

ANÁLISE DOS MÉTODOS DE PREDIÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE NANOFLUIDOS

Lucas Amadio da Silveira¹

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista/Câmpus de São João da Boa Vista, Av. Profa. Isette Correa Fontão, 505 - Jardim das Flores, São João da Boa Vista – SP, 13876-750

l.silveira@unesp.br

Elaine Maria Cardoso^{1,2}

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista/Câmpus de São João da Boa Vista, Av. Profa. Isette Correa Fontão, 505 - Jardim das Flores, São João da Boa Vista – SP, 13876-750

²UNESP - Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira.

elaine.cardoso@unesp.br

Abstract. *Devido ao avanço da tecnologia e ao crescimento da demanda de potência torna-se necessário a busca de fluidos capazes de dissipar mais calor. A aplicação de nanofluidos tem importância em várias áreas, dentre elas: reatores nucleares, resfriamento de componentes micro e macro eletrônicos, entre outros. Devido à sua alta condutividade térmica, os nanofluidos podem aumentar a transferência de calor em microchips, podendo até minimizar o tamanho e o inventário de fluido refrigerante utilizado e, conseqüentemente, os custos dos dispositivos de arrefecimento. A incorporação de nanopartículas em um fluido base altera as propriedades termofísicas como condutividade térmica e viscosidade, que afetam a transferência de calor. Existem muitos relatos conflitantes sobre a influência dos parâmetros nas propriedades termofísicas e, conseqüentemente, diferentes métodos e/ou correlações para predição da condutividade térmica e viscosidade dos nanofluidos. Este trabalho envolveu uma vasta revisão bibliográfica sobre os métodos de preparação dos nanofluidos; os métodos de avaliação da estabilidade destes nanofluidos; e, os métodos de predição das propriedades termofísicas como, condutividade térmica e viscosidade dinâmica. O método em duas etapas é mais econômico para produzir nanofluidos em grande escala, porém técnicas de estabilização como agitação ultrassônica ou adição de surfactantes apropriados são muitas vezes utilizadas para minimizar a aglomeração das partículas e melhorar o comportamento da dispersão. Com base em um extenso banco de dados experimental obtido da literatura e por meio de comparação com os métodos de predição existentes, foi possível indicar quais modelos podem prever satisfatoriamente as propriedades termofísicas efetivas, como condutividade térmica e viscosidade dinâmica, com um erro médio menor que 10% sendo que 89% dos dados estão na faixa de erro de $\pm 15\%$.*

Palavras-chave: Nanofluidos, propriedades termofísicas, correlações, banco de dados experimental.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, pesquisas foram conduzidas sobre a aplicação de nanofluidos na engenharia e nos campos de fenômenos de transporte, devido a resultados que demonstraram que a dispersão de nanopartículas em um fluido base apresenta melhores propriedades termofísicas e de transferência de calor comparadas ao fluido base (Lee et al., 1999). Tal fato evidencia a necessidade de compreender a preparação, o comportamento, a modelagem e as aplicações dos nanofluidos, visto que não há um consenso na literatura quanto aos métodos de predição das propriedades dos nanofluido.

A condutividade térmica do nanofluido representa a capacidade em conduzir calor; sendo dependente da temperatura, da concentração das nanopartículas, característica do escoamento, entre outros. Maïga et al. (2005) desenvolveram uma correlação para prever a condutividade térmica do nanofluido $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ e do $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-etilenoglicol}$ com um diâmetro de 28 nm e em uma temperatura fixa de 293,15 K e 280 K, respectivamente. Chiam et al. (2017), por sua vez, propuseram uma correlação para o nanofluido de alumina válida para uma faixa de temperatura de 30 °C a 70 °C, com diâmetro de partícula entre 13 e 36 nm; e, Esfe et al. (2017) propuseram uma correlação para vários tipos de nanofluidos baseando-se em um algoritmo genético NSGA-II. Esses modelos, apesar de utilizarem o mesmo nanofluido e valores similares de diâmetros de partículas, apresentam discrepância nos valores de predição de condutividade térmica.

Assim como para a condutividade térmica, o desenvolvimento de uma correlação para predição da viscosidade de nanofluido precisa levar em consideração parâmetros como, concentração de nanopartículas, temperatura, diâmetro da nanopartícula. Tavman et al. (2010) estudaram o efeito da concentração de nanopartículas e da temperatura na predição da viscosidade dos nanofluidos de $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$. Os resultados obtidos divergiram dos resultados preditos pelo modelo clássico de Einstein (1906). De forma geral, observa-se o incremento da viscosidade com o aumento da concentração volumétrica da solução. A temperatura apresenta uma grande influência na viscosidade relativa dos nanofluidos, dessa forma, o incremento a certa concentração varia sensivelmente com a temperatura (Duan et al., 2011).

