

**AValiação Experimental da Transferência de Calor de Nanofluidos (MWCNTs) em
um Sistema de Arrefecimento Automotivo**

Edwin Martín Cárdenas C. – emcardenas.1989@gmail.com

Guilherme Azevedo Oliveira – guilherme.oliveira@ufu.br

Enio Pedone Bandarra Filho – bandarra@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, www.mecanica.ufu.br

R2 – Refrigeração – Componentes e Equipamentos

Resumo. Este trabalho apresenta os resultados experimentais sobre desempenho térmico de dispersões de nanotubos de carbono de paredes múltipla (MWCNTs) em água destilada para sua aplicação num sistema de arrefecimento automotivo. O método de síntese de dois passos por homogeneização de alta pressão foi usado para dispersar as nanopartículas MWCNTs em água. A influência de parâmetro de funcionamento tais como concentração em massa variando entre 0,05 e 0,16wt%, temperatura de entrada de nanofluido ($T_{in} = 50-80^{\circ}\text{C}$) foram avaliados experimentalmente. Uma montagem experimental composta por um túnel de vento, que simula o fluxo de ar através de um trocador de calor automotivo (radiador) e um circuito de fluido quente, que circula o nanofluido no interior do radiador. A vazão mássica de ar foi mantida constante a 0,175 kg / s e a taxa de fluxo de massa do fluido quente variou de 30 até 70 g / s. A queda de temperatura e taxa de transferência de calor no trocador de calor foram investigados. Verificou-se uma ligeira diminuição na taxa de transferência de calor, até 5%, para todas as condições de teste. Por outro lado, como o aumento da concentração de nanopartículas, observou-se uma diminuição na taxa de transferência de calor.

Palavras-chave: Condutividade térmica, Nanofluido, Refrigeração automotiva, Transferência de Calor.

1. INTRODUÇÃO

Com o progresso contínuo e a intensificação de processos em sistemas de engenharia e desenvolvimento de sistemas térmicos, a demanda de trocadores de calor e sistemas de refrigeração mais eficientes foram aumentou nos últimos anos. Dado que os trocadores de calor têm amplas aplicações na indústria, uma atenção especial tem sido dada para a intensificação da transferência de calor neste meio. Para este efeito, existem técnicas passivas e ativas, que têm sido utilizadas por vários investigadores como o objetivo de obter uma melhora no desempenho e eficiência de energia térmica. Embora existem vários tipos de trocadores de calor com as amplas aplicações em refrigeração, aeroespacial, sistemas de refrigeração automotiva e microeletrônica e nuclear que tem sido motivo pesquisa dos investigadores, não só por causa da sua área de transferência de calor e desempenho térmico, mas também devido ao seu tamanho menor (compactação) em comparação com outros tipos de trocadores de calor.

Nestas condições, o conceito de nanofluidos emergiu como uma nova classe de fluidos constituídos por nanopartículas (metais, óxidos, nanotubos de carbono, etc.) de tamanho, normalmente, entre 1 e 100 nm dispersas num fluido base (água, glicol de etileno, óleo) (Choi, 1995). Os fluidos comuns possuem condutividade térmica reduzida, e as inovações em sistemas térmicos até o momento ocorreram na maior parte dos casos em termos de equipamentos e materiais. Por isso verificou-se a necessidade de desenvolver novos compostos de fluidos como alternativa para a melhoria de sistemas térmicos, (Choi, 2003), (DING et al., 2007). Como sólidos têm maior condutividade térmica em comparação com líquidos, nanofluidos tendem a ter uma maior condutividade térmica em comparação com fluido de base. Um grande número de estudos sobre as propriedades térmicas dos nanofluidos são encontrados na literatura. Os modelos clássicos físicos tais como (MAXWELL, 1873), (HAMILTON; CROSSER, 1962), (XIE; FUJII; ZHANG, 2005), (LEONG; YANG; MURSHED, 2006), analisados por (OLIVEIRA; BANDARRA; WEN, 2012), não conseguiram prever os resultados experimentais. O mesmo comportamento é observado para a viscosidade. Muitos estudos experimentais têm sido relatadas na literatura e a maioria deles mostrou um aumento anômalo na condutividade térmica e na viscosidade de nanofluidos. A natureza de múltipla escala dos nanofluidos leva a relações não triviais entre as suas características geométricas, físicas e químicas e as propriedades térmicas e físicas resultantes. De fato a sensibilidade fortemente dependente destas propriedades é a principal razão para alguns resultados contraditórios entre as evidências experimentais e considerações teóricas apresentadas na literatura. (EASTMAN et al., 1997), (LEE et al., 1999), e (DAS et al., 2003) realizaram estudos experimentais sobre a condutividade térmica de nanofluidos (metais e óxidos) de materiais diferentes e alcançou grande melhoria em comparação com os fluidos de base. (EASTMAN et al., 2001) relataram um estudo experimental sobre a condutividade térmica de nanofluidos à base de etilenoglicol contendo nanopartículas de cobre. Os nanofluidos exibiram um aumento na condutividade térmica, em até 40% para nanofluidos com concentração 0,3% em volume de nanopartículas de Cu, de diâmetro médio inferior a 10 nm, dispersas em etileno glicol. (GARG et al., 2008) fez a medida da condutividade térmica de nanopartículas de Cu em etilenoglicol e também encontrou um elevado incremento, até duas vezes o valor previsto pela teoria de Maxwell-Garnett. (LIU et al., 2006) mediram a condutividade térmica de nanofluidos, contendo os nanotubos de carbono dispersos em etilenoglicol e óleo sintético. O aumento da condutividade térmica é de até 12,4% para suspensões de CNT-etilenoglicol de 1,0% vol e 30% para suspensões de óleo do motor CNT-sintéticos em 2 % vol.

