A., Gülüm, M., Koyuncuoglu, İ., Nac, E., & Cakmak, A. (2015). Determination of Transesterification Reaction Parameters Giving the Lowest Viscosity Waste Cooking Oil Biodiesel. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195:2492–2500.
- Birolli, W. G., Ferreira, I. M., Alvarenga, N., Santos, D. A., Matos, I. L., Comasseto, J. V., & Porto, A. L. M. (2015). Biocatalysis and Biotransformation in Brazil : An Overview. *Biotechnol Adv*. 33:481–510.
- Brito, M. R., Outa, R., Chavarette, F. R., Gonçalves, A. C., Albuquerque, M. C. F., & Miranda, R. S. (2020). Analysis of the properties of biodiesel from avocado pulp as a lubricant: pin on disk test. *Research, Society and Development*, 9(7):1-18, e136973886.
- Cavalcanti, L. A. P. (2016). Modelos De Regressão Aplicados para Predição das Propriedades Físicas das Misturas do Biodiesel de Sebo Bovino com o Diesel. *Revista CIATEC – UFP*, vol.8 (2), p.p.22-33
- Chavarria-Hernandez, J. C., & Pacheco-Catalán, D. E. (2014). Predicting the Kinematic Viscosity of FAMES and Biodiesel : Empirical Models. *Fuel*, 124:212–20.
- Costa, O. Y. A., Almeida, J. R. M., Barreto, C. C., Quirino, B. F., Bergmann, J. C., & Tupinamba, D. D. (2013). Biodiesel Production in Brazil and Alternative Biomass Feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21:411–20.
- Cruz, D. C. P., Castro, I. F. G., Schwartz, R. L. C., Campos, A. L. B. S., Pereira, I. C. C., Vilhena, A. E. G., & Martelli, M. C. (2022). Avaliação das propriedades físico-químicas e do desempenho das três gerações de biodiesel através do processo de transesterificação: uma revisão. *Research, Society and Development*, 11:4, e23111427234.
- Dapieve, D. R. (2015). Análise Da Influência Da Temperatura Sobre Propriedades Físico-Químicas De Amostras De Diesel, Biodiesel E Suas Misturas. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Dwivedi, G., Jain, S., & Sharma, M. P. (2013). Diesel Engine Performance and Emission Analysis Using Biodiesel from Various Oil Sources - Review. *Journal of Materials and Environmental Science*, 4(4):434–47.
- Dwivedi, G., & Sharma, M. P. (2013). Performance Evaluation of Diesel Engine Using Biodiesel from Pongamia Oil. *Internacional Journal of Renewable Energy Research*, 3(2): 325-330.
- Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2018). Economics of Biodiesel Production: Review. *Energy Conversion and Management*. 168:74–84.
- Ivanis, G. R., Radovic I. R., Veljkovic, V. B., & Kijevcanin, M. L. (2016). Biodiesel Density and Derived Thermodynamic Properties at High Pressures and Moderate Temperatures. *Fuel*, 165:244–51.
- Knothe, G., & Steidley, K. R. (2007). Kinematic Viscosity of Biodiesel Components (Fatty Acid Alkyl Esters) and Related Compounds at Low Temperatures. *Fuel*, 86:2560–67.
- Oliveira, B. M., Melo Filho, J. M., & Afonso, J. C. (2013). A Densidade e a Evolução do densímetro. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35,1601:1–10.
- Possa, D. C., Souza, S. N. M., Zanella Junior, E. A., Silva, E. A., Possa, D. C., & Nogueira, C. E. C. (2021). Análise energética e exergetica de um motor de ignição por compressão operando com diesel e biodiesel. *Research, Society and Development*, 10:16, e145101623471.
- Prieto, N. M. C. T., Ferreira, A. G. M., Portugal, A. T. G., Moreira, R. J., & Santos, J. B. (2015). Correlation and Prediction of Biodiesel Density for Extended Ranges of Temperature and Pressure. *Fuel*, 141:23–38.
- Reid, R. C., Praunitz, J. M., & Poling, B. E. (1987). The Properties of gases and liquids, *McGraw-Hill*, New Yourk, 4th edition.
- Reis, E. F., Cunha, J. P. B., Mateus, D. L. S., Delmond, J. G., & Couto, R. F. (2013). Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja. *Energia na Agricultura • Rev. bras. eng. agríc. ambient*, 17(5): 565–571.
- Santos, S. B. (2011). Biorefinaria de Pinhão Manso (*Jatropha Curcas L.*): Armazenamento, Extração de Óleo e Produção Sustentável de Biodiesel com Etanol. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Silva, G. C. R., & Andrade, M. H. C. (2020). Criação de banco de dados para simulação da produção de biodiesel. Parte 1: estimativa de propriedades termofísicas de óleos vegetais, *The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC*, 06:02.
- Siqueira, R. S. N., Oliveira, A. S., Mendonça, S., & Garcia, L. C. (2015). Otimização na produção de biodiesel a partir de óleo de pinhão-manso por rota metálica. *Embrapa Agroenergia*, 33–35.

Shames, I. H. (1999). *Mecânica dos Fluidos – Volume 1*. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 192p.

Teixeira, C. C. V. (2010). *Análise De Emissões E Desempenho De Motores Diesel Utilizando Óleo Diesel Comercial, Biodiesel De Palma (B100) E Misturas (Bx)*. 89 f. Dissertação (Mestrado) Rio de Janeiro.

Tesfa, B., Mishra, R., Gu, F., & Powles, N. (2010). Prediction Models for Density and Viscosity of Biodiesel and Their Effects on Fuel Supply System in CI Engines. *Renewable Energy*, 35:2752–2760.

Varella, C. A., & Santos, G. S. (2010). *Noções básicas de motores diesel*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.