

DESEMPENHO TÉRMICO EXPERIMENTAL DE UM RADIADOR AUTOMOTIVO OPERANDO COM NANOFLUIDOS DE NANOTUBO DE CARBONO (MWCNTs)

Edwin Martin 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, <https://posfemec.org/portal/home>

R1 – Sistemas, Equipamentos e Componentes

Resumo. Este trabalho investiga o desempenho térmico de nanofluidos de nanotubos de carbono (MWCNT) dispersos em uma mistura água-etilenoglicol (50:50) operando no interior de um radiador automotivo. Os nanofluidos foram preparados pelo método de síntese de dois passos em concentrações volumétricas de 0,025%, 0,05% e 0,1%. As propriedades termofísicas como condutividade térmica e viscosidade dinâmica foram medidas experimentalmente. O método de espectrofotometria UV-VIS foi usado para avaliar a estabilidade coloidal das amostras, relatando a relação absorvância-concentração conforme a lei de Beer-Lambert. O desempenho térmico dos nanofluidos foi avaliado variando a temperatura de entrada de 90 °C para 100 °C e a concentração de nanopartículas. A velocidade do ar no túnel de vento foi mantida constante a 2 m/s e a vazão mássica do fluido de arrefecimento variou de 0,09 kg/s a 0,10 kg/s. Os incrementos máximos para a taxa de transferência de calor e para o coeficiente global de transferência de calor foram de 3,7% e 4,2%, respectivamente. Os resultados demonstram que o aumento na concentração de nanopartículas pode melhorar a performance térmica do radiador, indicando o potencial uso de nanofluidos em sistemas de arrefecimento automotivo.

Palavras-chave: Nanofluido, Condutividade térmica, Radiador, Estabilidade, Transferência de calor

1. INTRODUÇÃO

Visando um desenvolvimento contínuo, a indústria automobilística tem empregado esforços para desenvolver motores cada vez mais potentes e econômicos. Consequentemente, uma melhoria do sistema de arrefecimento também se faz necessária para acompanhar essa evolução. Em um automóvel, o radiador é um trocador de calor que remove o calor absorvido por um líquido refrigerante durante sua passagem pelo bloco do motor. A temperatura de operação do motor deve ser controlada de modo a evitar falhas mecânicas nos materiais, por elevadas temperaturas de operação, e permitir uma boa eficiência de combustão, evitando-se um excesso de resfriamento. Para garantir essas condições, nos últimos anos diversos autores têm focado suas pesquisas em melhorar o desempenho térmico do radiador propondo o uso de fluidos de arrefecimento com propriedades termofísicas potencializadas. Esta classe de fluido, chamada por (Choi e Eastman, 1995), de “nanofluidos” são preparados a partir de suspensões coloidais de nanopartículas sólidas (tamanho < 100 nm) em fluidos de arrefecimentos convencionais. Trabalhos como os de (Sajid e Ali, 2019) e (Abbas et al., 2020) destacam que o uso de nanofluidos em sistemas de arrefecimento automotivo pode permitir a redução do tamanho e do peso do radiador, além de garantir uma melhor eficiência e menor consumo de combustível.

Para avaliação do desempenho de nanofluidos em sistemas de resfriamento automotivo, sob temperaturas e concentrações variadas, é necessário determinar as condições favoráveis para aumentar o coeficiente global de transferência de calor minimizando o gasto de energia de bombeamento. Diferentemente da maioria das aplicações encontradas na literatura, em que geralmente a água é utilizada como fluido base no preparo dos nanofluidos, em sistemas de arrefecimento automotivo também são usadas misturas de água e etilenoglicol (em variadas proporções) dado que a temperatura do fluido de arrefecimento pode atingir valores de até 110 °C.

O estado da arte mostra que a maioria dos trabalhos foram concentrados em sistemas com temperatura de operação, para o fluido de arrefecimento, abaixo de 90 °C. Desta forma, são limitadas as informações sobre a possível aplicação dos nanofluidos com temperaturas de operação próximas a um sistema de arrefecimento automotivo real. Apesar dos ganhos na transferência de calor, o aumento de temperatura pode afetar a estabilidade dos nanofluidos devido ao aumento da interação partícula-partícula (Chakraborty e Panigrahi, 2020).

O presente trabalho visa avaliar o desempenho térmico de nanofluidos em um radiador automotivo com temperaturas de trabalho do lado do fluido de arrefecimento entre 90 e 100 °C, de modo a considerar a possibilidade de substituir o fluido de arrefecimento convencional por nanofluidos. Nanopartículas de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT, do inglês Multi-Walled Carbon Nanotube) dispersas em uma mistura de água-etilenoglicol (50:50) como o fluido base foram testadas sob escoamento laminar. As concentrações volumétricas das nanopartículas utilizadas foram 0,025%, 0,05% e 0,1%. A estabilidade coloidal foi avaliada quantitativamente com espectrofotometria UV-VIS e as propriedades termofísicas como condutividade térmica e viscosidade dinâmica foram medidas experimentalmente.

2. METODOLOGIA

2.1 Preparação dos nanofluidos

Para preparação dos nanofluidos foi usado como fluido base uma mistura de água-etilenoglicol em uma proporção de 50:50 em volume. As nanopartículas de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT) (Lote:8048YJ) foram adquiridas da empresa Nanostructured & Amorphous e suas principais propriedades podem ser observadas na Tab. 1.