As condutividades térmicas maiores e a maior área de superfície específica de CNT tem grandes impactos na condutividade térmica. O CNT disperso no fluido base pode formar uma extensa rede CNT tridimensional que facilita o transporte térmico. O aumento de condutividade térmica mais elevada é visto em nanofluidos CNT. (CÁRDENAS GÓMEZ; HOFFMANN; BANDARRA FILHO, 2015) conduziram um estudo experimental de MWCNT de diferentes características geométricas e concentrações. Em termos de condutividade térmica, eles encontraram que a amostra de nanofluido com a maior relação de aspecto (razão entre comprimento e diâmetro) apresentou o maior aumento de 17%, em relação ao fluido de base, de água destilada. Por outro lado, a viscosidade da mesma amostra nanofluido foi aumentada em 11,3%.

Em um trabalho recente (CHOUGULE; SAHU, 2014) avaliaram experimentalmente o desempenho térmico de radiador automotivo operando com nanotubos de carbono disperso em água. Os testes foram realizados mantendo a temperatura de entrada do líquido de 90 °C, e temperatura de entrada do ar a 35 °C, enquanto a vazão do líquido foi variada de 2 a 5 L/min, e a concentração de nanopartículas de 0,15% a 1%. Um incremento de 90,76% na transferência de calor foi alcançado com a aplicação de nanofluido, quando comparado com a água pura operando a uma vazão de 5 L/min. Foram ensaiados nanofluidos com diferentes pH (5,5; 6,5 e 9), sendo que, o valor menor apresentou o melhor desempenho térmico. (SONAGE; MOHANAN, 2015) Sintetizaram nanofluidos Zn/H₂O e ZnO/H₂O utilizando os métodos de um e dois passos respectivamente; a caracterização foi feita com nanopartículas de 41 nm para o Zn e de 35nm para ZnO. Seis nanofluidos compostos em diferentes concentrações (0.15%, 0.25% e 0.5%) foram testados para fazer uma avaliação experimental e calcular o aumento do coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão em relação à água para regime de fluxo turbulento de Reynolds com intervalo de 4000 a 20000. O nanofluido Zn-H₂O com uma concentração de 0,5% provou ter o melhor desempenho de transferência de calor. Avaliou-se o fluido teoricamente em um radiador de automóvel para obter benefícios de seu uso. Se substituindo a água com o nanofluido Zn-H₂O com uma concentração de 0,5%, calcula-se que o tamanho do radiador, a quantidade de fluido e a potência de bombeamento são reduzidos, e desta maneira, tornando esse nanofluido um fluido de energia eficiente para o sistema de refrigeração do motor.

O presente trabalho relata resultados de uma investigação experimental com foco no desempenho térmico de nanofluidos MWCNTs / água dentro de um radiador de automóvel. A gama da taxa de vazão mássica variou de 30 a 70 g / s, a temperatura de entrada de 50 a 80°C e a concentração de 0-0,16wt em massa. Além disso, as propriedades nanofluidos foram medidos experimentalmente.

2. METODOLOGIA

2.1 Síntese de Nanofluido

O método de preparação para nanofluidos é uma operação delicada e requer uma atenção especial. Em outras palavras, não é uma mistura de sólido-líquido simples. Os fenômenos físico-químicas que ocorrem durante a preparação nanofluido, em uma escala quase atômica, são ainda pouco compreendidos. De acordo com a (SYAM SUNDAR et al., 2014), suspensões estáveis e duradouras sem aglomerações e, além disso, sem alterações químicas do fluido, são requisitos essenciais dos nanofluidos que devem ser satisfeitas ao preparar os fluidos.