Embora existam diversos métodos de predição das propriedades termofísicas dos nanofluidos, a maioria possui limitações como, simplificações teóricas, métodos de cálculo, faixa de temperatura e concentração analisadas, etc. Desse modo, o objetivo do presente trabalho é analisar os métodos de predição existentes na literatura para condutividade térmica, viscosidade e densidade de nanofluidos; com base em um banco de dados experimental obtido da literatura (350 pontos) e por meio de comparação com os métodos de predição existentes, é possível indicar quais modelos podem prever satisfatoriamente as propriedades termofísicas efetivas dos nanofluidos mais comumente utilizados.

2 PREPARAÇÃO DE NANOFLUIDOS

A preparação dos nanofluidos exige técnicas com a finalidade de obter um nanofluido estável e uniforme, evitando a sedimentação das nanopartículas. Essas técnicas se baseiam na dispersão de partículas metálicas, óxidos metálicos e partículas não metálicas em escala nanométrica em um fluido base, como água, óleo e etileno glicol (Sundar et al., 2013).

No método de um passo, as nanopartículas são preparadas usando a técnica de deposição a vapor (vaporização do material sólido sobre o substrato, formando camadas finas e sólidas) ou pela técnica de químico líquido (precipitação química, micro emulsões e combinação de plasma). A desvantagem dos métodos de um passo é que estes precisam ser desenvolvidos por lotes, ou seja, normalmente a produção acontece apenas em pequenas quantidades, inviabilizando a produção comercial de nanofluidos devido ao elevado custo operacional. Além disso, o controle sobre parâmetros importantes, como tamanho das nanopartículas, é limitado; e o fluido base deve possuir baixa pressão de vapor, a fim de se evitar aglomerações de nanopartículas.

Outro modo de preparação é o método de dois passos, no qual as nanopartículas são preparadas separadamente do fluido base. Basicamente, as nanopartículas são primeiramente produzidas na forma de pós-secos através de métodos químicos ou físicos. Em seguida, o particulado é disperso em um fluido no segundo passo de processamento com a ajuda de agitação intensiva como, agitação ultrassônica. Este método de passo-a-passo isola a preparação de nanofluidos da preparação de nanopartículas (Eshgarf et al., 2021). Assim, como resultado, a aglomeração de nanopartículas pode ocorrer em ambos os passos, especialmente no processo de secagem, armazenamento e transporte de nanopartículas. O método em duas etapas é o método mais econômico para produzir nanofluidos em grande escala, visto que as técnicas de síntese de particulado podem ser ampliadas para níveis de produção industrial.

3 ESTABILIDADE DOS NANOFLUIDOS

As nanopartículas tendem a se aglomerarem no fluido base devido à variação de densidade e à carga de superfície (potencial zeta – medida de magnitude eletrostática que representa repulsão ou atração das cargas entre as partículas; em geral, nanofluidos com potencial zeta acima de 40 mV têm boa estabilidade). A aglomeração de nanopartículas causa a sedimentação que acarreta na diminuição das propriedades térmicas do nanofluido. Os parâmetros que mais afetam a estabilidade de um nanofluido são: a concentração das nanopartículas, os dispersantes, a viscosidade do nanofluido, pH, tipo e diâmetro das nanopartículas.

Há técnicas para melhorar a estabilidade dos nanofluidos, como a adição de surfactantes e a mudança de pH do fluido base. A adição de surfactante tem a função de diminuir a tensão superficial do fluido base, melhorando a distribuição das nanopartículas neste e evitando a aglomeração. Li et al. (2006) estudaram a viscosidade de nanofluidos magnéticos com a aplicação de surfactantes e observaram que a viscosidade aumenta conforme o aumento da concentração de surfactante. Já, Hong et al. (2020) analisaram a aplicação de diferentes surfactantes na preparação de nanofluidos híbridos e observaram que a adição de surfactante é a principal causa limitante do incremento da condutividade térmica. Na Figura 1 é possível observar a influência da aplicação de um surfactante na condutividade térmica de nanofluidos.

O uso de surfactantes altera a densidade e a viscosidade do nanofluido, influenciando na potência requerida para o escoamento do fluido em um sistema, visto que o aumento da viscosidade acarreta em uma maior perda de carga no escoamento.

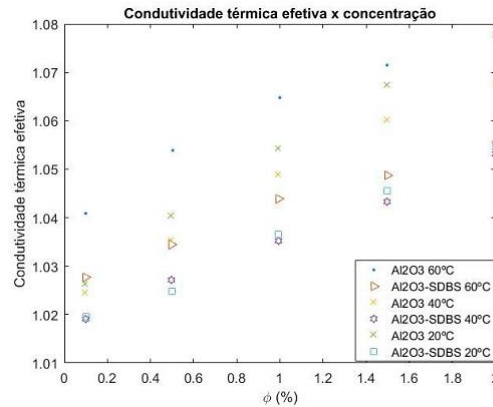


Figura 1. Condutividade térmica efetiva de diferentes nanofluidos em função da concentração com e sem o uso de surfactante.

