

MODELOS DE REGRESSÃO APLICADOS PARA PREDIÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS MISTURAS DO BIODIESEL DE SEBO BOVINO COM O DIESEL

REGRETTING MODELS APPLIED ON PREDICTING THE PHYSICAL PROPERTIES OF BIODIESEL MIX FROM BEEF TALLOW WITH DIESEL

Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti

Professor e Coordenador do Curso de Biocombustíveis do IFBA. Doutor em Engenharia Química
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Campus Paulo Afonso,
Rua Marcondes Ferraz, 200, Bairro General Dutra – Paulo Afonso – BA – Brasil. E-mail: luizufpe@yahoo.com.br

RESUMO

O biodiesel (B100) trata-se de uma mistura de líquidos não-associados, composta de mono-ésteres alquílicos de ácidos graxos (EAAG) de cadeia longa oriundos de biomassas de diversas origens. As propriedades fluidodinâmicas dos combustíveis, viscosidade e densidade, afetam o desempenho do motor e influenciam nas suas propriedades físicas. O presente trabalho tem por objetivo avaliar modelos de regressão para predição da viscosidade e densidade do biodiesel de sebo bovino (B100-Sb) e suas misturas com diesel (misturas BX) em função da fração volumétrica do biodiesel presente na mistura, bem como, avaliar a influência da temperatura. O processo de esterificação foi utilizado para pré-tratamento dos ácidos graxos livres (AGL) presentes na matéria-prima, seguido de transesterificação alcalina para obtenção do B100-Sb. As misturas BX, com frações volumétricas 5, 10, 20, 30, 40 e 50% foram preparadas em base gravimétrica. A composição em termos de ácidos graxos do biodiesel foi avaliada por cromatografia gasosa. A viscosidade e a densidade dos B100-Sb e suas misturas BX foram obtidas com o auxílio de reômetro Brookfield e densímetro digital Anton-Paar. Os modelos preditivos desenvolvidos tiveram como base o modelo para misturas de Grunberg-Nissan. O Algoritmo foi implementado no Software Matlab. A Composição B100-Sb em EAAG foi de 4,1% (C14:0), 26,0% de (C16:0), 27,2% de (C18:0), 42,7% de (C18:1). As faixas de viscosidade absoluta e densidade encontradas para misturas BX foram de 2,2 a 5,9 mPa.s e 806,1 a 851,7 kg/m³, respectivamente. Os modelos desenvolvidos representam com significância os dados experimentais, pois fornecem valores com desvios padrões nas faixas de $1,0 \cdot 10^{-2}$ a 4,9 % e $3,0 \cdot 10^{-2}$ a 4,3%, para viscosidade e densidade, respectivamente. Tais resultados mostram que os modelos de regressão podem ser amplamente utilizados para prever os valores das propriedades físicas do biodiesel sem que medições sejam efetuadas.

Palavras-chave: Biodiesel, Modelos de regressão, Massa específica, Viscosidade.

ABSTRACT

Biodiesel (B100) is defined by a mixture of non-associated liquid consisting of mono-alkyl esters of fatty acids (MAEFA) with long chain derived from biomasses of various origins. The fluid dynamic properties of fuels - viscosity and density - affects engine performance and influence on its physical properties. This study aims to evaluate regression models to predict the viscosity and density of biodiesel from beef tallow (B100-Bt) and its mixtures with diesel (BX mixtures) according to the volumetric fraction of biodiesel present in the mixture, as well as to assess the influence of temperature. The esterification process was used as pretreatment of free fatty acids (FFA) in the raw material, followed by alkaline transesterification to obtain B100-Bt. The BX mixtures with volume fractions of 5, 10, 20, 30, 40 and 50% were prepared in gravimetric basis. The fatty acids composition for biodiesel was evaluated by gas chromatography. The Bt-B100 viscosity and density and its BX mixtures were obtained with Brookfield rheometer and Anton-Paar Digital densitometer. The predictive models developed on this study were based on the model for mixtures of Grunberg-Nissan. The algorithm was implemented in Matlab software. The B100-Bt composition in MAEFA was 4.1% (C14: 0), 26.0% of (C16: 0), 27.2% of (C18: 0), 42.7% of (C18: 1). The absolute viscosity and density ranges found for BX mixtures were 2.2 to 5.9 mPa.s and 806.1 to 851.7 kg / m³, respectively. The developed models represented with precision the experimental data obtained because they provided values with standard deviations around $1,0 \cdot 10^{-2}$ 4.9% and

4.3% $3,0 \cdot 10^{-2}$ for viscosity and density, respectively. These results show that regression models can be widely used to predict the physical properties values of biodiesel without making any measurements.

Keywords: Biodiesel, Regretting models, Specific weight, Viscosity.

