

DESEMPENHO TÉRMICO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE ARREFECIMENTO AUTOMOTIVO
OPERANDO COM NANOFLUIDOS DE PRATA-PVP/H₂O-EG

Edwin Martín Cardenas Contreras – cardenas.emc@gmail.com

Erick Oliveira do Nascimento – erick.nascimento@ufu.br

Enio Pedone Bandarra Filho – bandarra@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, <http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/>

R1 – Sistemas, Equipamentos e componentes

Resumo. Este trabalho apresenta os resultados experimentais sobre desempenho térmico de dispersões de nanofluidos de prata (Ag) - polivinilpirrolidone (PVP) em água-etilenoglicol (50:50) para sua aplicação em sistemas de arrefecimento automotivo. O método de síntese de dois passos por homogeneização de alta pressão foi usado para dispersar as nanopartículas de prata no fluido base. Foram avaliadas experimentalmente as propriedades termofísicas como condutividade térmica e viscosidade dinâmica. Para os resultados de transferência de calor foi feita uma montagem experimental composta por um túnel de vento que simula o escoamento de ar no trocador de calor automotivo e um banho termostático que simula carga térmica que o motor transfere para o fluido de arrefecimento. Foi avaliada a influência de parâmetros como concentração variando entre 0,001 - 0,003 vol.% e temperatura de entrada 80 – 90°C. A velocidade de ar foi mantida constante a 2 m/s e a vazão mássica do líquido de arrefecimento variou de 80 até 95 g/s. Verificou-se um ligeiro aumento na taxa de transferência de calor, até 3,07%, para a amostra de maior concentração. Por outro lado, como o aumento da concentração de nanopartículas, observou-se um aumento médio relativo próximo de 3% na queda de pressão para os nanofluidos testados.

Palavras-chave: Nanofluidos, condutividade térmica, viscosidade dinâmica, refrigeração automotiva, surfactante

1. INTRODUÇÃO

Atualmente na indústria automobilística, busca-se projetar automóveis com maior potência, melhor desempenho e com componentes cada vez menores. Consequentemente, aumentou-se a atenção no desenvolvimento de melhores sistemas de troca de calor e de fluidos de arrefecimento (Bharadwaj et al., 2018). Nesta área de aplicação, o radiador é um dos trocadores de calor mais utilizados para melhorar o desempenho dos motores de combustão interna, através do resfriamento dos seus componentes. Para aumentar eficiência e a taxa de transferência de calor global, utilizam-se diversas técnicas, como as ativas e passivas. Os fluidos térmicos mais utilizados em radiadores automotivos são a água, etilenoglicol (EG), óleo, além da mistura de água e EG, as quais atuam também como anticongelantes em componentes mais frios ou até mesmo em partes mais quentes, dependendo das condições climáticas, além disso, estes fluidos atuam como lubrificantes, porém, devido à baixa condutividade térmica, apresentam menor troca de calor e por consequência, maior área de superfície do radiador (Abbas et al., 2020). Com o surgimento da nanotecnologia, (Choi e Eastman, 1995) conseguiram sintetizar materiais de escala nanométrica e dispersá-los em um fluido base como os descritos anteriormente e aumentar a condutividade térmica, produzindo os chamados nanofluidos.

Nas últimas duas décadas pesquisas têm sido desenvolvidas com a finalidade de aumentar a condutividade térmica de fluidos utilizados em trocas térmicas com a adição de nanopartículas. O incremento da condutividade térmica é diretamente influenciado por fatores como a concentração volumétrica de nanopartículas, o tipo de nanopartícula e de fluido de base, utilização de agentes dispersantes, morfologia, temperatura, dentre outros fatores.

Atualmente, o fator que limita a aplicação dos nanofluidos em sistemas térmicos é a sua estabilidade. Por esse motivo, diferentes pesquisas vêm sendo feitas na tentativa de obter nanofluidos estáveis fazendo uso de agentes dispersantes (Guo et al., 2017), (Hormozi et al., 2016). Devido ao movimento browniano das nanopartículas dispersas no fluido, existe uma interação entre elas e as moléculas do fluido que as circundam. Em seus estudos (Branson et al., 2013) concluíram que as nanopartículas devem estar bem dispersas e estáveis no fluido base, mas para atingir esse objetivo, algumas técnicas de tratamento da superfície das nanopartículas ou o uso de surfactantes, se faz necessário para se obter dispersões coloidais de alta qualidade. Recentemente (Ilyas et al., 2017) verificaram também o uso de surfactante pode auxiliar fortalecendo a interação entre nanopartículas e líquido, melhorando assim a sua estabilidade.

A seleção do surfactante adequado tem uma importância significativa para as características dos nanofluidos. Dodecilsulfato de sódio (SDS), polivinilpirrolidona (PVP), dodecilbenzeno sulfonato de sódio (SDBS) e a goma arábica são os surfactantes mais utilizados para dispersar nanopartículas em muitos fluidos comerciais e também em nanofluidos. Embora a adição de surfactante seja uma maneira eficaz de aumentar a dispersibilidade das nanopartículas, a não afinidade do surfactante com o fluido base ou concentrações altas de surfactante pode comprometer o desempenho térmico dos nanofluidos (Chen et al., 2008).