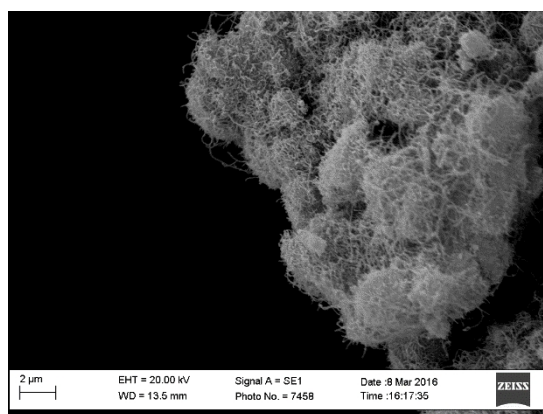


Figura 1. Imagem MEV dos MWCNTs.

No presente estudo, os nanofluidos foram preparados usando um processo de homogeneização de alta pressão, que é um método de preparação de duas etapas. Uma solução contendo 3% wt contendo nanotubos de carbono de paredes múltiplas foi adquirida da Nanoestruturados & Amorphous Materials, Inc. (NanoAmor) e são mostrados na Fig. 1. Os valores do calor específico e da densidade dos nanotubos de carbono foram fornecidas pelo fabricante, usados foram $C_p = 710 \text{ J/kgK}$ e $\rho = 2,1 \text{ g/cm}^3$. No processo de homogeneização a alta pressão, os aglomerados de nanopartículas são quebradas, contribuir para a homogeneidade e a estabilidade da suspensão de acordo com (BANDARRA FILHO et al., 2014). Todas as amostras nanofluido foram preparados utilizando a mesma rotina, que se inicia quando a mistura passa para uma câmara de interação, onde a combinação de 3 mecanismos para quebra as aglomerações de partículas: fortes impactos irregulares com a parede interior da câmara de interação, as microbolhas induzidas por energia implosão cavitacão, e elevada taxa de fluxo de cisalhamento.

2.2 Caracterização dos nanofluidos

A condutividade térmica e a viscosidade das amostras utilizadas nos testes foram medidos utilizando os equipamentos especiais mostrados na Fig. 2 que possui o laboratório de energia, sistemas térmicos e nanotecnologia (LESTnano) da Universidade Federal de Uberlândia.

A condutividade térmica foi medida usando um analisador térmico de propriedades (THB 1 - Transient Hot Bridge, Linseis, Alemanha; precisão: $\pm 5,0\%$). Este equipamento utiliza um sensor tipo ponte quente transitório que é uma evolução do método de fio quente transitório, não entanto continua sendo um método de regime transitório especial para medições em períodos de tempo curtos. Além disso, a difusividade térmica é medida em paralelo com a condutividade térmica. Neste método, a ponta de medição, que é imersa na amostra de fluido, emite um fluxo de calor constante durante a medição. As vantagens do presente método em comparação com o método de fio quente comum estão relacionados com a perda de calor reduzida por os condutores eléctricos, a ponte quente tem uma maior sensibilidade para as variações de temperatura e é menos sensível para o stress mecânico. A viscosidade dos nanofluidos foi medida utilizando um viscosímetro rotacional (SVM 3000, Anton Paar, Áustria; precisão: 1,0%). No método escolhido como alternativa, a amostra de líquido é colocada em uma célula em forma de tubo com a temperatura controlada através de um sistema Peltier, que gira a uma velocidade constante determinando a viscosidades cinemática e dinâmica. Este equipamento é compacto e versátil em utilização, com uma boa vantagem de que são necessárias apenas pequenas quantidades de amostra.

Para reduzir os desvios de medições, cada um dos parâmetros para a condutividade térmica e viscosidade as experiências foi repetida seis vezes. As medições foram realizadas para a água e os nanofluidos respectivamente, em seguida, o valor médio de cada um foi considerado o valor experimental da amostra.