Tabela 1. Propriedades termofísicas para o fluido base e os nanotubos de carbono

Parâmetro	Água-etilenoglicol (50:50)	MWCNT
Diâmetro (nm)	[-]	50
Comprimento (µm)	[-]	20
Massa específica de nanopartículas (kg/m ³)	1071,11	2100
Calor específico das nanopartículas (kJ/kg·K)	3,300	0,710
Condutividade térmica das nanopartículas (W/m·K)	0,384	3000

*Os dados para o fluido base foram utilizados de acordo com (ASHRAE Standard, 2001).

O processo de preparação dos nanofluidos foi feito pelo método de dois passos, onde as nanopartículas foram pré-dispersas no fluido base usando um agitador ultrassônico (30 kHz à 100W, UP100H model) por um período de 60 minutos. Posteriormente as amostras foram introduzidas no homogeneizador de alta pressão (400 bar, Artepeças APL 50 L/h) por mais 60 minutos sob condições de temperatura controlada à 40 °C para evitar evaporação da amostra. Os dois procedimentos anteriormente mencionados permitem a quebra de aglomerados e uma distribuição uniforme das nanopartículas no fluido base, proporcionando assim uma estabilidade prolongada. As massas de nanopartículas e fluido base necessárias para obtenção das concentrações volumétricas desejadas para cada amostra foram calculadas através da Eq. 1.

$$\phi = \frac{m_{np}/\rho_{np}}{m_{np}/\rho_{np} + m_{fb}/\rho_{fb}} \quad (1)$$

em que m_{np} e ρ_{np} representam a massa e a densidade da nanopartícula, m_{fb} e ρ_{fb} representam a massa e densidade do fluido base.

Neste estudo, para analisar a influência da concentração volumétrica nas propriedades termofísicas e na transferência de calor, os nanofluidos foram preparados em três diferentes concentrações volumétricas de nanopartículas: 0,025%, 0,05% e 0,1%. A Tab. 2, apresenta os resultados da análise gravimétrica para as amostras de nanofluido preparadas. Pode-se observar que as concentrações obtidas apresentam concordância satisfatória com as quantidades desejadas.

Tabela 2. Concentração final obtida para as amostras de nanofluido

Amostra	Concentração volumétrica (vol.%)
MWCNT_1	0,026
MWCNT_2	0,052
MWCNT_3	0,107

Os resultados do processo de síntese e caracterização dos nanofluidos usados no presente trabalho são mostrados na Fig. 1. A Fig. 1 (b) mostra os nanofluidos após a preparação. A Fig. 1 (a) revela uma imagem MET das nanopartículas de nanotubos de carbono de parede múltipla tomadas usando microscópio eletrônico de transmissão (JEM-2100, JEOL Ltd.).

2.2 Estabilidade

A estabilidade dos nanofluidos foi avaliada usando um espectrofotômetro UV-Vis (Shimadzu; UV-1900). A metodologia proposta por (Jiang et al., 2003) permite obter uma análise quantitativa da estabilidade coloidal da amostra através da medição da absorvância em diferentes intervalos de tempo. Na Fig. (2a) é mostrada a curva de calibração para o pico de absorvância localizado no comprimento de onda de 262 nm. Nela percebe-se uma relação linear entre a absorvância e a concentração volumétrica de partículas, como relatado na lei de Beer-Lambert (Swinehart, 1962).

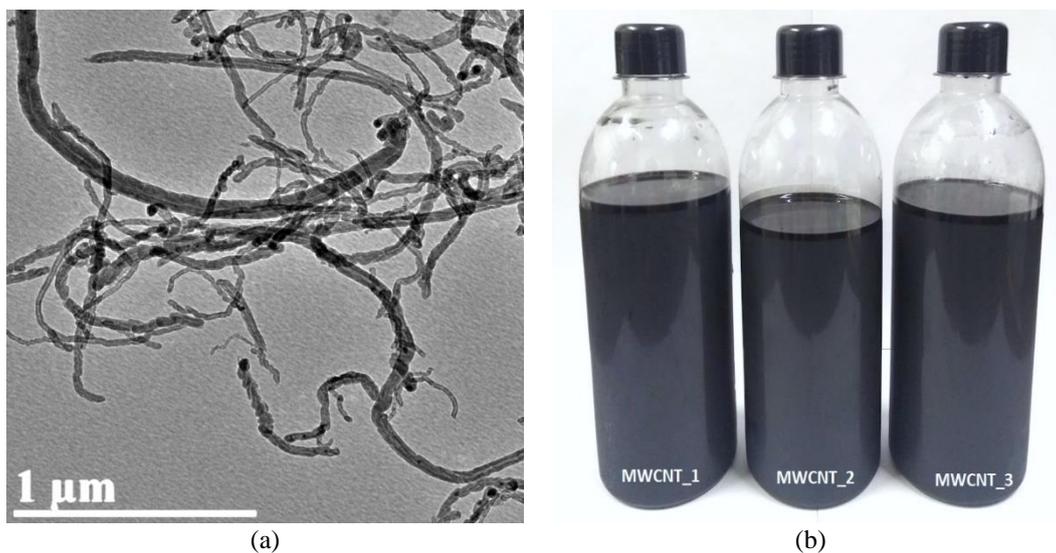


Figura 1. (a) Imagem SEM dos nanotubos de carbono, (b) Amostras de nanofluido MWCNT após a preparação

Na Fig. (2b) está ilustrada a variação da absorbância em um período de 15 dias para as amostras de nanofluido preparadas. A concentração relativa mínima alcançada no período avaliado foi de 0,95 indicando que houve uma sedimentação máxima de 5% para a concentração volumétrica de 0,05%. Estes resultados validaram uma boa estabilidade das amostras preparadas antes de sua utilização nos ensaios experimentais com o radiador automotivo.