1. INTRODUÇÃO

Com o significativo aumento do consumo energético mundial associado ao crescimento acelerado da população, a expectativa de esgotamento das reservas de petróleo, o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e uma legislação ambiental mais rígida, são fatos que encorajam a comunidade científica em concentrar as pesquisas quanto ao uso de energias renováveis (Ivaniš et al., 2016). O biodiesel surgiu como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, pois, seu uso contribui para a diminuição das emissões de gases tóxicos (SO_x e hidrocarbonetos aromáticos) durante o processo de combustão (Verduzco, 2013). Esse combustível é completamente miscível com o óleo diesel, permitindo-se formular misturas desses dois combustíveis em qualquer proporção (Knothe et al., 2006).

Utilizado em misturas com o diesel ou puro, o biodiesel, pode ser aplicado em motores de combustão interna sem que os mesmos sofram alterações de projeto. No entanto, as diferenças na natureza química do biodiesel (mistura de mono-álquil ésteres saturados e insaturados de ácidos graxos de cadeia longa) e óleo diesel convencional (mistura de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e aromáticos) podem resultar em diferenças nas suas propriedades básicas (número de cetano, ponto de névoa, ponto de entupimento de filtro a frio), afetando o desempenho do motor e as emissões de poluentes (Gulum e Bilgin, 2015).

Como o uso do biodiesel se torna mais generalizado, os pesquisadores têm mostrado um forte interesse na modelagem do processo de combustão no motor, a fim de compreender as características fundamentais da combustão do biodiesel. Costuma-se usar propriedades físicas como dados de entrada nos modelos de combustão, pois não é viável a medição das propriedades físicas do biodiesel em cada proporção de mistura com o diesel ou temperatura do processo. Equações de regressão podem ser amplamente utilizadas para prever os valores das propriedades físicas do biodiesel sem que medições sejam efetuadas (Geacai et al., 2015).

O conhecimento da massa específica do biodiesel ao longo de intervalos de temperatura e pressão é relevante para prever o comportamento dos sistemas de injeção e de combustão em motores diesel, e para a otimização de tais sistemas. A massa específica tem relação direta com a quantidade de combustível injetado na câmara de combustão e é medida volumetricamente para motores a diesel, a variação da massa específica afeta diretamente a potência de saída do motor e o consumo de combustível (Prieto et al., 2015).

A viscosidade é, certamente, uma das propriedades mais importantes do biodiesel devido a seu efeito com relação ao desempenho do motor. Embora a viscosidade do biodiesel seja maior quando comparada a do diesel de petróleo, pode promover uma melhor penetração do *spray* de combustível para o interior da câmara de combustão. Há efeitos adversos como pressões de injeção elevadas que leva a uma pulverização mais pobre, aumentando os diâmetros das gotas, comprometendo a etapa de atomização do combustível podendo causar combustão incompleta entre outros problemas (Chavarria-Hernandez e Pacheco-Catalán, 2014). Os fabricantes de motores têm expressado preocupação quanto a viscosidade superior do biodiesel em relação ao diesel de petróleo, em particular quanto ao comportamento da viscosidade frente à temperatura e propriedades de escoamento a frio, pois estas são fortemente influenciadas pela composição dos ácidos graxos presentes no biodiesel (Gulum e Bilgin, 2015).

O presente trabalho teve por objetivo ajustar modelos semi-empíricos baseados nas regras de mistura para o cálculo das propriedades básicas do B100-Sb e diesel (viscosidade e massa específica), em função da fração volumétrica das misturas BX para a faixa de temperatura de 20-60° C.

2. BASE TEÓRICA

2.1 Comportamento Reológico

Dependendo da temperatura, as misturas BX podem apresentar o comportamento reológico (CR) estacionário, de um dos Fluidos da Potência (Newtoniano ou Pseudoplástico). Uma das equações constitutivas existente para o comportamento mecânico de tais fluidos trata-se do Modelo Generalizado da

Potência ou de Ostwald-de-Waele (Equação 1). Os coeficientes “n” e “k” da Equação 1 são os índices de comportamento e de consistência de um dado fluido, respectivamente, valendo os seguintes valores para n (Bird *et al.*, 1960): Fluidos Pseudoplástico, FP, (n < 1), Fluido Newtoniano, FN, (n = 1) . Na faixa de temperatura de estudo deste trabalho, o diesel (B0), o biodiesel de sebo bovino (B100-Sb) e misturas BX comportam-se como Fluidos Newtonianos.

No caso FN, tem-se que “k” representa a viscosidade absoluta, μ , deste a dada temperatura, reduzindo a Equação 1 ao Modelo de Newton para a viscosidade de um líquido, i.e., $\tau = -\mu (\dot{\gamma})$ (Bird *et al.*, 1960).

$$\tau = -k (\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

$$\eta_a = k = \mu \quad (2)$$

$$\eta_a = k (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (3)$$

A Equação 2 é aplicada para fluidos newtonianos (FN) enquanto a Equação 3 é utilizada para fluidos não-newtonianos independentes do tempo (FNNIT).