Para cada partícula, há um determinado valor de pH denominado pH de ponto isoelétrico. Neste ponto, as forças repulsivas entre as partículas são iguais a zero e as partículas estão interconectadas. Desse modo, o nanofluido torna-se instável quando as partículas que o compõem estão nesse ponto. Para que o nanofluido seja estável sob o ponto de vista do pH, as partículas devem possuir uma alta diferença de pH entre si, para que haja maior mobilidade e, concomitantemente, não haja sedimentação.

Ainda há outros dois métodos de avaliação da estabilidade, o método da dispersão de luz e o método da microscopia eletrônica, sendo que ambos medem a distribuição do tamanho da partícula e observam a aglomeração das partículas. No método da microscopia eletrônica, tanto a microscopia eletrônica de transmissão (TEM) quanto à microscopia eletrônica de varredura (MEV) são ferramentas muito úteis para distinguir o formato, tamanho e distribuição de nanopartículas através de microscópios de alta resolução e captura de imagens digitais.

4 MÉTODOS DE PREDIÇÃO PARA A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE NANOFLUIDOS

Os métodos de predição exibidos na Tabela 1 representam a condutividade térmica efetiva térmica do nanofluido normalizada pela condutividade térmica do fluido base, sendo obtidos a partir de métodos empíricos e observações experimentais. Por exemplo, Corcione (2010) desenvolveu uma correlação para nanofluidos de alumina, óxido de cobre, titânio e cobre com diâmetro de nanopartículas no intervalo de 10 a 150 nm, utilizando água ou etileno glicol como fluido base; já, Sharifpur et al. (2017) propuseram uma correlação utilizando $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ -glicerol, com uma faixa de diâmetros entre 40 e 100 nm e fração volumétrica entre 0,4% e 4%. Assim, é esperado que os valores obtidos possuam dispersão entre si, pois são advindos de diferentes métodos de preparação e de estabilidade do nanofluido; e, muitas vezes, de simplificações teóricas.

Tabela 1. Métodos de predição para a condutividade térmica de nanofluidos.

Autores	Correlação	Observações
Maxwell (1881)	$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)} k_f$	k_f e k_p são as condutividades térmicas do fluido base e da nanopartícula, respectivamente. Correlação válida para partículas esféricas com diâmetro $\phi \ll 1$.
Maïga et al. (2005)	$k_{nf} = (4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1)k_f$	Correlação válida para $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ e Reynolds de 250, 500 e 1000. Utiliza diâmetro de 28 nm e temperatura inicial de 280 K.
Maïga et al. (2005)	$k_{nf} = (28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1)k_f$	Correlação válida para Al_2O_3 - etileno glicol e Reynolds de 6,31; 63,1 e 631. Utiliza diâmetro de 28 nm e temperatura inicial de 280 K.

Chon (2005)	$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7\varphi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.7476} Pr_f^{0.9955} Re^{1.2321}$	Correlação válida para $Al_2O_3-H_2O$, temperatura entre 294 e 344 K e tamanho de nanopartículas entre 11 e 150 nm. Possui boa aproximação para nanopartículas com diâmetro entre 47 nm e 150 nm quando a fração volumétrica é de 1%; para fração volumétrica de 4%, o diâmetro de 47 nm possui a melhor aproximação, com erro relativo de 3,9%.
Corcione (2010)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 4.4Re^{0.4} Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.03} \varphi^{0.66}$	Correlação válida para nanopartículas de 10 a 150 nm, com fração volumétrica entre 0.2% e 9% e temperatura entre 294 K e 324 K. A correlação possui um erro de 1,86% em relação ao método experimental.
Ho et al. (2010)	$k_{nf} = k_{bf}(1 + 2.944\varphi + 19.672\varphi^2)$	Válida para $Al_2O_3-H_2O$, tamanho de nanopartículas de 33 nm e concentração acima de 4%. Possui um desvio de 1,8% em relação aos resultados obtidos experimentalmente.
Khanafar and Vafai (2011)	$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 1.0112\varphi + 2.4375\varphi \left(\frac{47}{d_p}\right) - 0.0248\varphi \left(\frac{k_p}{0.613}\right)$	Correlação geral para a condutividade térmica do $Al_2O_3-H_2O$ e CuO -água. Válida para nanopartículas de 13 nm a 80 nm e fração volumétrica acima de 15%. Possui boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente.
Sharma et al. (2016)	$\frac{k_{nf}}{k_f} = 0.8938 \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right)^{1.37} \left(1 + \frac{T_{nf}}{70}\right)^{0.2777} \left(1 + \frac{d_p}{150}\right)^{-0.0336} \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_f}\right)^{0.01737}$	Correlação válida para todos nanofluidos com água como fluido base. Diâmetro das nanopartículas entre 20 e 150 nm, temperatura entre 293 e 343 K e fração volumétrica de 4%. Possui uma boa aproximação para os nanofluidos de SiO_2 e TiO_2 em concentrações até 4%.
Chiam et al. (2017)	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0.9683 \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right)^{11.13} \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{0.1676} (BR + 0.01)^{0.00111} \left(\frac{d_p}{36}\right)^{0.0576}$	Correlação válida para $Al_2O_3-H_2O$, com temperatura entre 30 e 70 °C, diâmetro da partícula entre 13 e 36 nm, e concentração entre 0 e 1,5%. Desvio médio de 2,2% com uma incerteza de 10%. Apresentou maior aumento de condutividade térmica (12,8%) quando 40:60 (W:EG).
Sidik et al. (2016)	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1.268 \left(\frac{T}{80}\right)^{-0.0074} \left(\frac{\varphi}{100}\right)^{0.036}$	Correlação válida para Al_2O_3 com fluidos base de etileno glicol, bioglicol e propileno glicol, com temperatura entre 30 °C e 80 °C e com concentração volumétrica até 1%.
Sharifpur et al. (2017)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + Re_p^{0.4377} Pr_f^{0.9400} \varphi^{1.0475} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.6661}$	Correlação válida para $\alpha-Al_2O_3$ -glicerol, com diâmetro das nanopartículas de 40 nm a 100 nm, fração volumétrica de 0,5% a 4% e a temperatura de 20 a 45 °C. O erro máximo relativo foi de 2,4% e o erro médio relativo foi de 0.03%.