Figura 2. Equipamento de medição (a) viscosímetro SVM3000 de Anton Paar, (b) Medidor de condutividade térmica THB1 Linseis

A principal dificuldade em aplicar os nanofluidos consiste na sua estabilidade, e é preciso estabelecer um método que garanta a estabilidade e homogeneidade dos nanofluidos. A condutividade térmica e viscosidade serão medidas, visto que são as principais propriedades térmicas a serem averiguadas para esta nova classe de fluidos. No presente estudo, condutividade térmica, (k), e viscosidade, (μ), foram medidos experimentalmente, enquanto o calor específico (C_p), e densidade, (ρ), foram calculados com base em relações de massa e equilíbrio de energia, a partir de a literatura, proposto pela (PAK; CHO, 1998) e (XUAN; ROETZEL, 2000) como se segue:

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

$$(\rho \cdot C_p)_{nf} = \varphi \cdot \rho \cdot C_{p_{np}} + (1 - \varphi) \cdot (\rho \cdot C_p)_{bf} \quad (2)$$

Onde os subscritos bf, nf e np representa fluido de base, nanofluido e nanopartículas, respectivamente.

3. BANCADA EXPERIMENTAL

3.1 Calculo e avaliação dos parâmetros de transferência de calor

A capacidade de troca de calor (Q) em (kW) do trocador de calor automotivo pode ser calculada de acordo com a Eq. 3:

$$\dot{Q}_{liq} = \dot{m}_{liq} \cdot C_{p,liq} \cdot \Delta T_{liq} \quad (3)$$

As vazões mássicas são constantes tanto para o ar como para o fluido de arrefecimento. A taxa de troca de calor entre o ar e o radiador é descrita pela Eq. 4:

$$\dot{Q}_{ar} = C_{ar} (T_{ar,s} - T_{ar,e}) \quad (4)$$

Onde o parâmetro C_{ar} é a taxa de capacidade térmica do ar. Pode-se entender como a capacidade do fluido de transportar a energia de um ponto a outro do sistema em determinadas condições de operação.

Para medir o fluxo de ar, o túnel de vento tem uma placa de 5 bocais e a pressão diferencial do ar que passa através dos bocais é medida por um manômetro em U. A partir desta pressão diferencial, a taxa de fluxo pode ser determinada a massa de ar, utilizando a Eq. 5:

$$\dot{m}_i = \frac{A_1 \sqrt{2 \cdot \rho_{ar} \cdot \Delta P_{ar}}}{\left| 1 - \left(\frac{A_i}{A_{tun}} \right)^2 \right|} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{ar} = \sum C_{d,i} \cdot \dot{m}_i \quad (6)$$

O índice $i = 1, 2, 3, 4$ e 5 indica o bocal e $C_{d,i}$ são o coeficiente de descarga para cada bocal.

$$C_{d,i} = 0,9975 - 0,00653 \cdot \left| \frac{10^6}{Re_{d,i}} \right|^a \quad (7)$$

A taxa de transferência de calor também foi comparado entre os dois circuitos principais mostrados na Fig. 1 (ar e fluido quente) da configuração experimental, ou seja, a verificação do balanço de energia foi realizado ao longo dos volumes de controle de ar do radiador e do fluido de arrefecimento utilizando as Eq. (3) e (4).

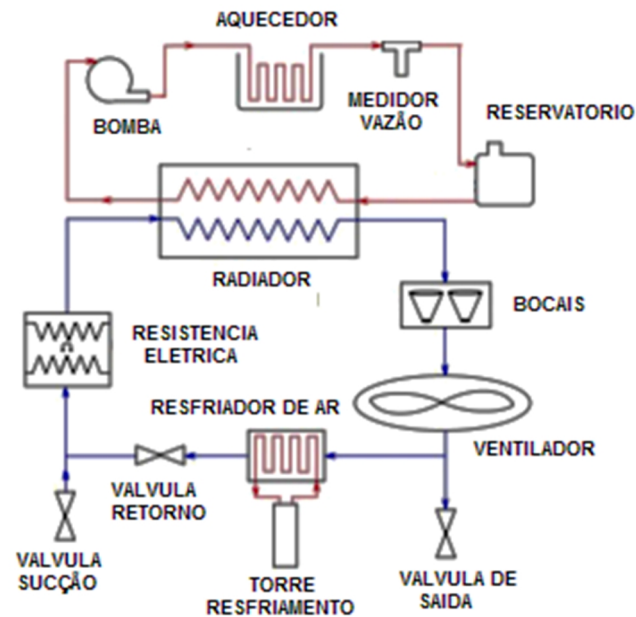


Figura 1. Diagrama esquemático da configuração experimental

A fim de avaliar desempenho térmico dos nanofluidos com nanotubos de carbono (MWCNTs), uma bancada experimental foi construída de modo para determinar a taxa de transferência de calor em radiadores automotivos. Os ensaios serão realizados em um túnel de vento, onde será instalado o radiador como esquematizado na Fig.4. O túnel possui três válvulas que permitem variar entre sistema fechado ou aberto. O circuito de ar possui uma placa de bocais, instalada de acordo com a norma (ASHRAE STANDARD 33, 2000). Para controle da temperatura do ar possui um trocador de calor por onde escoar água de uma torre de resfriamento e ainda uma bateria de resistências elétricas que aquecem o ar a montante do radiador, para que o ar incida no radiador na temperatura desejada.