2.2 Modelos Preditivos Semi-empíricos

Em condições isobáricas, as propriedades fluidodinâmicas de uma mistura de líquidos, tais como a viscosidade e a massa específica, podem ser estimadas através da interpolação entre os valores daquelas para os componentes puros. O modelo de Grunberg-Nissan, Equação 4, é empregado para tal (Reid *et al.*, 1977).

$$\ln \phi(T, x) = \sum_{i=1}^n x_i \ln \phi_i(T) + \sum_{i \neq j}^n \sum x_i x_j G_{ij}(T) \quad (4)$$

Sendo: ϕ : propriedade fluidodinâmica média da mistura de líquidos; ϕ_i : propriedade fluidodinâmica do componente *i* puro; x_i e x_j : fração volumétrica dos componentes da mistura; G_{ij} : parâmetro de interação; n: número de componentes.

Fazendo a aproximação de que as interações entre seus componentes possam ser desprezadas (mistura de líquidos não-associados), $G_{ij} \rightarrow 0$, o modelo de Grunberg-Nissan pode ser simplificado, tornando-se o modelo de mistura de Arrhenius (MMA):

$$\ln \bar{\phi}_{B100}(x, T) = \sum_{i=1}^n x_i \ln \phi_i(T) \quad (5)$$

Levantando-se a hipótese que as misturas BX comportam-se idealmente, pode-se usar o MMA (Equação 5) para avaliar o valor da viscosidade e da massa específica desses combustíveis a uma dada temperatura:

$$\ln \nu_{Mist}(x_{Bi}, T) = x_{B100} \ln \nu_{B100}(T) + (1 - x_{B100}) \ln \nu_D(T) \quad (6)$$

$$\ln \rho_{Mist}(x_{Bi}, T) = x_{B100} \ln \rho_{B100}(T) + (1 - x_{B100}) \ln \rho_D(T) \quad (7)$$

onde: x_{Bi} : fração volumétrica do biodiesel na mistura BX

A viscosidade do B100 pode ser obtida aplicando-se o MMA (Equação 5), sendo aquelas dos EAAG que compõem o B100 pelo modelo de Pairintra e Colaboradores, Equação 8 e Tabela 1 (Krisnankgura *et al.*, 2006).

$$\nu(z, T) = \exp \left[-A_{k1} - A_{k2} z + \frac{A_{k3}}{T} + \frac{A_{k4} z}{T} \right] \quad (8)$$

onde: z é o número de carbono na série homóloga e T é a temperatura em K;

Tabela 1- Parâmetros do Modelo de Pairintra e Colaboradores para viscosidade cinemática (Krisnankgura *et al.*, 2006)

Componentes	A _{k1} (cSt)	A _{k2} (cSt)	A _{k3} (cSt.K)	A _{k4} (cSt.K)
Ácido Graxo (óleo vegetal ou gordura animal)	2,5	0,3	657,1	173,3
EAAG saturados de Cadeia curta – C6 a C12	2,9	0,2	492,1	108,4
EAAG saturados de Cadeia longa - C12 a C18	2,2	0,2	403,7	109,7
EAAG de Cadeia insaturada - C18:1	5,0	-	1051,5	-
EAAG de Cadeia insaturada - C18:2	4,5	-	1822,5	-
EAAG de Cadeia insaturada - C18:3	4,2	-	1685,5	-
EAAG de Cadeia insaturada - C22:1	5,4	-	2326,2	-

A massa específica do B100 e do diesel mineral pode ser obtida pelo Modelo de Liew, Equação (9) (Reid *et al.*, 1987).

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

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O sebo bovino refinado foi fornecido pelo Grupo Bertin S.A. (São Paulo -SP) em recipientes plásticos de volume 5 L. O sebo bovino refinado apresentou-se no estado sólido a temperatura ambiente (30 °C), foi inserido em um reator químico de marca *Marconi*, modelo MA502/5/C (volume útil máximo: 3L) com controle de temperatura a 50°C e agitação mecânica. A referida temperatura foi suficiente para a mudança de estado físico liquefazendo toda a gordura bovina.

3.2 Produção do Biodiesel

O B100-Sb, 2L, foi produzido através das reações de esterificação para pré-tratamento dos ácidos graxos livres presentes no óleo de sebo bovino, seguida de transesterificação alcalina homogênea (catalisador: metóxido de potássio, 0,01g/g de óleo). O reator químico utilizado de marca *Marconi*, modelo

MA502/5/C (volume útil máximo: 3L) com controle de temperatura e agitação mecânica (impelidor do tipo pás).