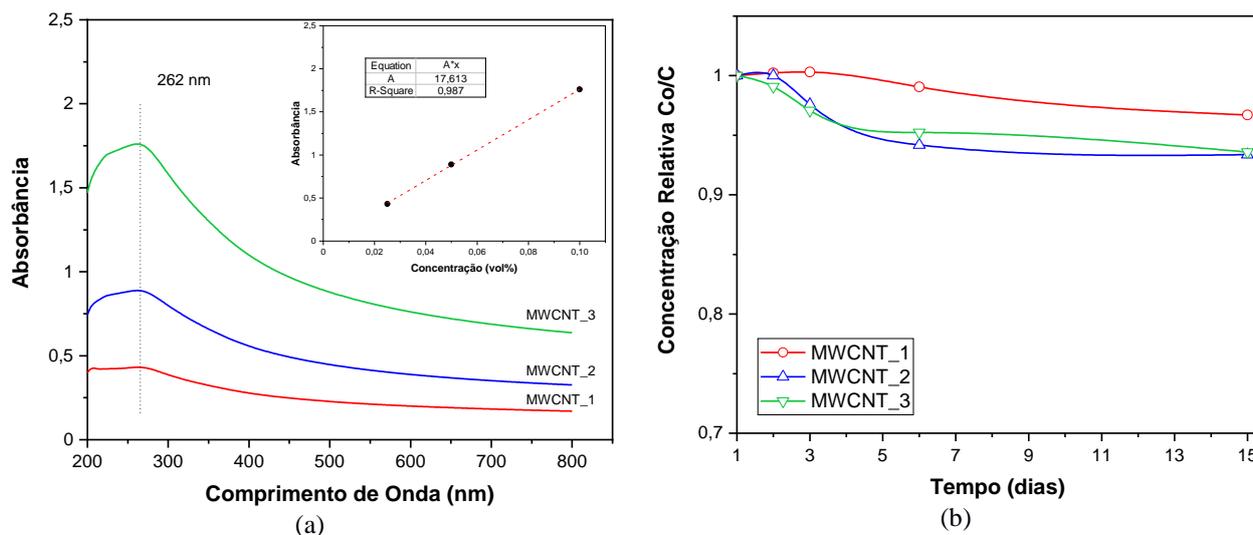


Figura 2. (a) Absorbância UV-VIS para as amostras de nanofluido. (b) Concentração relativa versus número de dias após a preparação

2.3 Propriedades termofísicas

A medição da condutividade térmica foi feita utilizando o analisador de propriedades térmicas THB-1 (Linseis Messgeraete, Germany). O equipamento utiliza a técnica da ponte quente transiente e possui uma faixa de medição de condutividade térmica de 0,1 a 1 W/m·K com incerteza inferior a 2%. As medições de condutividade térmica para as amostras de fluido foram realizadas em uma faixa de temperatura de 20 a 60°C com incrementos de 10 °C. A massa específica e a viscosidade dinâmica das amostras foram medidas usando o viscosímetro rotacional modelo Stabinger SVM 3000 da empresa Anton Paar. O princípio de medição de viscosidade é uma modificação do sistema Couette, baseado na medição de torque e da velocidade com alta resolução. O valor da massa específica é obtido conforme o princípio de oscilação de tubo em “U”. As medições foram realizadas na faixa de 20 – 100°C com incrementos de 10°C. De acordo com o fabricante, as incertezas de medição são de $\pm 0,35\%$ para viscosidade dinâmica e de $\pm 0,5 \text{ kg/m}^3$ para massa específica. Um maior detalhamento dos equipamentos de medição pode ser encontrado em (Cardenas Contreras et al., 2019).

No presente estudo a condutividade térmica (k), a viscosidade dinâmica (μ) e a massa específica (ρ), foram medidos experimentalmente, enquanto o calor específico (C_p), foi calculado com base na relação de massa e equilíbrio de energia (Eq.2), a partir da literatura proposta por (Pak e Cho, 1998) como se segue:

$$(C_p \cdot \rho)_{nf} = \phi(C_p \cdot \rho)_{np} + (1 - \phi)(C_p \cdot \rho)_{fb} \quad (2)$$

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

3. BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental representada na Fig. 3, é composta por dois circuitos principais: lado do ar e lado do líquido de arrefecimento. O primeiro é responsável por garantir a circulação de ar e controle das condições desejadas para velocidade e temperatura do ar incidente e o segundo é responsável pelo controle da vazão mássica e temperatura do fluido que escoar no interior do radiador automotivo. A medição da temperatura do ar foi realizada usando duas malhas de termopares, sendo uma à montante e a outra à jusante do radiador. O posicionamento dos termopares segue as recomendações da norma (ANSI/ASHRAE Standard 33, 2000). A temperatura de entrada do ar na seção de teste é controlada por intermédio de resistências elétricas, com potência de 6 kW, a montante da seção de testes. O circuito de ar também possui uma placa de bocais, a qual é utilizada para determinar a vazão de ar incidente conforme a norma (ANSI/ASHRAE Standard 41.2, 1987). Nesse método o escoamento sofre uma perda de carga ao passar pelo bocal, que pode ser correlacionada com a vazão de ar em circulação.