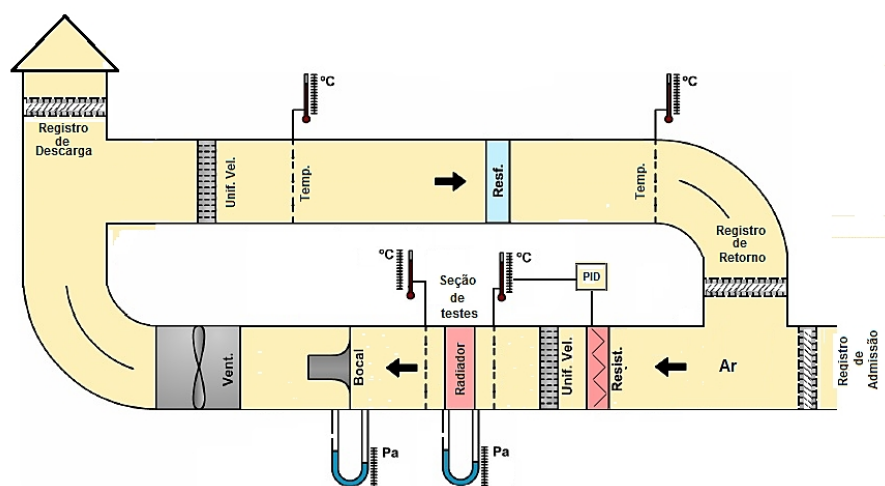


Figura 4 – Bancada experimental tipo túnel de vento utilizado nos ensaios.

A temperatura do ar foi medida por doze termopares tipo T distribuído na seção de entrada e doze na seção de saída, e a temperatura de entrada e saída é considerada como a média aritmética dos valores obtidos. O sistema possui ainda um retificador de escoamento, para aumentar a linearidade do escoamento incidente no trocador de calor.

A temperatura de trabalho do ar é controlada pela atuação sobre resistências elétricas (6 kW), por intermédio de um controlador PID, controlado pelo sinal de alimentação dos termopares na seção de entrada, de precisão em torno de 0,1°C.

Com isso, garante-se a possibilidade de se impor a temperatura do ar incidente no radiador ensaiado com a precisão desejada. O sistema de dutos está isolado termicamente com espuma de poliestireno, afim de reduzir as perdas de calor para o ambiente. Além disso, o circuito de fluido quente (nanofluido) possui uma bomba ligada a um inversor de frequência e um medidor de vazão na entrada do trocador. Foi necessário conectar um sistema de aquisição de dados ao inversor para obter os valores da potência de bombeamento que serão utilizados na análise de desempenho hidráulico e eficiência do circuito de arrefecimento. O motor que aciona o ventilador é ligado a um inversor de frequência, e juntamente com a placa de cinco bocais, permite a variação em uma ampla faixa de vazões de ar. O fluido quente é aquecido em um trocador de calor com temperatura de parede constante, o trocador consiste em uma serpentina imersa em um banho térmico de água aquecida por uma resistência elétrica, a temperatura da água é controlada para que o fluido quente entre no radiador na temperatura desejada. As temperaturas de entrada e saída são medidas. Os testes foram realizados com nanofluidos com diferentes concentrações de nanopartículas comparado com o fluido de base. Além de variar os parâmetros de entrada, tais como temperatura de entrada do nanofluido e do ar, vazão do ar e do nanofluido. Os dados foram monitorados em tempo real e gerenciados pelo software LabVIEW.

A incerteza de medição destes parâmetros pode ser encontrada na Tab. 1. Cada termopar utilizados na instalação experimental foi calibrada junto com o sistema de aquisição de dados em um banho termostático. Neste estudo, o método utilizado para calcular a incerteza na medida, que usado um intervalo de confiança de 95%, foi o método dos mínimos quadrados sugerido por (ABERNETHY; THOMPSON, 1973). A precisão transdutores de pressão diferencial foi obtido a partir de um certificado fornecido pelo fabricante. Testes de confirmação com um tubo L de água foram realizados a fim de verificar a precisão fabricante sugeriu.