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar experimentalmente o desempenho térmico de nanofluidos de Prata/PVP em água-etilenoglicol (50:50) operando em um radiador automotivo. A vazão mássica (\dot{m}) foi variada na faixa de 80-95

g/s e a temperatura de entrada de 80 a 90 °C e a concentração de nanopartículas de 0,001% a 0,003%. Além disso, as propriedades termofísicas como condutividade e viscosidade dinâmica foram medidas experimentalmente.

2. METODOLOGIA

2.1 Síntese de nanofluidos

Para a realização da síntese dos nanofluidos, utilizou-se a metodologia de dois passos, em que as nanopartículas de prata de 20 nm de diâmetro foram adquiridas na Nanostructured & Amorphous Materials e posteriormente diluídas em uma mistura de H₂O/EG (50:50), de modo a garantir as concentrações desejadas, cujas características estão descritas na Tab 1. O surfactante polivinilpirrolidona (PVP), presente na nanopartícula possui uma fração 3:1, conforme os dados disponibilizados pelo fabricante.

Tabela 1. Propriedades físicas das nanopartículas de prata

Tamanho	20 [nm]
Pureza	99%
Concentração em massa de nanopartículas	25% wt.
Massa específica da nanopartícula	10400 [kg/m ³]
Calor específico da nanopartícula	0,240 [kJ/kgK]
Condutividade térmica da nanopartícula	430 [W/mK]

Os nanofluidos foram preparados pelo método de homogeneização por alta pressão, de forma similar ao realizado por (Cárdenas Contreras et al., 2019), em que a mistura é pressurizada através de pistões, e depois é direcionado a uma câmara de interação. Nessa câmara, a combinação de elevadas taxas de cisalhamento, energia de cavitação induzida por grandes gradientes de pressão e impactos da mistura com as paredes são responsáveis por quebrar as aglomerações de nanopartículas, deixando-as dispersas de forma homogênea no fluido base. A Tabela 2 apresenta a concentração final das amostras após análises gravimétricas por evaporação, obtida a partir de várias medições realizadas com pequenas quantidades de volume para cada concentração preparada.

Tabela 2. Concentração final obtida para as amostras

Amostra	Concentração em volume [vol.%]
Ag-PVP 1	0,01
Ag-PVP 2	0,02
Ag-PVP 3	0,03

Além do processo descrito acima, as amostras foram submetidas a 40 minutos de vibração ultrassônica com o intuito de melhorar a estabilidade dos nanofluidos. A análise de estabilidade foi feita visualmente, e pôde-se observar que após 30 dias não foram notadas nenhuma sedimentação, conforme está ilustrado na Fig. 1

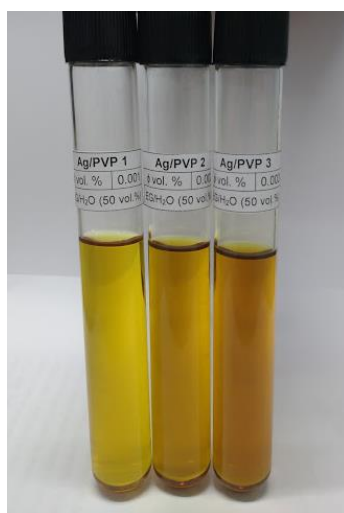


Figura 1. Amostras de nanofluido 1h após a preparação

2.2 Caracterização dos nanofluidos

A condutividade térmica das amostras foi medida com o auxílio do sensor Linesis THB-1, mostrado na Fig. 2a, que opera pelo princípio da ponte quente transiente. Este sensor usa um método de fonte de calor plana que pode ser considerado como uma evolução do fio quente transiente, pois, a medição pode ser realizada mais rápida, indiretamente e independentemente do operador e nenhuma calibração ou amostra de referência é necessária, além de apresenta maior precisão e curta duração. O método da ponte quente apresenta uma incerteza de medição de $\pm 2\%$ de acordo com o fabricante, e o desvio para cada medição foi de 2,4%. As amostras de nanofluido são colocadas em câmara de aço inoxidável (volume de 10 ml) a qual é ligada ao banho térmico para manter a temperatura constante. As medições foram realizadas em uma faixa de temperatura de 25 ° C a 55 ° C. O equipamento usado para medir a condutividade térmica é mostrado na Fig. 3. O método do fio quente transiente, é tradicionalmente utilizado por muitos pesquisadores, porém, acompanha várias implicações que podem interferir nos resultados, tais como a perda de calor entre os condutores elétricos, baixa sensibilidade entre temperatura e tensão de saída do sensor e alta sensibilidade a tensão mecânica. O método da ponte quente transiente elimina parcialmente essas desvantagens aumentando a sensibilidade do sinal à temperatura devido à construção de uma ponte entre os pequenos resistores elétricos, que forma um condutor plano. Este condutor é dividido em dois resistores, de comprimentos diferentes, que resultam numa única fonte de calor.

A viscosidade dos nanofluidos foi medida pelo viscosímetro Anton Paar SVM 3000, mostrado na Fig. 2b. O viscosímetro é dotado de um rotor que gira livremente sem atrito, em que a determinação da viscosidade é obtida na medição de parâmetros como torque e velocidade. A pequena célula de medição da viscosidade dinâmica contém um tubo em rotação com velocidade constante, o qual é preenchido com a amostra. Um outro tubo possui um ímã integrado (rotor) que flutua na amostra e gira livremente sem atrito. Devido à baixa densidade do rotor, ele é mantido centrado pela força centrífuga. O pequeno volume de amostra (~2,5 ml) permite mudanças extremamente rápidas de temperatura (por efeito Peltier) e tempos de estabilização muito curtos. A viscosidade dinâmica é calculada a partir da velocidade do rotor.