Asadi et al.
(2018)

$$k_{nf} = 0.1534 + (0.00026)T + (1.1193)\phi$$

Correlação válida para Al₂O₃-MWCNT/óleo com temperatura entre 298 e 323 K, concentração entre 0,125 e 1,5%. Possui um erro relativo menor que 5%

Para analisar os métodos de predição apresentados na Tabela 1, construiu-se um banco de dados a partir da coleta de dados experimentais reportados na literatura por outros autores. Para fins de validação, escolheu-se o método que foi desenvolvido para uma ampla faixa de temperatura, de diâmetros de nanopartícula e concentrações volumétricas, bem como, que tenha apresentado um erro relativo baixo em comparação com a base de dados do autor(es) que a desenvolveu. Desse modo, escolheu-se a correlação de Chon et al. (2005), que inclui parâmetros de escoamento, como o número de Reynolds e Prandtl, definidos por:

$$Re = \frac{\rho_{BF} K_b T}{3\pi\mu^2 l_{BF}} \quad (1)$$

$$Pr = \frac{\mu}{\rho_{BF} \alpha} \quad (2)$$

sendo ρ_{BF} a densidade do fluido base em kg/m³, K_b a constante de Boltzmann em J/K, T a temperatura em K, μ a viscosidade em N s/m² definida por:

$$\mu = 10^{B(T-C)A} \quad (3)$$

com A , B e C constantes iguais a 2.414×10^{-5} , 247,8 e 140 para a água. O parâmetro l_{BF} representa o caminho livre médio, dado por:

$$l_{BF} = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d_{BF}^2} \quad (4)$$

na qual n representa o número molecular de densidade. Os autores da correlação consideraram $l_{BF} = 0.17$ nm para a água; o diâmetro da partícula do fluido base d_{BF} igual a 10^{-11} m e da nanopartícula d_p em nm; a concentração f em vol% e a condutividade térmica da partícula k_p e do fluido base k_{BF} em W/mK. Ainda, a condutividade térmica da nanopartícula é dada por:

$$k_p = 5.5 + 34.5 \exp[-0.0033(T - 273)] \quad (5)$$

A condutividade térmica efetiva então foi correlacionada como:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 64.7\phi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.7476} Pr_f^{0.9955} Re^{1.2321} \quad (6)$$

A Figura 2 mostra a comparação entre os valores obtidos pelo método de predição de Chon et al. (2005) e os valores de condutividade térmica experimentais (com base no banco de dados coletado para o presente estudo).

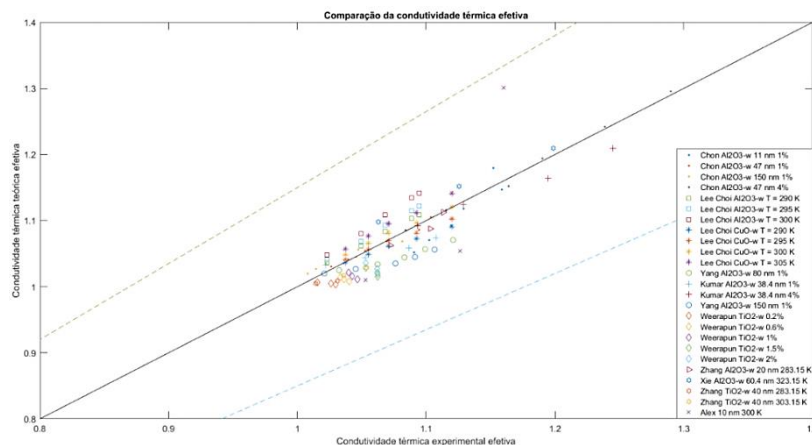


Figura 2. Comparação entre os valores preditos (Chon et al., 2005) e os valores experimentais de condutividade térmica dos nanofluidos.