Tabela 1. Incerteza dos parâmetros medidos

Parâmetro	Incerteza
Temperatura	$\pm 0.15 \%$
Queda de pressão placas bocais	$\pm 0.75 \%$
Queda de pressão no trocador	$\pm 0.96 \%$
Vazão mássica do líquido	$\pm 0.15 \%$
Vazão mássica do ar	$\pm 2.00 \%$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Condutividade Térmica

A Fig. 5 mostra os resultados experimentais para a condutividade térmica de nanofluido de MWCNTs-água para diferentes concentrações comparados com a água destilada em uma faixa de temperaturas de 25 a 50°C. O maior aumento

na condutividade térmica foi cerca de 5% para a concentração de 0,08 e 0,16%wt numa temperatura de 50°C. Para a temperatura de 25°C a melhora foi menor, de 1,6% para a concentração 0,16wt%. Com a intensificação da temperatura do fluido, o movimento entre as partículas aumenta, aumentando assim a condutividade térmica. Observou-se uma pequena diminuição na condutividade térmica para concentrações de 0.08wt%. É importante mencionar que as melhorias observadas de condutividade térmica estão dentro da faixa de incerteza máxima dos experimentos, isto é, 3% do valor medido.

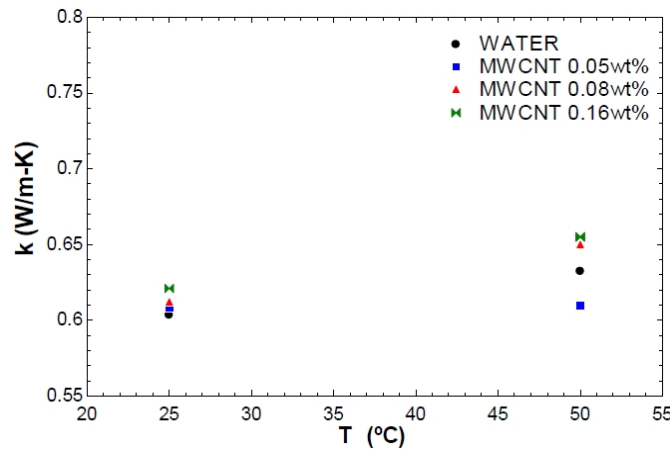


Figure 5 –Condutividade térmica da água destilada comparado com o nanofluido MWCNTs

4.2 Viscosidade

Na Fig. 6 pode-se observar que a viscosidade tem um aumento significativo para o nanofluido, em comparação com a água, e também com um aumento de concentração de nanopartículas. A viscosidade do nanofluido diminui exponencialmente com o aumento da temperatura, para uma temperatura de 30° C, o aumento foi de 8,5, 20,6 e 54% para as concentrações de 0,05, 0,08 e 0,16wt%, respectivamente. O aumento máximo na viscosidade foi de 54% para a concentração de 0,16%wt a 30°C. Para todas as amostras testadas, a viscosidade diminui quando a temperatura aumenta, e para temperaturas mais elevadas o aumento na viscosidade para nanofluidos em comparação com fluido de base é inferior, por exemplo, a viscosidade para a concentração 0.16%wt nanofluido foi 40% mais elevada do que para a água a 90°C e 54% superior a 30°C. Os resultados mostram um incremento na viscosidade ao aumentar a temperatura.

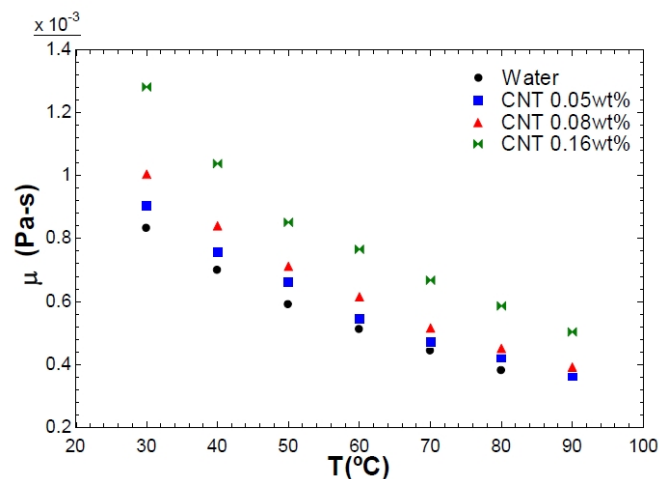


Figura 6. Variação da Viscosidade com a temperatura da água destilada e Nanofluido MWCNTs

4.3 Transferência de calor

A Fig. 7 mostra o número de Nusselt em função do número Reynolds para a água destilada com o objetivo de validar a transferência de calor na bancada experimental comparada com a correlação de (DITTUS; BOELTER, 1930).