O circuito do líquido de arrefecimento conta com uma microbomba com capacidade de fornecer vazões de até 8 L/min em altas temperaturas. Para controle da temperatura do líquido de arrefecimento, o aparato experimental conta com um banho termostático, cuja temperatura é mantida homogênea e controlada por uma resistência de 12 kW ligada a um controlador PID digital e uma bomba para recirculação. O fluido de trabalho escoar no interior de uma serpentina imersa no banho termostático, o que permite obter valores controlados para uma temperatura de referência de até 100°C. Nas seções de entrada e saída do radiador, a linha de líquido possui sensores de temperatura tipo RTDs a fim de medir o diferencial de temperatura do fluido de arrefecimento. A vazão mássica do líquido de arrefecimento foi medida através de um medidor tipo Coriolis.

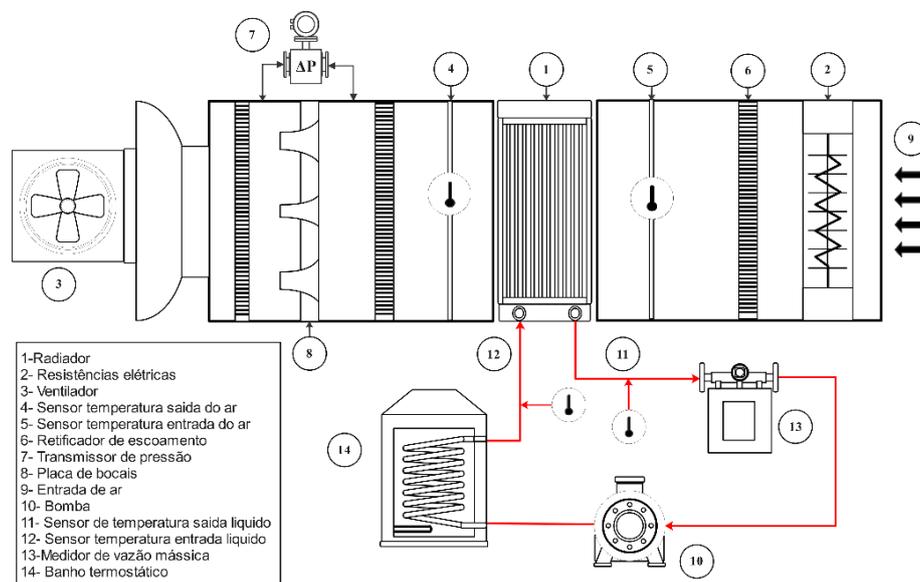


Figura 3. Diagrama esquemático bancada experimental. Adaptada de (Cardenas Contreras e Bandarra Filho, 2022)

A bancada experimental possui ainda um sistema de aquisição constituído de módulos acoplados a um chassi NI Compact cDAQ-9178XT que permite a medição dos dados de temperatura, pressão e vazão simultaneamente. Os dados adquiridos são então transferidos a um computador e por meio do software LabView® os sinais são visualizados, condicionados e armazenados para posterior análise. As incertezas das variáveis medidas ou parâmetros primários são fornecidas pelos fabricantes dos instrumentos utilizados nas medições das grandezas. A tabela 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.

Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza
Temperatura fluido de arrefecimento	10-120 °C	± 0,2 °C
Temperatura do ar	10-100 °C	± 0,3 °C
Pressão diferencial nos bocais	0-500 Pa	0,25 %
Vazão mássica do fluido de arrefecimento	0-0,3 kg/s	0,15 %

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Condutividade Térmica

Neste estudo foi avaliado o efeito da temperatura e da concentração volumétrica de nanopartículas na condutividade térmica dos nanofluidos, conforme ilustrado na Fig. 4. As amostras de nanofluido de nanotubos de carbono foram preparadas em concentrações volumétricas de 0,025%, 0,05 e 0,1% e a medição de condutividade térmica foi realizada para uma faixa de temperatura de 20 a 60 °C. Os incrementos obtidos da condutividade térmica com o aumento da temperatura nas amostras de nanofluido foram em média 2,7%, 3,7% e 6,4% para as amostras MWCNT_1, MWCNT_2 e MWCNT_3, respectivamente.