A correlação de Chon et al. (2005) prediz satisfatoriamente o banco de dados experimental, predizendo 100% dos dados dentro da faixa de erro de $\pm 15\%$, com erro médio relativo menor que 10%. Isso é bastante razoável, uma vez que o efeito da temperatura, de diferentes nanofluidos, e diâmetro de nanopartículas são bem capturados pela correlação.

5 MÉTODOS DE PREDIÇÃO PARA A VISCOSIDADE DE NANOFLUIDOS

As nanopartículas são mais densas que os fluidos base e consequentemente, a viscosidade dos nanofluidos é superior à dos fluidos base. Tendo em vista a utilização de nanofluidos em trocadores de calor, por exemplo, torna-se essencial determinar sua viscosidade para calcular a queda de pressão e o coeficiente de transferência de calor. Na literatura, estudos foram feitos para analisar os efeitos da concentração volumétrica, da temperatura e do diâmetro de nanopartícula sobre a viscosidade; El et al. (2005) analisaram o nanofluido de CuO-H₂O e concluíram que, para determinada temperatura, a viscosidade do nanofluido aumenta com o aumento da concentração de nanopartículas e decai com o aumento de temperatura. Meybodi et al. (2016) analisaram o efeito da temperatura, da concentração e do diâmetro de nanopartículas na viscosidade dos nanofluidos de Al₂O₃-H₂O, TiO₂-H₂O, SiO₂-H₂O e CuO-H₂O. A maioria dos métodos propostos para estimar a viscosidade de soluções contendo partículas é derivada do modelo de Einstein (1906); a Tabela 2 apresenta alguns métodos de predição da viscosidade de nanofluidos usualmente encontrados na literatura.

Tabela 2. Métodos de predição para a viscosidade de nanofluidos.

Autores	Correlação	Observações
Einstein (1956)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\varphi)$	Correlação empírica que serviu de base para muitos estudos de viscosidade de nanofluidos. Válida para baixas frações volumétricas e concentração maior que 2%.
Maïga et al. (2005)	$\mu_{nf} = (123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1)\mu_f$ $\mu_{nf} = (306\varphi^2 - 0.19\varphi + 1)\mu_f$	Para Al ₂ O ₃ -H ₂ O e Al ₂ O ₃ -etilenoglicol, respectivamente. Analisou o efeito da concentração de nanopartículas para temperatura constante. Tem boa aproximação com os resultados experimentais.
Jang et al. (2007)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 + 2.5\varphi) \left[1 + \eta \left(\frac{d_p}{D_m} \right)^{-2\varepsilon} \varphi^{0.666(\varepsilon+1)} \right]$	D_m é o diâmetro do tubo e ε e η são constantes empíricas obtidas para Al ₂ O ₃ -H ₂ O, iguais a -1/4 e 280, respectivamente. Possui uma relação linear com os resultados experimentais para concentrações abaixo de 5%.
Ho et al. (2010)	$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 4.93\varphi + 222.4\varphi^2)$	Correlação válida para Al ₂ O ₃ -H ₂ O, com tamanho de 33 nm e concentração menor ou igual a 4%. Apresenta um desvio de 3,8% em relação aos resultados obtidos experimentalmente.
Corcione (2010)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \varphi^{1.03}}$	Correlação válida para tamanhos da nanopartícula entre 25 e 200 nm, concentrações entre 0,01 e 7,1% e temperatura entre 293 e 333 K. Possui um erro relativo de 1,84%.
Mahdi et al. (2016)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \frac{A_1 + A_2 \exp\left(\frac{\varphi}{S}\right) + A_3 \left(\exp\left(\frac{\varphi}{S}\right)\right)^2 + A_4 \left(\exp\left(\frac{\varphi}{S}\right)\right)^3}{A_5 + A_6 \frac{\ln(S)}{T} + A_7 \frac{(\ln(S))^2}{T}}$	Correlação válida para Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , SiO ₂ , CuO. Para Al ₂ O ₃ , o tamanho das nanopartículas foi entre 13-100 nm, a fração volumétrica entre 0,03 e 13% e a temperatura entre 283 K e 345 K. O desvio médio foi de 8,26%. As constantes $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ e A_7 foram obtidas experimentalmente.

Chiam et al.
(2017)

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right)^{32} \left(\frac{T}{70}\right)^{-0.001} (0.1 + BR)^{0.08}$$

Correlação válida para $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ /etilenoglicol, temperatura entre 30 e 70 °C, diâmetro da partícula entre 13 e 36 nm e concentração entre 0 e 1,5%. Possui um desvio médio de 4,7% e uma incerteza de 10%.