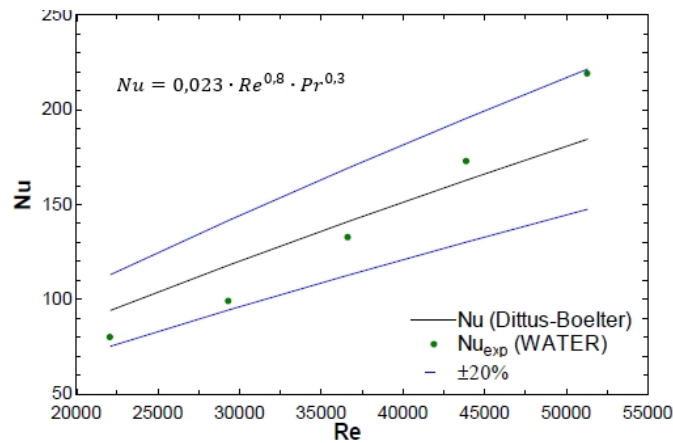


Figura 7. Comparação dos resultados experimentais obtidos para água destilada e a correlação de Dittus-Boelter

Para uma condição ideal, sem perdas de calor para o ambiente, $\dot{Q}_{liq} = \dot{Q}_{air}$. O erro no balanço de energia foi avaliada tal como descrito na Eq. (8).

$$error \% = \frac{\dot{Q}_{liq} - \dot{Q}_{air}}{\dot{Q}_{liq}} \cdot 100 \quad (8)$$

4.4 Desempenho térmico

Com o objetivo de avaliar o desempenho térmico dos nanofluidos foram testados MWCNT / água em concentrações de 0,05, 0,08 e 0,16%wt, e as taxas de vazão mássica variam de 30 até 70 g / s. Os testes foram conduzidos em diferentes temperaturas de entrada 50, 60, 70 e 80°C para avaliar o efeito sobre o comportamento térmico do radiador. Como é esperado a taxa de transferência de calor aumenta quando a vazão mássica aumenta. Em geral o comportamento dos nanofluidos avaliando a taxa de transferência de calor é inverso quando aumentada a concentração do nanofluidos. Em outras palavras a taxa de transferência de calor demonstraram decréscimos quando a concentração aumenta em comparação com o fluido de base. Para a concentração de 0,5%wt, a taxa de transferência de calor era quase a mesma de água destilada. Para a concentração 0.08wt%, a taxa de transferência de calor obtido valores entre 3 e 8,8%, mais baixa do que o fluido base. A maior diferença foi conseguido para a temperatura de 50°C entrada e taxa de fluxo de massa de 30 g / s. Para 80°C e 70 g / s, o decréscimo foi menor, cerca de 3%. Estes resultados podem ser visualizados na Fig. 8a. Finalmente, para a concentração mais elevada, 0,16%wt, a Fig. 8b, mostra que a taxa de transferência de calor foi mais significativa, variando entre 7,3% para 80°C e 70 g / s e 17% para 80 ° C e 30 g / s.