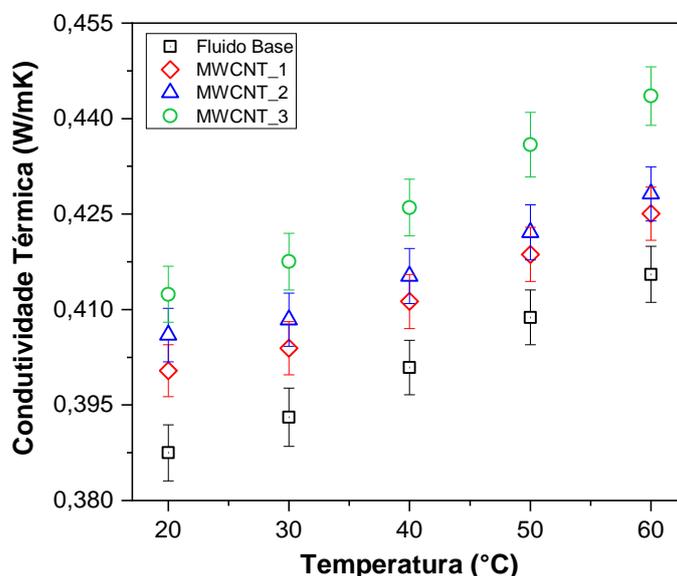


Figura 4. Condutividade Térmica das amostras de nanofluido

Autores como (Omrani et al., 2019) e (Sundar et al., 2014) mostraram que incrementos relativos são proporcionais ao aumento da temperatura. Segundo (Yu-Hua et al., 2008), a influência da temperatura no incremento da condutividade térmica dos nanofluidos pode ser explicada pela redução da energia superficial das nanopartículas, causando uma diminuição da viscosidade e intensificando o movimento browniano das nanopartículas. Em seu estudo também com nanotubos de carbono (Soltanimehr e Afrand, 2016) observaram pequenos aumentos na condutividade térmica similares aos obtidos no presente estudo. Para concentrações volumétricas menores que 0,1%, os autores descrevem uma intensificação ainda maior produzida pela maior interação entre as nanopartículas. Este efeito também foi destacado por (Adhami Dehkordi et al., 2017), mas limitado para concentrações volumétricas menores de 0,125%. Para maiores concentrações, os autores relatam que formação de cadeias de nanopartículas no fluido pode diminuir a relação superfície/volume, fazendo com que o aumento da condutividade térmica efetiva seja menos acentuado.

4.2 Viscosidade Dinâmica

A Fig. 5 apresenta os resultados experimentais da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido de nanotubos de carbono para uma faixa de temperatura de 20-100 °C. A viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido e do fluido base decresce exponencialmente com o aumento da temperatura. Uma redução média de 80% é atribuída principalmente aos enfraquecimentos das forças de adesão intermoleculares. De forma geral houve um aumento na viscosidade dinâmica dos nanofluidos quando a concentração de nanopartículas foi aumentada. Em média estes incrementos foram de 3%, 6% e 10% para as amostras MWCNT_1, MWCNT_2 e MWCNT_3, respectivamente. Em seu trabalho com nanotubos de carbono (Sandhu e Gangacharyulu, 2017), analisaram o comportamento da viscosidade de nanofluidos de MWCNT/água-

EG com uma concentração em volume de 0,1% para diferentes temperaturas, obtendo aumentos de em média 2%. Para concentrações similares de nanotubos de carbono, (Oliveira et al., 2021), relataram aumentos máximos de até 9.2%. (Ganesh Kumar et al., 2019), também observaram que a viscosidade dinâmica foi aumentada em 5% para nanofluidos de MWCNT/água-EG com concentrações volumétricas até 0,15%.

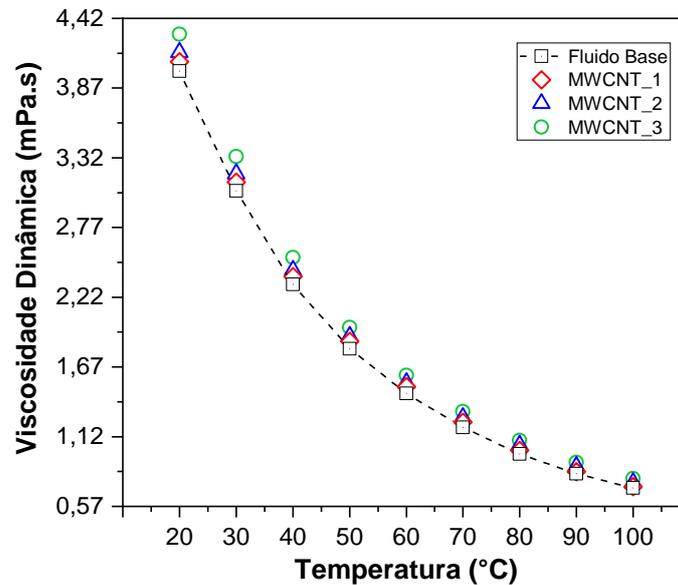


Figura 5. Viscosidade Dinâmica das amostras de nanofluido

4.3 Taxa de transferência de calor

Os resultados para a taxa de transferência de calor relativa das amostras produzidas, são exibidos na Fig. 6. Os experimentos foram conduzidos com a vazão mássica do líquido de arrefecimento de 0,9 kg/s até 0,11 kg/s e mantendo do lado do ar uma velocidade constante de 2 m/s. A temperatura de entrada do lado do líquido de arrefecimento foi variada de 90-100 °C e para o lado do ar foi mantida constante em 25 °C. A Fig. 6 (a) mostra os valores médios da taxa de transferência de calor em função da vazão mássica e temperatura de 90 °C. Nessas condições, o valor máximo observado para a amostra MWCNT_3 foi 3,7% maior que o valor obtido para o fluido base. Adicionalmente, a Fig. 6 (b) mostra os resultados da taxa de transferência de calor para a temperatura de entrada de 100 °C. De modo geral, a taxa de transferência de calor aumentou em função da temperatura de entrada mantendo constante a vazão mássica do nanofluido. No entanto, a taxa de transferência de calor relativa diminuiu quando comparada aos valores obtidos para 90 °C e 100 °C. Incrementos de até 2% para a amostra MWCNT_3 a 100°C mostram que o comportamento foi próximo ao do fluido base.