Sharma et al.
(2016)

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right)^{11.3} \left(1 + \frac{T_{nf}}{70}\right)^{-0.038} \left(1 + \frac{d_p}{170}\right)^{-0.061}$$

Correlação válida para diâmetros entre 20 e 150 nm, temperatura entre 293 e 343 K, com fração volumétrica máxima de 4%. Possui erro relativo de 6% para $\text{TiO}_2\text{-água}$.

Hemmat et al.
(2017)

$$\mu_{nf} = -744.8 + \frac{1806\varphi^{0.01382}}{T^{0.2}}$$

Correlação válida para $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MWCNT/5W50}$ (65:35), nanopartículas de alumina com 50 nm e os nanotubos de carbono com diâmetro interno entre 3 e 5 nm e externo entre 5 e 15 nm. A concentração foi de 0 a 1% e a temperatura entre 5 e 55 °C. O desvio máximo é menor que 300 mPa.s.

Elcioglu et al.
(2018)

$$\mu_{nf} = 1.0973 - 0.0148T + 34.2292\varphi + 0.0041d_p - 0.3458T\varphi$$

Correlação válida para nanofluido de alumina com temperatura entre 20 °C e 50 °C, diâmetro de nanopartícula entre 10 e 30 nm e concentrações de 1% a 3%. Os resultados convergiram com os resultados obtidos por meio da correlação de Einstein (1906).

Utilizou-se da mesma metodologia descrita na Seção 4 para analisar os métodos de predição para viscosidade. Desta forma, considerando o efeito da temperatura, concentração volumétrica e diâmetro de nanopartículas, bem como, baixos erros relativos, escolheu-se a correlação de Elcioglu et al. (2018). A correlação é dada por:

$$\mu_{nf} = 1.0973 - 0.0148T + 34.2292\varphi + 0.0041d_p - 0.3458T\varphi \quad (7)$$

sendo T a temperatura em °C, φ a concentração em vol% e d_p o diâmetro em nm. Tais parâmetros de entrada devem respeitar os seguintes intervalos: 20 a 50 °C para a temperatura, 1% a 3% para a concentração e de 10 a 30 nm para o diâmetro da nanopartícula.

Assim, para avaliar o desempenho da correlação escolhida, os valores previstos e os experimentais com base no banco de dados do presente estudo estão apresentados na Figura 3.

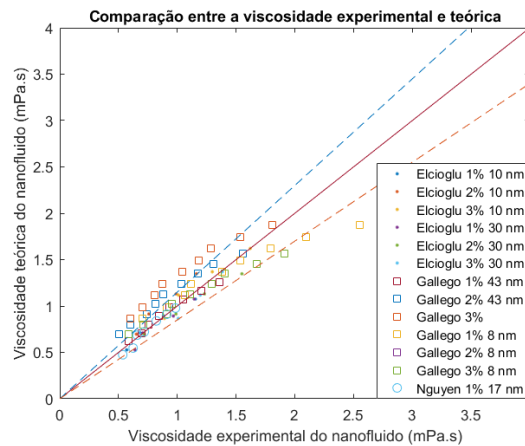


Figura 3. Comparação entre os valores preditos (Elcioglu et al., 2018) e os valores experimentais de viscosidade dos nanofluidos.

A correlação Elcioglu et al. (2018) prediz corretamente os dados experimentais independentes da literatura, prevendo 77% dos dados dentro da faixa de erro de $\pm 15\%$, sendo que à medida que os parâmetros se afastam dos intervalos para os quais a correlação foi desenvolvida o erro aumenta (representado pelos pontos que estão fora da faixa de $\pm 15\%$).

6 MÉTODOS DE PREDIÇÃO PARA A DENSIDADE DE NANOFLUIDOS

Muitos pesquisadores utilizaram a aproximação linear para calcular a densidade dos nanofluidos, a qual ignora a influência da espessura da camada existente entre o fluido base e a nanopartícula. No entanto, a partir de dados experimentais pôde-se observar que conforme se aumenta a concentração volumétrica há discrepâncias na comparação de valores experimentais e teóricos. Desse modo, ao trabalhar com altas concentrações volumétricas torna-se necessário avaliar a influência da espessura da camada entre o fluido e a nanopartícula.

Teng et al. (2014) realizaram um estudo experimental e desenvolveram um modelo teórico para prever a densidade do nanofluido de alumina; o desvio máximo encontrado entre os valores teóricos e experimentais foi de 2,53%. Dentre os métodos de predição encontrados na literatura, aquele desenvolvido por Sharifpur et al. (2016) apresentou baixo erro relativo em relação aos dados experimentais, além de considerar a nanocamada entre a nanopartícula e o fluido base, a massa, o raio da nanopartícula e a concentração volumétrica. A correlação é dada por:

$$\rho_{nf_{new}} = \frac{\rho_{nf}}{(1 - \varphi) + \varphi(r_p + t_v)^3 / r_p^3} \quad (8)$$

na qual r_p e φ representam o raio da partícula em nm e a concentração volumétrica em vol%, respectivamente. A correlação é válida para temperaturas entre 10 °C e 40 °C e concentrações volumétricas entre 1% e 6%; t_v representa a espessura da camada entre a nanopartícula e o fluido base, sendo definida por:

$$t_v = -0.0002833r_p^2 + 0.0475r_p - 0.1417 \quad (9)$$

Por fim, ρ_{nf} é dado pela aproximação linear,

$$\rho_{nf} = \rho_p + (1 - \varphi)\rho_f \quad (10)$$

Para avaliar o desempenho da correlação escolhida, os valores previstos e os experimentais com base no banco de dados do presente estudo estão apresentados na Figura 4.