As condições operacionais dessas etapas foram: 50° C, 1 atm, 300 rpm, razão molar metanol/óleo de sebo bovino 6:1, tempo reacional de 1h. Em seguida, procedeu-se a separação da glicerina da mistura reacional (método da decantação).

A fase mais leve da mistura, contendo B100-Sb, catalisador, excesso de metanol, passou pela etapa de purificação que constou de lavagem ácida com solução de ácido clorídrico 0,5M e as demais lavagens foram realizadas com água destilada a temperatura de 50°C, visando o ajuste do pH e retirada do residual de KCl formado. A secagem do biodiesel foi realizada em evaporador rotativo com vidraria vertical marca IKA, modelo RV10.

Após a secagem houve a adição de sulfato de sódio anidro na proporção de 10g/100g biodiesel para remoção de algumas moléculas de água ainda dispersas, seguida de filtração para remoção deste sal. Após a purificação e secagem do biodiesel foi adicionado o antioxidante sintético BHT na proporção de 2000mg.L⁻¹. Os antioxidantes são espécies químicas que agem contrariamente a formação de radicais livres, ou seja, aumentando a estabilidade oxidativa do biodiesel. Prolongando as características químicas do biocombustível. Formou-se um lote de 10 litros do B100-Sb produzido. As análises foram realizadas em triplicata sendo considerados seus valores médios.

3.3 Composição Química

A composição química do B100-Sb foi analisada por cromatografia gasosa, com o auxílio de um cromatógrafo de marca Ciola Gregory, modelo CG Máster, coluna Carbowax (Dimensão: 30,0m de comprimento, 5,3 x 10⁻⁴ m de diâmetro interno e espessura da fase estacionária de 1,0 x 10⁻⁹ m). Usou-se o hidrogênio (White Martins, ≥ 99,99%) como eluente. Os padrões do EMAG foram adquiridos a Sigma-Aldrich.

3.4 Misturas BX Puras e Aditivadas

As misturas BX, frações volumétricas de biodiesel (B5, B10, B20, B30, B40 e B50), foram preparadas em base gravimétrica para minimizar erros sistemáticos devido a variações causadas pela influência da temperatura. Utilizou-se para tal uma balança semi-analítica, marca *Metler-Toledo*, modelo PB3002-S de incerteza ± 0,0001 g.

3.5 Comportamento Reológico

O comportamento reológico (CR) das misturas BX foi investigado usando-se um reômetro do tipo Searle, marca Brookfield, modelo LVDV-III. Os *spindles* usados foram de modelo SC4-31 e SC14-18. As condições de operacionais das análises foram $\dot{\gamma}$: 80,00 – 330,00 s⁻¹ e 90,00 – 330,00 s⁻¹, para o diesel e BX (B5 a B50-Sb), respectivamente, sendo estas realizadas na faixa de temperatura de 20 a 60°C para o diesel e para as misturas BX.

3.6 Massa Específica e Viscosidade Cinemática

A massa específica dos combustíveis foram obtidas utilizando densímetro digital, marca *Anton Paar*, modelo DMA 5000, de incerteza ± 0,00001 g/cm³ na faixa de temperatura de 20 a 60°C divididos em intervalos de 10 em 10°C. A viscosidade absoluta foi obtida a partir dos dados inerentes das análises reológicas das amostras de B100-Sb e misturas B5 a B50 de sebo de bovino, esta hipótese pode ser admitida pelo fato dos fluidos em estudo apresentar comportamento de fluidos Newtonianos na faixa de temperatura

do estudo (Cavalcanti, 2013). Os valores da viscosidade cinemática das misturas BX, diesel e B100-Sb foram obtidos da definição desta propriedade fluidodinâmica, i.e.: $\nu = \mu / \rho$.

3.7 Análise dos Dados

A adequação dos modelos utilizados (Equações 10 e 11) aos dados foi investigada de acordo com a análise de resíduos. Estes foram calculados como a diferença entre os valores observados (experimentais) e os valores preditos pelo modelo de regressão com o auxílio do software *Statistica 7.0*. Os parâmetros dos modelos foram estimados através da aplicação de regressão linear para os dados de massa específica e regressão não-linear aos dados de viscosidade cinemática, utilizando a ferramenta “*cftool*” do *Matlab 7*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 mostra a composição do B100-Sb em função do teor dos ésteres metílicos de ácidos graxos (EMAG), como pode ser observado 55,0% dos ésteres presentes são saturados, enquanto 45,0% são insaturados. Majoritariamente os EMAG possuem 18 átomos de carbono em sua cadeia (68,1%), que segundo Knothe et al. (2006) quanto maior a cadeia carbônica do éster, maior será a viscosidade cinemática do biocombustível avaliado. Tal resultado terá impacto direto nos sistemas de injeção e desempenho do motor.