Figura 2. Equipamento de medição de propriedades termofísicas. (a) conductivímetro Linesis THB-1, (b) viscosímetro SVM-3000 da Anton Paar.

No presente estudo, condutividade térmica, (k), e viscosidade, (μ), foram medidos experimentalmente, enquanto o calor específico (C_p), e massa específica, (ρ), foram calculados com base em relações de massa e equilíbrio de energia (Eqs.1-2), a partir da literatura, propostas por (Pak e Cho, 1998) e (Xuan e Roetzel, 2000) como se segue:

$$(c_p \cdot \rho)_{nf} = \varphi \cdot (c_p \cdot \rho)_{np} + (1 - \varphi) \cdot (c_p \cdot \rho)_{fb} \quad (1)$$

$$\rho_{nf} = \varphi \cdot \rho_{np} + (1 - \varphi) \cdot \rho_{fb} \quad (2)$$

em que os subscritos fb, nf e np representam fluido de base, nanofluido e nanopartículas, respectivamente.

3. BANCADA EXPERIMENTAL

Na Figura 3. está ilustrado o desenho esquemático da bancada experimental utilizada para avaliar o desempenho térmico de nanofluidos em radiadores, a qual é composta por dois circuitos principais: um circuito do líquido de arrefecimento (vermelho) e o circuito do lado do ar (azul).

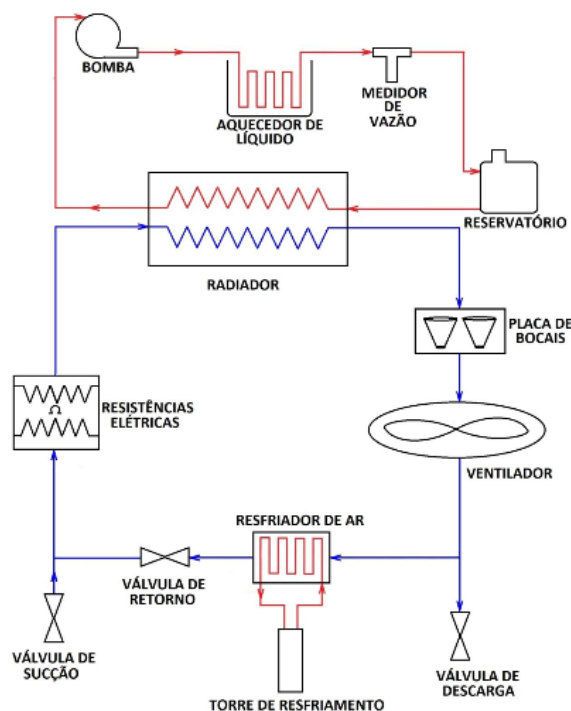


Figura 3. Diagrama esquemático da bancada experimental. Adaptada de (Oliveira et al., 2016)

O circuito do líquido de arrefecimento conta com uma bomba de engrenagens em conjunto com um inversor de frequência que permite o controle da vazão mássica do líquido bombeado a elevadas temperaturas. O líquido de arrefecimento circula por uma serpentina de cobre imersa no fluido do banho térmostático, aquecendo-o, simulando dessa forma, a carga térmica gerada por um motor automotivo. A temperatura do banho termostático é controlada através de um termostato ligado a uma resistência elétrica. A temperatura do líquido de arrefecimento foi medida na entrada e na saída do radiador, usando dois sensores do tipo RTD (do inglês: *Resistance Temperature Detector*). A pressão do fluido foi medida usando um transdutor diferencial de pressão (0 - 50 kPa), conectado paralelamente a bomba. A vazão mássica do fluido foi medida por um medidor do tipo Coriolis, da empresa Metroval, modelo RHM-6. Esse equipamento é preciso e pode medir numa faixa de vazão de 0 - 0,160 kg/s.

O circuito do ar conta com um túnel de vento onde circulação do ar é induzida por um ventilador centrífugo com capacidade para fornecer uma vazão de até 10000 m³/h, onde a frequência de operação é controlada por um inversor de frequência. Para medição da vazão mássica a bancada conta com uma placa de bocais dispostos de acordo com a norma (Ashrae Standard 41.2, 1987), A partir do diferencial de pressão nos bocais e das propriedades de ar conhecidas, a vazão mássica é calculada através a Eq.3:

$$\dot{m}_{ar} = \sum_{i=1}^n Cd_i \cdot \frac{A_i \sqrt{2 \cdot \rho_{ar} \cdot \Delta P_{ar}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_i}{A_t}\right)^2}} \quad (3)$$

onde Cd_i é o coeficiente de descarga para cada bocal, A_i representa a área do bocal i medida na descarga do mesmo, A_t é a área total do pleno onde a placa de bocais está instalada e, ρ_{ar} e ΔP_{ar} representam a massa específica do ar e a queda de pressão do ar ao passar pelo bocal.