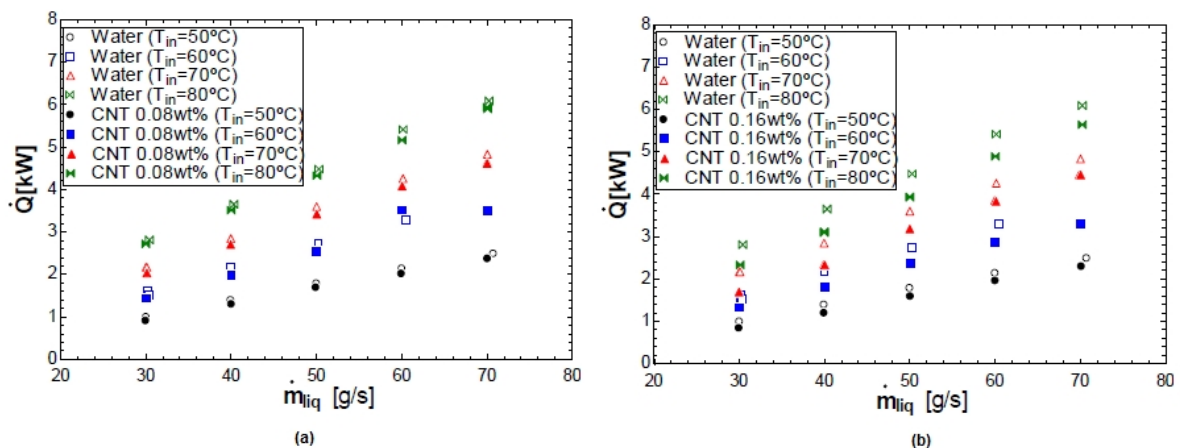


Figura 8. (A) Taxa de transferência de calor obtido por água destilada e nanofluido com concentração de 0.08wt% em relação à taxa de fluxo de massa. (B) Taxa de transferência de calor obtido por água destilada e nanofluido com concentração de 0.16wt% em relação à taxa de fluxo de massa.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram avaliados o desempenho térmico de nanofluidos MWCNT/água. Os nanofluidos foram produzidos por um método de síntese de duas etapas. A viscosidade e condutividade térmica dos nanofluidos foi medida experimentalmente, e a taxa de transferência de calor e número de Nusselt foram obtidos experimentalmente para fluido base e nanofluidos. A análise dos resultados experimentais permitiu as seguintes conclusões:

- A condutividade térmica dos nanofluidos produzidos foi analisada e os resultados experimentais mostraram que é ligeiramente superior à da água pura para a temperatura de 50 °C com concentrações de 0,08 e 0,16%wt. Para temperatura ambiente, a condutividade térmica de nanofluido foi mais próxima a da água, o que indica que a melhoria na condutividade térmica pode ser acentuada a temperaturas mais elevadas.
- As taxas de transferência de calor foram encontradas dependente da temperatura. Um aumento na temperatura de 50°C para 80 °C, apresentaram cerca de 180% de aumento na taxa de transferência de calor para a água.
- As taxas de transferência de calor superior foram obtidas com água destilada, e não com os nanofluidos, indicando que este nanofluido não é ideal para substituir o fluido de arrefecimento. Por isso, novos testes serão realizados com diferentes nanofluidos e concentrações.

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

- ABERNETHY, R. B.; THOMPSON, J. W. Handbook of Uncertainty in gas turbine measurements. p. 172, 1973.
- ASHRAE STANDARD 33. Method of Testing Forced Circulation Air Cooling and Air Heating Coils. Atlanta, GA.: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 2000
- BANDARRA FILHO, E. P. et al. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system. *Energy Conversion and Management*, v. 84, p. 261–267, 2014.
- CÁRDENAS GÓMEZ, A. O.; HOFFMANN, A. R. K.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental evaluation of CNT nanofluids in single-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 86, p. 277–287, 2015.
- CHOI, S. U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME FED 231*, 1995.
- CHOI, S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 5, p. 167–171, 2003.
- CHOUGULE, S. S.; SAHU, S. K. Thermal Performance of Automobile Radiator Using Carbon Nanotube-Water Nanofluid—Experimental Study. *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, v. 5, n. 1, p. 011001, 2014.
- DAS, S. K. et al. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, v. 125, n. 4, p. 567–574, 17 jul. 2003.
- DING, Y. et al. Heat transfer intensification using nanofluids. *KONA Powder and Particle Journal*, v. 25, n. March, p. 23–38, 2007.
- DITTUS, F. W.; BOELTER, L. M. K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type,. Berkeley, Calif: University of California Press, 1930.
- EASTMAN, J. A. et al. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. [s.l: s.n.]. v. 457
- EASTMAN, J. A. et al. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, v. 78, n. 6, p. 718–720, 2001.
- GARG, J. et al. Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid. *Journal of Applied Physics*, v. 103, n. 7, 2008.
- HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. *I & EC Fundamentals*, v. 1, n. 3, p. 187–191, 1962.
- LEE, S. et al. Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, v. 121, n. 2, p. 280–289, 1999.
- LEONG, K. C.; YANG, C.; MURSHED, S. M. S. A model for the thermal conductivity of nanofluids - The effect of interfacial layer. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 8, n. 2, p. 245–254, 2006.
- LIU, M. S. et al. Enhancement of thermal conductivity with CuO for nanofluids. *Chemical Engineering and Technology*, v. 29, n. 1, p. 72–77, 2006.
- MAXWELL, J. C. A treatise on electricity and magnetism Oxford: Clarendon Press, 1873.
- OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA, E.; WEN, D. Synthesis and Characterization of Silver / Water. v. 43, p. 69–83, 2012.
- 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.
- SONAGE, B. K.; MOHANAN, P. Miniaturization of automobile radiator by using zinc-water and zinc oxide-water nanofluids. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 29, n. 5, p. 2177–2185, 2015.
- SYAM SUNDAR, L. 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.
- XIE, H.; FUJII, M.; ZHANG, X. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 48, n. 14, p. 2926–2932, 2005.
- XUAN, Y.; ROETZEL, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. v. 43, p. 3701–3707, 2000.