Tabela 2 – Teor de EMAG presente no B100-Sb

B100-Sb											
EMAG	C14:0	C16:0	C17:0	C18:0	C14:1	C16:1	C18:1	C18:2	C18:3	T.S. (%)	T.I. (%)
Teor (%)	3,3	24,9	1,3	25,5	0,3	2,1	38,1	4,5	-	55,0	45,0

Fonte: Autoria própria

T.S. = Percentual total de EMAG saturados;

T.I. = Percentual total de EMAG insaturados.

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos para a massa específica do diesel, B100-Sb e misturas BX (B5 a B50-Sb) a 1 atm, enquanto as Tabelas 4 e 5 apresentam aqueles valores obtidos para as viscosidades absoluta e cinemática destes combustíveis, respectivamente.

Tabela 3 – Massa específica do diesel, B100-Sb e suas misturas BX (B5 a B50)

Temperatura (° C)	ρ (kg.m ⁻³)							
	Diesel	B100	B5	B10	B20	B30	B40	B50
20,0	833,0	871,0	835,0	837,0	841,0	844,0	848,0	851,0
30,0	826,0	863,0	828,0	830,0	834,0	837,0	841,0	845,0
40,0	819,0	856,0	821,0	823,0	826,0	830,0	834,0	837,0
50,0	812,0	849,0	814,0	816,0	819,0	823,0	827,0	830,0
60,0	805,0	841,0	807,0	809,0	812,0	816,0	819,0	823,0

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Viscosidade absoluta do diesel, B100-Sb e suas misturas BX (B5 a B50)

Temperatura (° C)	μ (mPa.s)							
	Diesel	B100	B5	B10	B20	B30	B40	B50
20,0	3,7	7,6	3,8	4,0	4,2	4,5	4,9	5,1
30,0	3,0	5,5	3,1	3,1	3,3	3,6	3,8	4,0
40,0	2,5	4,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1	3,2
50,0	2,0	3,6	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
60,0	1,7	2,9	1,8	1,8	2,0	2,1	2,2	2,3

Fonte: Autoria própria

A Resolução ANP nº 45/2014 (Brasil, 2014), estabelece valores para a massa específica (20° C) e viscosidade cinemática (40°C) de um B100 deve ficar dentro das respectivas faixa 850,0 a 900,0 kg/m³ e 3,0 a 6,0 cSt. A análise do conjunto de dados das Tabelas 3 e 5, mostra que os valores da massa específica e da viscosidade cinemática se adequam aos limites estabelecidos pela Resolução nº 45 da ANP.

Tabela 5– Viscosidade cinemática do diesel, B100-Sb e suas misturas BX (B5 a B50)

Temperatura (° C)	ν (cSt)							
	Diesel	B100	B5	B10	B20	B30	B40	B50
20,0	4,5	8,8	4,6	4,7	4,9	5,3	5,7	6,0
30,0	3,6	6,3	3,7	3,7	4,0	4,3	4,6	4,7
40,0	3,0	5,0	3,1	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9
50,0	2,5	4,2	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2
60,0	2,2	3,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,8

Fonte: Autoria própria

Os valores da massa específica e viscosidade cinemática das misturas BX de sebo bovino para a faixa de temperatura de 20 a 60° C foram estimados com base nos valores obtidos experimentalmente para o diesel (B0) e o B100-Sb usando-se o modelo de mistura de Arrhenius (Equação 6 e 7). As Figuras 1a e 1b, mostram a dependência da massa específica e da viscosidade cinemática preditas em função da fração volumétrica do B100 presente nas misturas BX na faixa de temperatura de 20 a 60°C.