A temperatura na seção de testes é controlada com o auxílio de um conjunto de resistências elétricas fixadas a montante da seção de testes. Esse conjunto de resistências possui uma potência nominal de 6 kW e está conectado a um conversor de potência, que controla a potência dissipada entre zero e a potência nominal. A temperatura do ar foi medida através de duas grades de 16 termopares cada, a montante e a jusante do radiador, obtendo uma distribuição média da temperatura em cada seção. Além disso, foi realizada também a medição da temperatura de bulbo úmido a fim de caracterizar possíveis mudanças nas propriedades físicas do ar ao longo da seção de testes. Um termo-higrômetro foi posicionado na entrada do túnel de vento, sendo esse sensor capaz de fornecer também a medição da umidade relativa, ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco.

A bancada experimental conta com um sistema de aquisição de dados com da chassi NI Compact cDAQ-9178XT da NATIONAL INSTRUMENTS, que possui 8 módulos de expansão instalados, responsáveis por coletar os sinais necessários ao monitoramento, supervisão e controle das grandezas físicas envolvidas. As incertezas das variáveis medidas ou parâmetros primários são fornecidas pelos fabricantes dos instrumentos utilizados nas medições das grandezas. Assim, a Tab. 3. apresenta as incertezas destes equipamentos. É importante ressaltar que o intervalo de confiança adotado para as incertezas nas variáveis independentes foi de 95%. A análise de incertezas dos parâmetros secundários ou calculados foi determinada diretamente pelo software ESS, que fundamenta seus cálculos no método sugerido por (Taylor e Kuyatt, 1994).

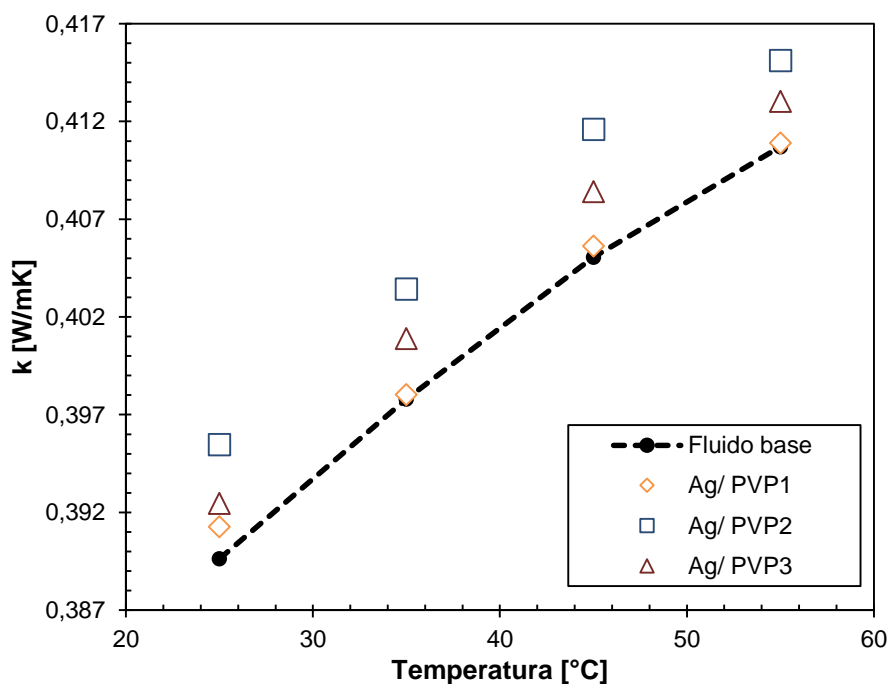
Tabela 3. Incerteza das medições experimentais

Variável	Parâmetro	Incerteza
Temperatura	(T_{in}, T_{out})	$\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$
Vazão mássica do fluido de arrefecimento	\dot{m}_{liq}	$\pm 0.15\%$
Pressão diferencial nos bocais	ΔP_{air}	$\pm 0.075\%$
Vazão mássica do ar	\dot{m}_{air}	$\pm 0.018 \text{ kg/s}$
Taxa transferência de calor	\dot{Q}	$\pm 3\%$

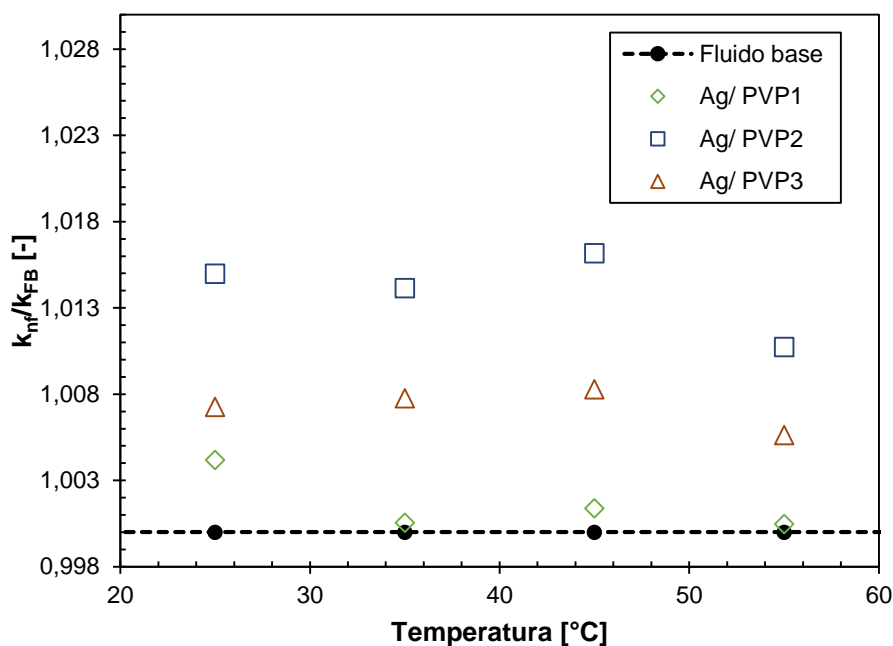
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos nanofluidos e do fluido base foram aferidas utilizando o sensor Linesis THB-1, o qual opera pelo método da ponte quente transiente, cuja faixa de temperatura dos testes foi de 25°C a 55°C . De modo a assegurar uma melhor confiabilidade dos resultados, os testes foram repetidos 10 vezes para cada temperatura. Os valores de condutividade térmica do fluido base foram verificados com valores teóricos tabelados, sendo que um desvio máximo de 3% foi observado.