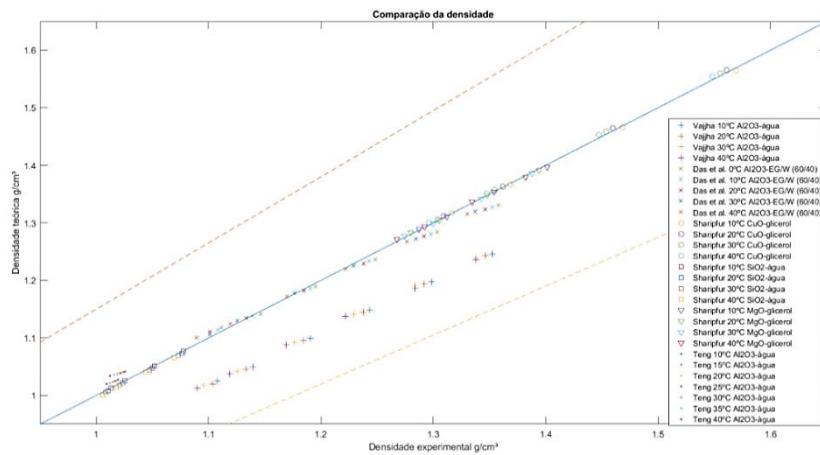


Figura 4. Comparação entre os valores preditos (Sharifpur et al., 2016) e os valores experimentais de densidade dos nanofluidos.

A partir da Figura 4, observa-se que a correlação apresenta resultados satisfatórios para os intervalos de temperatura e concentração volumétrica estabelecida, com 100% dos dados experimentais dentro da faixa de erro de $\pm 15\%$ e com erro relativo menor que 10%.

7 CONCLUSÕES

A partir do presente trabalho, o método de dois passos apresenta a melhor relação custo-benefício, mesmo sendo menos eficiente que o método de passo único. Quanto à estabilidade, os métodos de sonicação e banho ultrassônico são amplamente utilizados. Em relação às propriedades termofísicas, dados experimentais de outros autores e métodos de predição para condutividade térmica, viscosidade e densidade foram levantados, e avaliou-se o desempenho dos métodos

de predição por meio da comparação dos valores previstos e os experimentais com base no banco de dados. Assim, para a condutividade térmica a correlação de Chon et al. (2005) prediz satisfatoriamente o banco de dados experimental, predizendo 100% dos dados dentro da faixa de erro de $\pm 15\%$, com erro médio relativo menor que 10%; já, a correlação Elcioglu et al. (2018) prediz corretamente 77% dos dados de viscosidade dentro da faixa de erro de $\pm 15\%$; e, para a densidade, a correlação de Sharifpur et al. (2016) possui 100% dos dados experimentais dentro da faixa de erro de $\pm 15\%$.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNESP, Conselho Nacional de Tecnologia e Desenvolvimento Científico do Brasil (Proc. 458702/2014-5, 309848/2020-2 e 132258/2021-8) e FAPESP (Proc. 2013/15431-7 e 2019/02556-8).