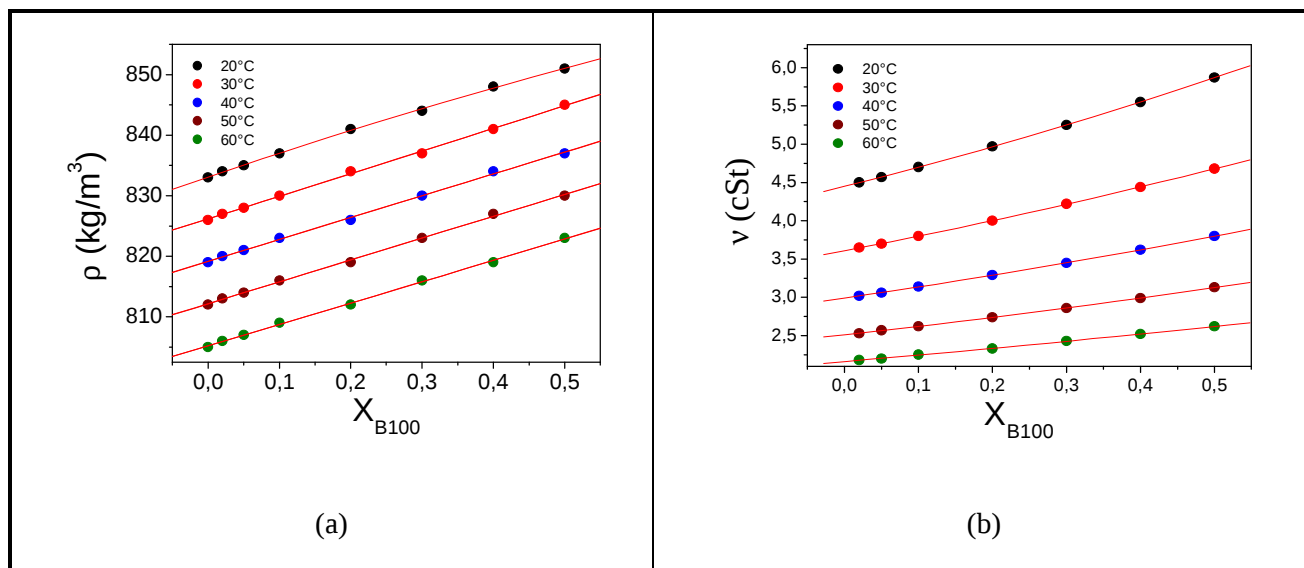


Figura 1 – Propriedades Fluidodinâmicas das misturas B5 a B50 em função da fração volumétrica do sebo bovino na mistura para a faixa de temperatura 20 a 60°C: (a) Massa específica; (b) Viscosidade cinemática.

As Figuras 1a e 1b revelam que, para uma dada temperatura, tanto a massa específica quanto à viscosidade cinemática das misturas BX aumentam com a fração volumétrica do B100-Sb. Ao aplicar a regressão não-linear ao conjunto de dados apresentados nas Tabelas 3 e 5 foi observado que a massa específica destes combustíveis apresenta uma relação linear com a fração volumétrica do B100-Sb para uma dada temperatura (Equação 10), enquanto que, a viscosidade cinemática apresenta uma relação quadrática com aquela variável (Equação 11).

$$\rho_{Mist}(x_{B100}) = A + B[x_{B100}] \quad (10)$$

$$\nu_{Mist}(x_{B100}) = C + D[x_{B100}] + E[x_{B100}]^2 \quad (11)$$

Onde A e B são parâmetros do modelo de regressão linear para predição da densidade do B100-Sb e suas misturas BX em função da fração volumétrica do biodiesel na mistura. Os parâmetros C, D e E são parâmetros do modelo de regressão não-linear para predição da viscosidade do B100-Sb e suas misturas BX em função da fração volumétrica do biodiesel na mistura.

A faixa de valores do erro relativo entre os valores preditos e aqueles obtidos experimentalmente foram de $1,2 \times 10^{-2} \%$ e $13,0 \times 10^{-2} \%$ para a massa específica e enquanto que para a viscosidade cinemática foi de $1,0 \times 10^{-2} \%$ a $4,9 \%$. Em todos os casos estudados os resíduos se apresentaram uniformemente distribuídos em torno da origem, significando que o ajuste do modelo é adequado para massa específica (Figura 2) e para viscosidade cinemática (Figura 3). Estes resultados mostram que o modelo de mistura de Arrhenius é adequado para prever os valores da massa específica e viscosidade cinemática destes combustíveis na faixa de temperatura avaliada.

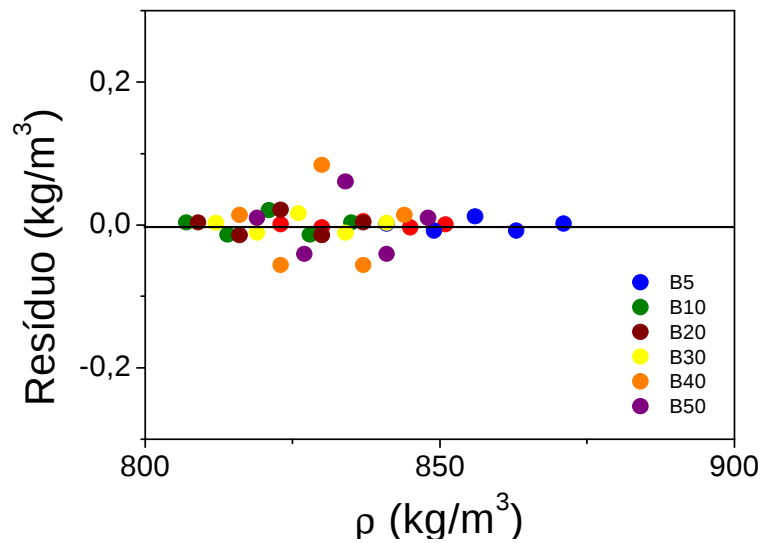


Figura 2 – Análise de resíduos para massa específica das misturas BX (B5 a B50).