(a)



(b)

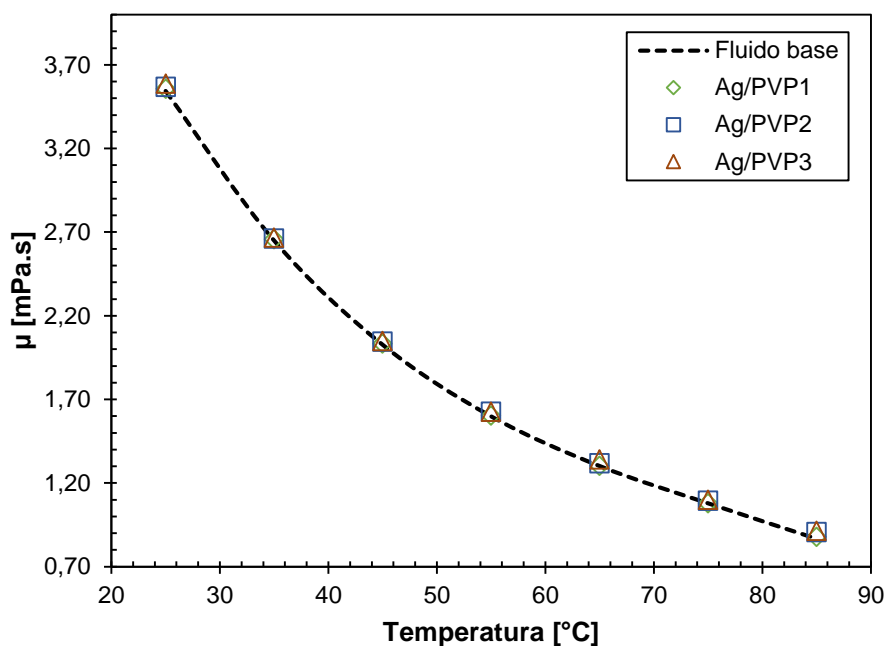
Figura 4. Condutividade térmica das amostras de nanofluidos. (a) experimental, (b) relativa.

Está ilustrado na Fig. 4 a condutividade térmica obtida para os nanofluidos prata. O maior aumento na condutividade térmica foi cerca do 1,7% para a concentração de 0,002 vol% a uma temperatura de 45 °C. Para a amostra Ag/PVP1 contendo uma concentração de nanopartículas de 0,001 vol.% o seu comportamento foi similar ao nanofluido para temperaturas acima de 25 °C. De igual maneira, para a amostra Ag/PVP3 foi observado uma tendência de aumento de em média 0,7%, além disso, identificou-se que mesmo com uma concentração de nanopartículas superior à amostra Ag/PVP2 os incrementos na condutividade térmica foram menores. Isto provavelmente provocado pela maior quantidade de surfactante na amostra, pois, segundo o (Xia et al., 2014) existe uma concentração ótima de surfactante, na qual a condutividade térmica e estabilidade do nanofluido são superiores às demais concentrações. Alguns pesquisadores como (Angayarkanni e Philip, 2013) e (Iyahraja e Rajadurai, 2015) chegaram a relatar redução da condutividade térmica das amostras preparadas em função do aumento da quantidade de surfactante adicionado acima da ideal.

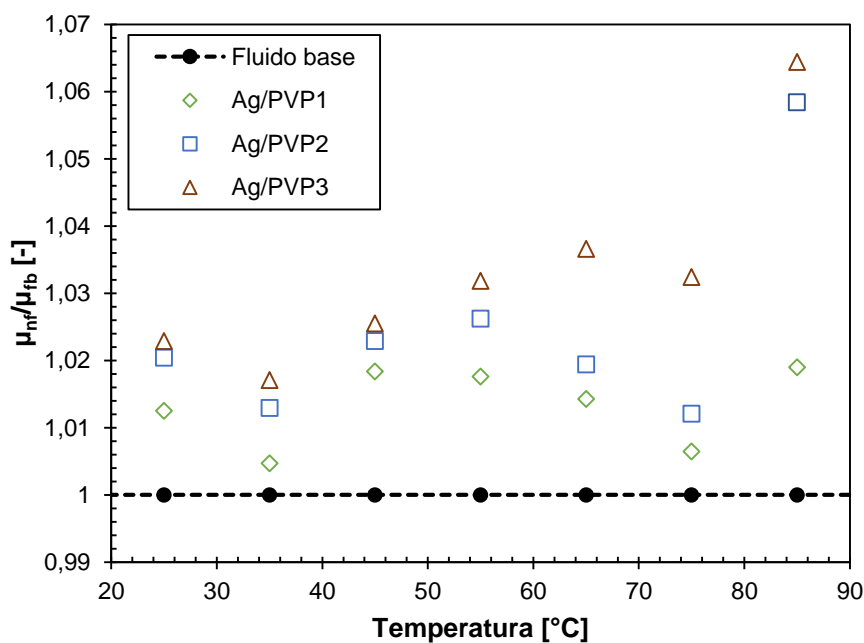
4.2 Viscosidade dinâmica

A viscosidade dinâmica dos nanofluidos e do fluido base foram medidas experimentalmente com o auxílio do viscosímetro rotacional Stabinger SVM 3000 da Anton Paar. Os resultados obtidos para o fluido base foram conferidos com os valores teóricos, exibindo um desvio máximo de 4,3%.