REFERÊNCIAS

- Asadi, A., Asadi, M., Rezaianikolaei, A., Rosendahl, L. A., Afrand, M., Wongwises, S. (2018). Heat transfer efficiency of Al₂O₃-MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, 474-486.
- Chiam, H. W., Azmi, W. H., Usri, N. A., Mamat, R., Adam, N. M. (2017). Thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃ nanofluids for different based ratio of water and ethylene glycol mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 81, 420-429.
- Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P., Choi, S.U.S. (2005). Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement. *Applied Physical Letters*, 87, 1-3.
- Corcione, M. (2010). Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls. *International Journal of Thermal Science*, 49 1536-1546.
- Duan, F., Kwek, D., Crivoi, A. (2011). Viscosity affected by nanoparticle aggregation in Al₂O₃-water nanofluids. *Nanoscale Research Letters*, 6, 248.
- Einstein, A. Investigations on the Theory of the Brownian Movement. *Courier Corporation*, 1956.
- Elcioglu, E.B., Yazicioglu, A.G., Turgut, A., Anagun, A.S. (2018). Experimental study and Taguchi Analysis on alumina-water nanofluid viscosity. *Applied Thermal Engineering*, 128, 973-981.
- Esfe, M. H., Karimpour, R., Arani, A. A. A., Shahram, J. (2017). Experimental investigation on non-Newtonian behavior of Al₂O₃-MWCNT/5W50 hybrid nano-lubricant affected by alterations of temperature, concentration and shear rate for engine applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 82, 97-102.
- Eshgarf, H., Kalbasi, R., Maleki, A. et al. (2021). A review on the properties, preparation, models and stability of hybrid nanofluids to optimize energy consumption. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144, 1959-1983.
- Ho, C.J., Liu, W.K., Chang, Y.S., Lin, C.C. (2010). Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study. *International Journal of Thermal Science*, 49, 1345-1353.
- Jang, S. P., Lee, J. H., Hwang, K. S., Choi, S. U. (2007). Particle concentration and tube size dependence of viscosities of Al₂O₃-water nanofluids flowing through micro-and minitubes. *Applied Physics Letters*, 91(24), 243112.
- Khanafar, K., Vafai, K. (2011). A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54.
- Lee, S., Choi, S. U., Li, S., Eastman, J. A. (1999). Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. *ASME. Journal of Heat Transfer*. 1999; 121(2): 280-289.
- Li, Q., Xuan, Y., Wang, J. (2006). Measurement of the viscosity of dilute magnetic fluids. *International journal of thermophysics*, 27(1), 103-113..
- Maïga, S. E. B., Palm, S. J., Nguyen, C. T., Roy, G., Galanis, N. (2005). Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International journal of heat and fluid flow*, 26(4), 530-546.
- Maxwell, J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. 1, *Clarendon Press*, Oxford, 1873.
- Meybodi, M. K., Daryasafar, A., Koochi, M. M., Moghadasi, J., Meybodi, R. B., Ghahfarokhi, A. K. (2016). A novel correlation approach for viscosity prediction of water based nanofluids of Al₂O₃, TiO₂, SiO₂ and CuO. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 58, 19-27.
- Sharifpur, M., Tshimanga, N., Meyer, J.P., Manca, O. (2017). Experimental investigation and model development for thermal conductivity of α -Al₂O₃-glycerol nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 85, 12-22.
- Sharifpur, M., Yousefi, S., Meyer, J. P. (2016). A new model for density of nanofluids including nanolayer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78, 168-174..
- Sundar, L. S., Sharma, K. V., Naik, M. T., Singh, M. K. (2013). Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 670-686.
- Tavman, I., Turgut, A., Chirtoc, M., Hadjov, K., Fudym, O., & Tavman, S. (2010). Experimental study on thermal conductivity and viscosity of water-based nanofluids. *Heat transfer research*, 41(3).
- Teng, T. P., Hung, Y. H. (2014). Estimation and experimental study of the density and specific heat for alumina nanofluid. *Journal of Experimental Nanoscience*, 9(7), 707-718.
- Xian, H. W., Sidik, N. A. C., Saidur, R. (2020). Impact of different surfactants and ultrasonication time on the stability and thermophysical properties of hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 110, 104389.

9 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo incluído neste artigo.

ANALYSIS OF PREDICTION METHODS OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF NANOFLUIDS

Lucas Amadio da Silveira¹

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista/Câmpus de São João da Boa Vista, Av. Profa. Isette Correa Fontão, 505 - Jardim das Flores, São João da Boa Vista – SP, 13876-750

l.silveira@unesp.br

Elaine Maria Cardoso^{1,2}

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista/Câmpus de São João da Boa Vista, Av. Profa. Isette Correa Fontão, 505 - Jardim das Flores, São João da Boa Vista – SP, 13876-750

²UNESP - Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira.

elaine.cardoso@unesp.br

Abstract. *Due to the advancement of technology and the growth in power demand, it is necessary to search for fluids capable of dissipating more heat. The application of nanofluids is important in several areas: nuclear reactors and micro and macro electronic component cooling, among others. Due to their high thermal conductivity, nanofluids can increase heat transfer in microchips and even minimize the size and inventory of refrigerants used and, consequently, the costs of cooling devices. The incorporation of nanoparticles in a base fluid changes thermophysical properties such as thermal conductivity and viscosity, which affect heat transfer. There are many conflicting reports about the influence of parameters on thermophysical properties and, consequently, different methods or correlations for predicting nanofluids' thermal conductivity and viscosity. This work involved an extensive literature review on the methods of preparing nanofluids, evaluating the stability of these nanofluids, and predicting thermophysical properties such as thermal conductivity and dynamic viscosity. The two-step method is more economical to produce nanofluids on a large scale, but stabilization techniques such as ultrasonic agitation or the addition of appropriate surfactants are often used to minimize particle agglomeration and improve dispersion behavior. Based on an extensive experimental database obtained from the literature and through comparison with existing prediction methods, it was possible to indicate which models can satisfactorily predict effective thermophysical properties, such as thermal conductivity and dynamic viscosity, with an average error smaller than 10% and with 89% of the database within in the error range of $\pm 15\%$.*

Keywords: Nanofluids, thermophysical properties, correlation, experimental database.