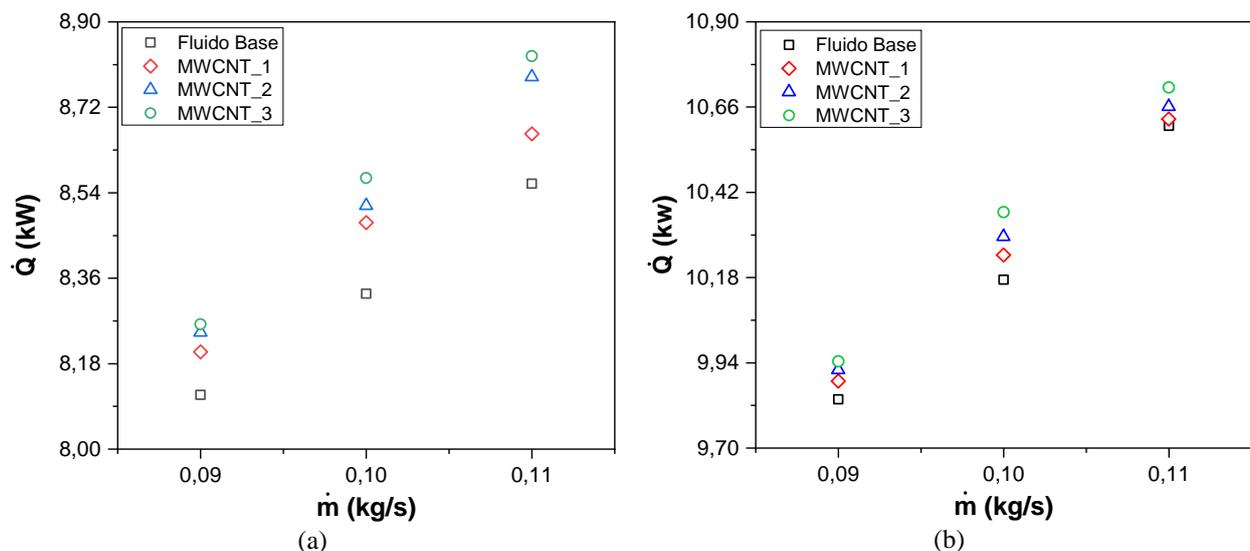


Figura 6. Taxa de transferência de calor para nanofluidos em várias concentrações e temperaturas (a) 90 °C (b) 100 °C

Diferentes trabalhos experimentais encontrados na literatura como (Kumar et al., 2018) e (Chaurasia et al., 2019) destacam um aumento significativo na taxa de transferência de calor quando as nanopartículas foram adicionadas ao

fluido base e a temperatura de entrada foi aumentada. (Sokhal et al., 2018), avaliaram nanofluidos de Al_2O_3 /água e observaram que quando a temperatura do nanofluido foi aumentada de 60 °C para 90 °C o coeficiente de transferência de calor relativo aumentou de 16% para 33%. (Elsaid, 2019), estudou nanofluidos de Co_3O_4 /água/EG e Al_2O_3 /água/EG em temperaturas de entrada de até 90 °C. O autor afirmou que a eficiência térmica pode ser aumentada com o incremento da temperatura de entrada do nanofluido, visto que ocorrem aumentos na condutividade térmica e há a diminuição da espessura da camada limite. Para concluir, (Abbas et al., 2020) comentaram que a transferência de calor é um parâmetro crucial que deve ser otimizado para uma melhor eficácia do radiador, motivo pelo qual efeitos de parâmetros importantes como a concentração volumétrica de nanopartículas, regime de escoamento e a temperatura de entrada devem ser considerados nas condições de aplicação.

4.4 Coeficiente global de transferência de calor

A Fig. 7 apresenta o coeficiente global de transferência de calor para os nanofluidos de MWCNT/água-EG em função da vazão mássica e da temperatura de entrada do fluido de arrefecimento. Pode-se observar na Fig. 8(a) que o coeficiente global de transferência de calor apresentou um incremento médio de 4% quando a vazão mássica foi aumentada de 0,09 kg/s para 0,11 kg/s. Para uma temperatura de 90 °C e uma vazão mássica de 0,11 kg/s, foram encontrados incrementos máximos da ordem de 4,2%, 3,4% e 1,6% para as concentrações volumétricas de 0,025%, 0,05% e 0,1%, respectivamente. Entretanto, percebeu-se que o aumento na temperatura de entrada do nanofluido afeta os incrementos no coeficiente global de transferência de calor. Em média, para a maior concentração testada, esses valores caíram de 4,2% para 2,2% quando a temperatura foi aumentada de 90 °C para 100 °C.

(Selvam et al., 2017) explica que ganhos no coeficiente global de transferência de calor são resultados do aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção para os nanofluidos, e isto pode ser atribuído ao aumento da condutividade térmica e da diminuição da espessura da camada limite térmica. Adicionalmente, (Naraki et al., 2013) e (Ravisankar et al., 2018), destacam que a concentração de nanopartículas não uniforme dentro do tubo intensifica este efeito.