A Figura 5 mostra que a viscosidade dos fluidos analisados diminuiu com o aumento da temperatura, como era de se esperar, pois, o aumento na temperatura enfraquece as forças adesivas entre as moléculas de fluido, sendo necessária uma menor força para cisalhar as moléculas de fluido. Na Fig. 4.6, fica claro que aumentar a concentração de nanopartículas provocou um aumento na viscosidade do nanofluido. Esse efeito é percebido para todas as temperaturas analisadas, se tornando mais pronunciável com o aumento da temperatura. Contudo, para a amostra Ag/PVP3 os incrementos na viscosidade não foram tão pronunciáveis, com um máximo de 6,6% a 85 °C. Desta forma, pôde-se inferir que para esta propriedade os nanofluidos analisados neste trabalho apresentam um comportamento semelhante ao do fluido base.



(a)

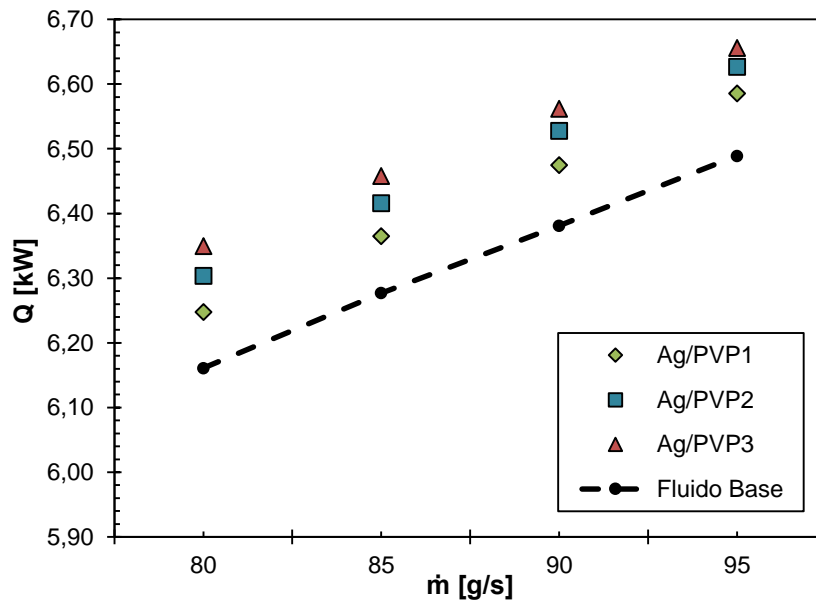


(b)

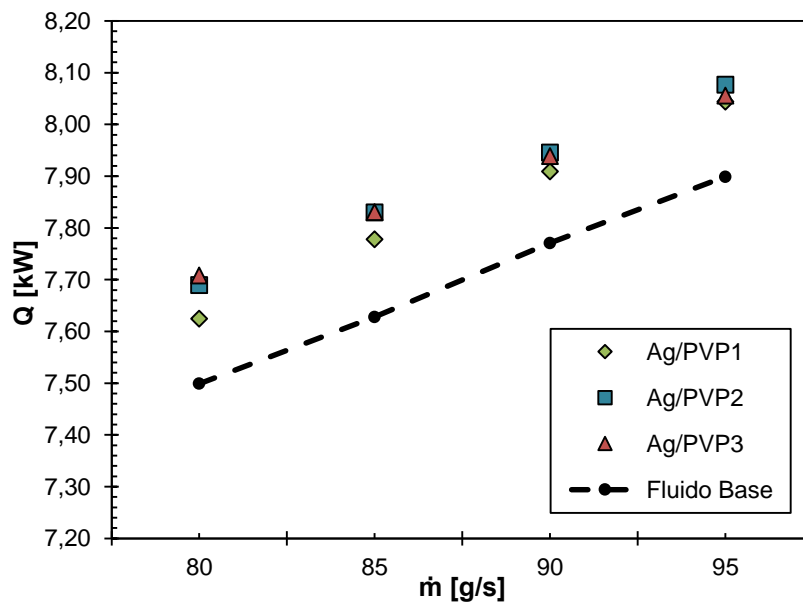
Figura 5. Viscosidade dinâmica das amostras de nanofluidos. (a) experimental, (b) relativa.