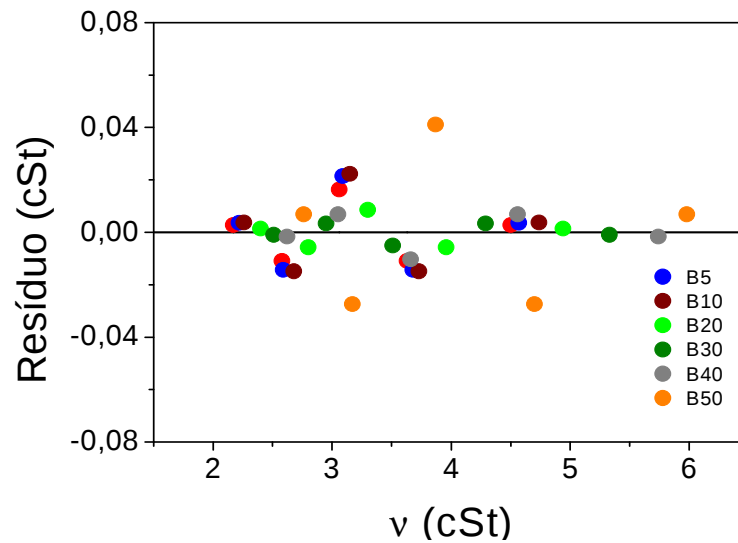


Figura 3 – Análise de Resíduos para viscosidade cinemática das misturas BX (B5 a B50).

A Figura 4 apresenta a comparação entre os valores preditos e experimentais para a massa específica e viscosidade cinemática do diesel e mistura B50. As demais misturas B5 a B40 apresentaram comportamento semelhante, sendo mostrado no presente trabalho os comportamentos dos pontos extremos. A adequação dos modelos é satisfatória tanto para massa específica quanto para viscosidade, pois, apresenta mínimos desvios em relação aos dados experimentais. A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros dos modelos de regressão para massa específica e viscosidade cinemática.

Tabela 6: Parâmetros dos modelos representados pelas Equações 10 e 11

Temperatura (° C)	Massa Específica		Viscosidade Cinemática		
	A (kg.m ⁻³)	B (kg.m ⁻³)	C (cSt)	D (cSt)	E (cSt)
20,00	833,0	36,0	4,5	2,4	0,8
30,00	826,0	37,0	3,6	1,8	0,6
40,00	819,0	36,0	3,0	1,4	0,4
50,00	812,0	36,0	2,5	1,2	0,4
60,00	805,0	35,0	2,2	0,8	0,2

Fonte: Autoria própria

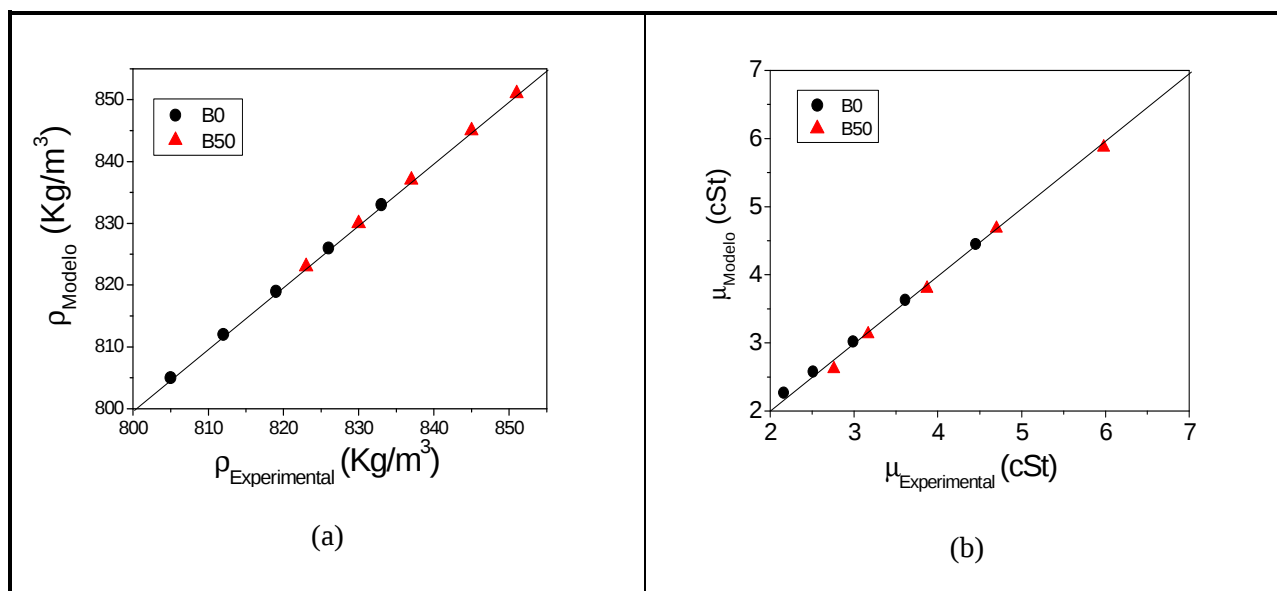


Figura 4 - Comparação entre valores preditos e experimentais das misturas BX (B0 e B50) na faixa de temperatura de 20 a 60° C. a) Massa Específica; b) Viscosidade cinemática