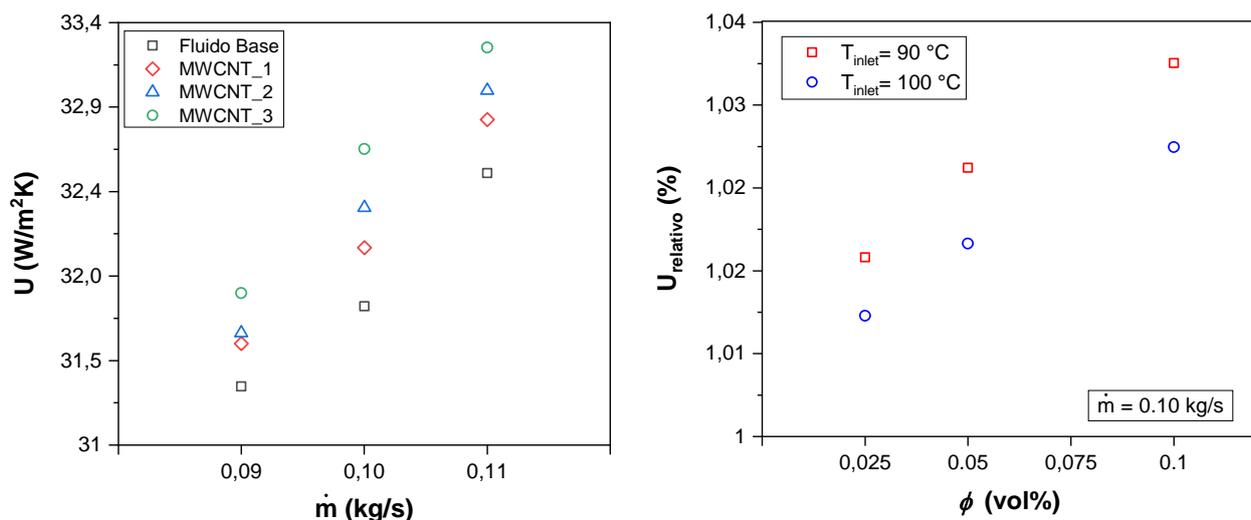


Figura 7. Coeficiente global de transferência de calor (a) Efeito da vazão mássica (b) Efeitos da temperatura

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi realizar uma avaliação experimental da transferência de calor em um radiador automotivo operando com nanofluidos de nanotubos de carbono. Os nanofluidos foram testados variando a concentração volumétrica de nanopartículas, a vazão mássica e a temperatura de entrada. As propriedades termofísicas dos nanofluidos preparados foram estudadas e comparadas com correlações propostas na literatura. A estabilidade também foi avaliada usando os métodos de espectrofotometria UV-VIS e análise de tamanho de partícula (DLS). As conclusões mais importantes deste trabalho são:

- A condutividade térmica dos nanofluidos aumentou com a concentração de nanopartículas e a temperatura. Os aumentos máximos médios foram da ordem de 2,7%, 3,7% e 6,4% para as amostras MWCNT_1, MWCNT_2 e MWCNT_3, respectivamente. Na faixa de medição, a influência do aumento da concentração volumétrica foi mais significativa com o aumento da temperatura.
- A viscosidade dos nanofluidos foi outro parâmetro determinado experimentalmente. O aumento máximo foi de 10% a 20 °C para a maior concentração testada. Como esperado, houve uma diminuição média da viscosidade, para todas amostras, de 80% quando a temperatura foi aumentada de 20 para 100 °C.

- Os resultados experimentais obtidos na bancada experimental indicaram que os ganhos na transferência de calor, quando da utilização de nanofluidos, dependem fortemente da concentração de nanopartículas e da temperatura de entrada do nanofluido. A taxa de transferência de calor mostrou um aumento de 3,7% a uma temperatura de 90 °C para a maior concentração testada. Com o aumento da temperatura para 100 °C, os incrementos foram de 2%. Um comportamento similar foi percebido para o coeficiente global de transferência de calor, que diminuiu de 4,2% para 2,2% com aumento da temperatura.
- Os nanofluidos testados mostraram um desempenho térmico superior ao do fluido base. Entretanto, o aumento da temperatura de entrada levou a uma diminuição na capacidade de troca de calor. Este comportamento foi mais acentuado para a amostra MWCNT_3 indicando que houve menor interação entre as nanopartículas e o fluido base quando a temperatura foi elevada.
- As amostras de nanofluido inicialmente preparadas demonstraram ter uma boa estabilidade coloidal. O máximo grau de sedimentação encontrado foi de 5% para amostra MWCNT_2 após 15 dias da preparação.