4.3 Transferência de calor

Os resultados para a taxa de transferência de calor relativa das amostras produzidas, são exibidos na Fig. 6. Observou-se uma tendência de incremento na taxa de transferência de calor para todas as amostras de Ag/PVP testadas foi observada. No entanto, com o aumento na temperatura, os valores relativos para a taxa de transferência de calor são afetados negativamente. A amostra Ag/PVP3 com o aumento de 3,07% para uma temperatura de 80 $^{\circ}\text{C}$, mostrou ser o nanofluido com maior aumento na taxa de transferência de calor relativa. As amostras Ag/PVP1 e Ag/PVP2 tiveram um incremento de em média 0,8% e 1,75%, respectivamente. A 90 $^{\circ}\text{C}$, foi observado um incremento máximo de 2,79%, cujo valor é inferior aos demais testes em temperaturas mais baixas, indicando uma possível deterioração da estabilidade com o aumento da temperatura. Com o aumento da vazão, as amostras exibiram uma taxa de transferência de calor relativa cada vez mais similar, próximas a 2%.



(a)

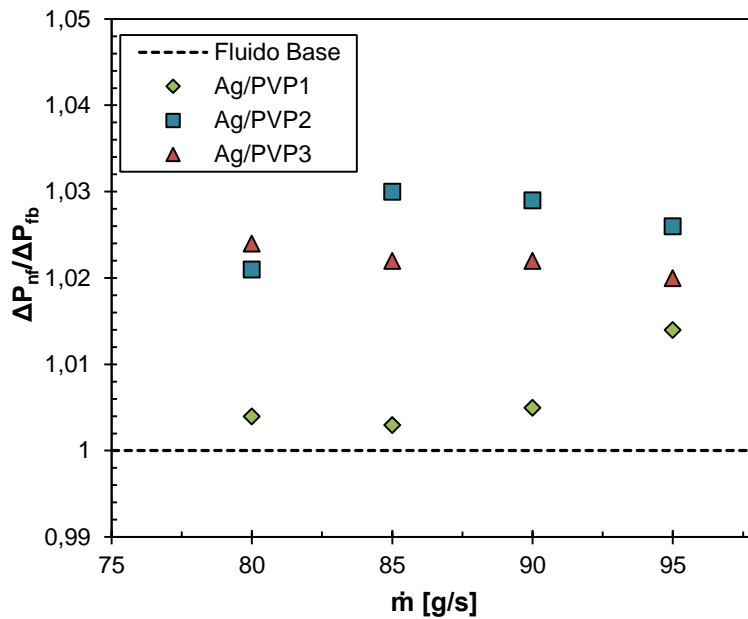


(b)

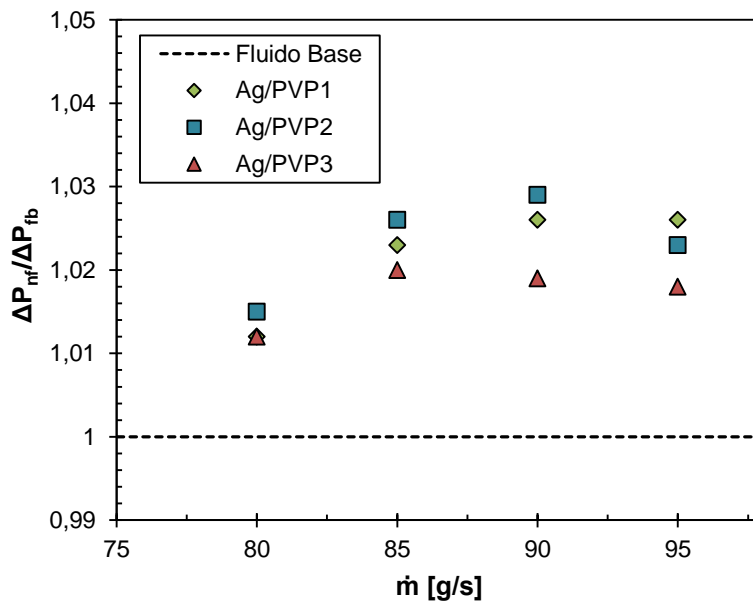
Figura 6. Resultados experimentais para taxa de transferência de calor. (a) 80 °C, (b) 90 °C

4.4 Queda de pressão

Está ilustrado na Fig. 7 os resultados experimentais para perda de carga das amostras de Ag/PVP. Os resultados exibiram um aumento na perda de carga para nanofluidos quando a concentração de nanopartículas foi aumentada. Do mesmo modo, e para a mesma vazão mássica, as amostras de nanofluidos Ag/PVP2 e Ag/PVP3 exibiram uma diminuição na perda de carga quando a temperatura foi aumentada de 80 °C para 90 °C, cujo efeito pode ser atribuído à diminuição na viscosidade dinâmica dos fluidos. Já para a amostra Ag/PVP1 a perda de carga relativa apresentou um comportamento levemente acima do fluido base em toda a faixa de temperatura analisada



(a)



(b)

Figura 7. Resultados experimentais para queda de pressão. (a) 80 °C, (b) 90 °C

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades termofísicas e o desempenho térmico de nanofluidos de prata/PVP em uma solução de água e etilenoglicol (50:50) para radiador automotivo. A análise dos resultados experimentais permitiu as seguintes conclusões:

- Dentre as três concentrações analisadas, identificou-se que aumentar a concentração não provocou uma melhoria significativa na condutividade térmica. O incremento máximo desta propriedade foi de 1,7% para a amostra Ag/PVP2, seguido das outras que tiveram comportamento similar ao fluido base.
- A viscosidade dos nanofluidos foi superior à do fluido base para todas as temperaturas analisadas, exibindo um aumento máximo de cerca de 6,6% a 85°C. Aumentar a concentração resultou em incrementos na viscosidade em toda a faixa de temperatura dos testes, sendo esse efeito mais pronunciável em elevadas temperaturas.
- Para todas as condições de testes avaliadas, os nanofluidos exibiram uma taxa de transferência de calor superior à do fluido base, além disso, foi observada uma tendência de melhoria dos resultados com o aumento da concentração, chegando a obter uma tendência de aumento máxima de 3,07%, obtido à 80 °C para Ag/PVP3.
- Foi possível perceber que o aumento da concentração não necessariamente provocou aumentos na perda de carga, sendo que para a maioria dos testes, os nanofluidos Ag/PVP2 exibiram maior perda de carga se comparado aos demais fluidos. O aumento máximo ficou próximo do 3%.