5. CONCLUSÕES

Os modelos propostos para viscosidade cinemática e massa específica do diesel, B100 e misturas BX apresentaram relativa incerteza entre os valores experimentais e aqueles preditos pelos modelos avaliados, mostrando que tais modelos se aplicam com incerteza para esses combustíveis. Como consequência disso, pode-se afirmar que os modelos preditivos para viscosidade e massa específica do B100-Sb e suas misturas BX podem ser utilizados amplamente para obtenção de dados das referidas propriedades fluidodinâmicas para modelagem do processo de combustão em motores ciclo diesel, sem a necessidade de realizar diversas medições no referido combustível.

6. NOMENCLATURA

A_L :	Parâmetro do Modelo de Liew, kg/m^3
A_{ki}	Parâmetro do Modelo de Paraintra e colaboradores, cSt
B_L :	Parâmetro do Modelo de Liew, $\text{kg/m}^3.K$
B0	Diesel Metropolitano
B100-Sb	Biodiesel de Sebo bovino
C	Parâmetro do modelo de regressão para viscosidade, cSt
D	Parâmetro do modelo de regressão para viscosidade, cSt
E	Parâmetro do modelo de regressão para viscosidade, cSt
EAAG	mono-ésteres alquílicos de ácidos graxos
FN	Fluido Newtoniano
FNNIT	Fluido Não-Newtoniano Independente do Tempo
FP	Fluido Pseudoplástico
K	Índice de consistência, Pa.s
Misturas BX	Misturas Diesel/Biodiesel
n	Índice de comportamento
T	Temperatura, K
z	Comprimento da cadeia carbônica

Letras Gregas

$\dot{\gamma}$:	Taxa de cisalhamento, s^{-1}
η_a :	Viscosidade aparente, mPa.s
μ :	Viscosidade absoluta, mPa.s
ν :	Viscosidade cinemática, cSt
ρ :	Massa específica, kg/m^3
τ :	Tensão de cisalhamento, Pa

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BIRD, R. B. STEWARD, W. E.; LIGHTFOOT, E. N.; Transport Phenomena , Wiley: Singapore, 1960.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 45, de 25 de agosto de 2014. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/agosto/ranp_45_2014.xml>. Acesso em: 14 abr. 2016.

CAVALCANTI, L. A. P. Reologia e melhoramento das propriedades de escoamento a frio de biodiesel e suas misturas BX. 2013. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)–Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

CHAVARRIA-HERNANDEZ, J. C., PACHECO-CATALÁN, D. E. Predicting the kinematic viscosity of FAMES and biodiesel: Empirical models. *Fuel*, v. 124, 212-220, 2014.

GEACAI, S., IULIAN, O., NITA, I. Measurement, correlation and prediction of biodiesel blends viscosity. *Fuel*, v. 143, 268-274, 2015.

GULUM, M., BILGIN, A. Density, flash point and heating value variations of corn oil biodiesel–diesel fuel blends. *Fuel Processing Technology*, v. 134, 456-464, 2015.

IVANIŠ, G. R., RADOVIĆ, I. R., VELJKOVIĆ, V. B., KIJEVČANIN, M. LJ. Biodiesel density and derived thermodynamic properties at high pressures and moderate temperatures. *Fuel*, v. 165, 244-251, 2016.

KNOTHE, G., GERPEN, J. V., KRANI, J., RAMOS, L. P.. *Manual do Biodiesel*. São Paulo. Editora Edgard Blücher, 2006.

KRISNANGKURA, K., YIMSUNWAN, T., PAIRINTRA, R. An empirical approach in predicting biodiesel viscosity at various temperatures. *Fuel*, v.85, 107-113, 2006;

PRIETO, N. M. C. T., FERREIRA, A. G. M., PORTUGAL, A. T. G., MOREIRA, R. J., SANTOS, J. B. Correlation and prediction of biodiesel density for extended ranges of temperature and pressure. *Fuel*, v.141, 23-38, 2015.

REID, R.C., PRAUSNITZ, J.M., POLING, B.E.; *The Properties of Gases and Liquids*. McGraw-Hill, New York, 4th edition, 1987.

VERDUZCO, L. F.R. Density and viscosity of biodiesel as a function of temperature: Empirical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.19, 652-665, 2013.