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. REFERÊNCIAS

- Abbas, F. et al. Nanofluid: Potential evaluation in automotive radiator. *Journal of Molecular Liquids*, v. 297, 2020.
- Adhami Dehkordi, R.; Hemmat Esfe, M.; Afrand, M. Effects of functionalized single walled carbon nanotubes on thermal performance of antifreeze: An experimental study on thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*, v. 120, p. 358–366, jun. 2017.
- ANSI/ASHRAE Standard 33. Method of Testing Forced Circulation Air Cooling and Air Heating Coils Atlanta, GA. ASHRAE, , 2000.
- ANSI/ASHRAE Standard 41.2. Standard Methods for Laboratory Air-flow Measurement ASHRAE, , 1987.
- ASHRAE Standard. 2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals. Atlanta, GA: ASHRAE, 2001. v. 53
- Cardenas Contreras, E. M.; Bandarra Filho, E. P. Heat transfer performance of an automotive radiator with MWCNT nanofluid cooling in a high operating temperature range. *Applied Thermal Engineering*, v. 207, n. September 2021, p. 118149, 2022.
- Cardenas 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, p. 375–387, 2019.
- Chakraborty, S.; Panigrahi, P. K. Stability of nanofluid: A review. *Applied Thermal Engineering*, v. 174, n. March, 2020.
- Chaurasia, P. et al. Heat transfer augmentation in automobile radiator using Al₂O₃–water based nanofluid. *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 3, 2019.
- 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.
- Elsaid, A. M. Experimental study on the heat transfer performance and friction factor characteristics of Co₃O₄ and Al₂O₃ based H₂O/(CH₂OH)₂ nanofluids in a vehicle engine radiator. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 108, 2019.
- Ganesh Kumar, P. et al. Experimental study on thermal properties and electrical conductivity of stabilized H₂O-solar glycol mixture based multi-walled carbon nanotube nanofluids: developing a new correlation. *Heliyon*, v. 5, n. 8, p. e02385, 2019.
- Jiang, L.; Gao, L.; Sun, J. Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 260, n. 1, p. 89–94, 2003.
- Kumar, S. et al. Performance of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolant. *Heat Transfer Research*, v. 49, n. 16, p. 1527–1543, 2018.
- Naraki, M. et al. Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 66, p. 82–90, 2013.
- Oliveira, G. A.; Cardenas Contreras, E. M.; Bandarra Filho, E. P. Experimental study of thermophysical properties of MWCNT and graphene coolant nanofluids for automotive application. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 43, n. 3, 2021.
- Omran, A. N. et al. Effects of multi walled carbon nanotubes shape and size on thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *Diamond and Related Materials*, v. 93, n. January, p. 96–104, 2019.
- Ravisankar, R.; Venkatachalapathy, V. S. K.; Alagumurthi, N. Application of nanotechnology to improve the performance of tractor radiator using Cu-water nanofluid. *Journal of Thermal Engineering*, v. 4, n. 4, 2018.
- Sajid, M. U.; Ali, H. M. Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 103, n. January, p. 556–592, 2019.
- Sandhu, H.; Gangacharyulu, D. An experimental study on stability and some thermophysical properties of multiwalled

- carbon nanotubes with water–ethylene glycol mixtures. *Particulate Science and Technology*, v. 35, n. 5, p. 547–554, 2017.
- Selvam, C. et al. Overall heat transfer coefficient improvement of an automobile radiator with graphene based suspensions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 115, p. 580–588, 2017.
- Sokhal, G. S.; Gangacharyulu, D.; Bulasara, V. K. Heat transfer and pressure drop performance of alumina–water nanofluid in a flat vertical tube of a radiator. *Chemical Engineering Communications*, v. 205, n. 2, p. 257–268, 1 fev. 2018.
- Soltanimehr, M.; Afrand, M. Thermal conductivity enhancement of COOH-functionalized MWCNTs/ethylene glycol–water nanofluid for application in heating and cooling systems. *Applied Thermal Engineering*, v. 105, p. 716–723, 2016.
- Sundar, L. S. et al. Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al₂O₃ nanofluids for heat transfer applications: An experimental study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 56, p. 86–95, 2014.
- Swinehart, F. The Beer-Lambert Law. *J. Chem. Educ.*, v. 39, n. 7, p. 333–335, 1962.
- Taylor, B. N.; Kuyatt, C. E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement. [s.l.] National Institute for Standards and Technology (NIST), 1994. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/TN1297>>.
- Yu-Hua, L.; Wei, Q.; Jian-Chao, F. Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Nanofluids. *Chinese Physics Letters*, v. 25, n. 9, p. 3319–3322, set. 2008.

EXPERIMENTAL THERMAL PERFORMANCE OF AN AUTOMOTIVE RADIATOR OPERATING WITH CARBON NANOTUBES NANOFLUIDS (MWCNTs)

Abstract. *This work investigates the thermal performance of carbon nanotube nanofluids (MWCNTs) dispersed in a water-ethylene glycol (50:50) mixture operating inside an automotive radiator. The nanofluids were prepared by the two-step synthesis method at volume concentrations of 0.025%, 0.05%, and 0.1%. Thermophysical properties such as thermal conductivity and viscosity were measured experimentally. The UV-VIS spectrophotometry method was used to evaluate the colloidal stability of the samples, reporting the absorbance-concentration relationship according to Beer-Lambert's law. The thermal performance of the nanofluids was evaluated by varying the inlet temperature from 90 °C to 100 °C and the nanoparticle concentration. The air velocity in the wind tunnel was 2 m/s and the coolant mass flow rate was varied from 0.09 kg/s to 0.1 kg/s. The maximum increments for heat transfer rate and overall heat transfer coefficient were 3.7% and 4.2%, respectively. The results demonstrate that increasing the concentration of nanoparticles can improve the thermal performance of the radiator, indicating the potential use of nanofluids in automotive cooling systems.*

Keywords: Nanofluid, Thermal Conductivity, Radiator, Stability, Heat transfer