- De modo geral, os nanofluidos exibiram comportamento similar ao fluido base. Portanto, os resultados podem ser classificados como não promissores, devido à baixa melhoria que os nanofluidos analisados trariam ao sistema de arrefecimento. Novos testes serão realizados com diferentes concentrações e tipo de surfactante.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte dado à pesquisa pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa - MG (FAPEMIG).

6. REFERENCIAS

- Abbas, F. et al. Nanofluid: Potential evaluation in automotive radiator. *Journal of Molecular Liquids*, v. 297, 2020.
- Angayarkanni, S. A.; Philip, J. Role of adsorbing moieties on thermal conductivity and associated properties of nanofluids. *Journal of Physical Chemistry C*, v. 117, n. 17, p. 9009–9019, 2013.
- ASHRAE STANDARD 41.2. Standard Methods for Laboratory Air-flow Measurement ANSI/ASHRAE Standard 41.2 American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1987.
- Bharadwaj, B. R. et al. CFD analysis of heat transfer performance of graphene based hybrid nanofluid in radiators. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 346, n. 1, 2018.
- Branson, B. T. et al. Nanodiamond nanofluids for enhanced thermal conductivity. *ACS Nano*, v. 7, n. 4, p. 3183–3189, 2013.
- Cárdenas Contreras, E. M.; Oliveira, G. A.; Bandarra Filho, E. P. Experimental analysis of the thermohydraulic performance of graphene and silver nanofluids in automotive cooling systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 132, 2019.
- Chen, L. et al. Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. *Thermochemica Acta*, v. 477, n. 1–2, p. 21–24, 2008.
- Choi, S. U. S.; Eastman, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in D.A Singiner, and Wang, H.P. (Eds.). ASME, New York, v. FED-231/MD, p. 99–105, 1995.
- Guo, J. et al. Tribological properties of ZnO and WS₂ nanofluids using different surfactants. *Wear*, v. 382–383, n. December 2016, p. 8–14, 2017.
- Hormozi, F.; Zarenezhad, B.; Allahyar, H. R. An experimental investigation on the effects of surfactants on the thermal performance of hybrid nanofluids in helical coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 78, p. 271–276, 2016.
- Ilyas, S. U.; Pandyala, R.; Narahari, M. Stability and thermal analysis of MWCNT-thermal oil-based nanofluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 527, n. May, p. 11–22, 2017.
- Iyahraja, S.; Rajadurai, J. S. Study of thermal conductivity enhancement of aqueous suspensions containing silver nanoparticles. *AIP Advances*, v. 5, n. 5, p. 1–9, 2015.
- Oliveira, G. A.; Cardenas Contreras, E. M.; Bandarra F., E. P. Experimental study on the heat transfer of MWCNT/water nanofluid flowing in a car radiator. *Applied Thermal Engineering*, v. 111, p. 1450–1456, 2016.
- Pak, B. C.; Cho, Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, v. 11, n. 2, p. 151–170, 1998.
- Taylor, B. N.; Kuyatt, C. E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results: Appendix D1. Terminology. National Institute for Standards and Technology, Gaithersburg, MD, p. D.1.1.2, 1994.
- Xia, G. et al. Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al₂O₃/de-ionized water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 84, p. 118–124, 2014.
- Xuan, Y.; Roetzel, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. v. 43, p. 3701–3707, 2000.

FORMAT INSTRUCTIONS FOR PAPERS SUBMITTED TO MERCOFRIO

Abstract. *This work presents the experimental results on the thermal performance of dispersions of silver nanofluids (Ag)-polyvinylpyrrolidone (PVP) in water-ethylene glycol (50:50) for its application in automotive cooling systems. The two-step synthesis method for high-pressure homogenization was used to disperse the silver nanoparticles in the base fluid. Thermophysical properties such as thermal conductivity and dynamic viscosity were evaluated experimentally. For the heat transfer results, an experimental assembly was made up of a wind tunnel that simulates the air flow in the automotive heat exchanger and a thermostatic bath that simulates the thermal load that the engine transfers to the coolant fluid. The influence of parameters such as concentration ranging from 0.001 - 0.003 vol.% and input temperature 80 - 90°C was evaluated. The air velocity was kept constant at 2 m/s and the cooling liquid mass flow rate varied from 80 to 95 g/s. There was a slight increase in the heat transfer rate, up to 3.07%, for the highest concentration sample. On the other hand, as the concentration of nanoparticles increased, there was a relative average increase of close to 3% in the pressure drop for the nanofluids tested.*

Keywords: Nanofluids, Thermal conductivity, dynamic viscosity, automotive cooling system, surfactant