

ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS SOBRE O DESEMPENHO EM TRANSFERÊNCIA DE CALOR UTILIZANDO NANOFLUIDOS CNTS/ÁGUA

Abdul Orlando Cárdenas Gómez, LEST, ing_abdulcardenas@hotmail.com.

Antonio Remi Kieling Hoffmann, LEST, remi@ifma.edu.br.

Juan Gabriel Paz Alegria, LEST, jgpaz@mecanica.ufu.br.

Enio Pedone Bandarra Filho, LEST, bandarra@mecanica.ufu.br.

Resumo. Uma bancada experimental foi construída para avaliar os parâmetros relacionados ao processo de transferência de calor por convecção e características do escoamento de nanofluidos. Esta bancada experimental será modificada através da aplicação de controle e automatização, para melhorar a acurácia nos resultados experimentais obtidos, que junto com as propriedades termofísicas dos nanofluidos estimam o coeficiente de transferência de calor. Foram avaliados experimentalmente nanofluidos de CNTs/água, para vazões mássicas de 20g/s até 80g/s, e concentrações em volume de $0 < \varphi < 0,24\%$. Os resultados foram comparados com correlações existentes, com o objetivo de determinar tendências no comportamento da transferência de calor por convecção das amostras dos nanofluidos testados.

Palavras chave: Convecção, Correlação, Experimental, Nanopartícula, Transferência de calor.

1. INTRODUÇÃO

A otimização dos dispositivos utilizados para transferência de calor, é uma prática comum, visando melhorar o desempenho, reduzir o tamanho e custo de um trocador de calor. Estas técnicas de otimização permitem melhorar o coeficiente de transferência de calor por convecção, que resulta num aumento da taxa de transferência de calor por unidade de área. Infelizmente o ganho de eficiência geométrica dos dispositivos de transferência de calor esta chegando a seu limite. Para Prasad e Shen (1993), os pesquisadores e engenheiros têm o objetivo melhorar o coeficiente de transferência de calor testando e avaliando novas técnicas. Uma das técnicas tradicionalmente utilizadas é misturar partículas sólidas de magnitudes milimétricas e micrométricas com fluidos convencionais (fluidos base). Os aditivos sólidos podem melhorar o coeficiente de transferência de calor, mas suas aplicações são limitadas pelo fato de que as partículas milimétricas e micrométricas decantam rapidamente, causando o entupimento dos canais de fluxo, corrosão dos tubos e elevados valores de queda de pressão. Segundo Choi (1995), o conceito de nanofluido refere-se a um novo tipo de fluido de transferência de calor, com suspensão de partículas sólidas de escala nanométrica ($< 100\text{nm}$), essas partículas podem ser metálicas ou não metálicas, homogeneizadas num fluido base (água, óleos ou glicol etileno). Segundo Pak e Cho (1998) e Xuan e Li (2003) e o transferência de calor por convecção utilizando nanofluidos varia com as propriedades e dimensões das partículas, assim como a fração volumétrica. Como consequência das possíveis vantagens do uso dos nanofluidos, muitos pesquisadores têm estudado o desempenho da transferência de calor e características do escoamento de vários nanofluidos, com diferentes materiais de nanopartículas e vários fluidos base. Assim, o trabalho tem como objetivo realizar comparações entre os resultados experimentais obtidos para nanofluidos CNTs/água e duas correlações existentes para transferência de calor com nanofluidos. Estas comparações, junto com as propriedades termofísicas do nanofluido, podem determinar o desempenho da transferência de calor por convecção e características do escoamento destes.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Preparação do nanofluido

Para Sundar e Singh (2013), suspensões estáveis, duradouras, sem aglomerações e, além disso, sem alterações químicas do fluido são requisitos essenciais dos nanofluidos, que devem ser satisfeitos no processo de preparação dos mesmos. A preparação das amostras de nanofluido foi realizada seguindo o método de dois passos, e o fluido base utilizado foi água destilada. Os nanotubos de carbono, assim como produzidos, apresentavam agregados que estavam fortemente entrelaçados e foi necessária aplicação de energia externa para romper estes aglomerados. No presente estudo, a dispersão das nanopartículas na água destilada foi realizada com o auxílio do homogeneizador de alta pressão, durante 3 horas para cada amostra. As nanopartículas utilizadas para a preparação dos nanofluidos no processo de homogeneização apresentam as seguintes propriedades termofísicas mostradas na Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades termofísicas das nanopartículas CNTs

Tipo de nanotubo	L[nm]	D [nm]	ρ [g/cm ³]	k [W/m.K]	c_p [kJ/kg.°C]
NT ₀₂ MWNTs (Disp.)/7.5g	5 – 30	20 – 40	2,1	3000	0.710
NT ₀₄ MWNTs (Disp.)/15g	5 – 50	50 – 100	2,1	3000	0.710

2.1. Bancada Experimental

A bancada experimental foi construída para estudar as características da transferência de calor por convecção em escoamento turbulento em um tubo circular horizontal. A Fig. (1) apresenta o diagrama esquematizado da bancada experimental, mostrando os equipamentos que compõem a bancada, tais como a seção de teste, a seção de pré-aquecimento, o circuito de resfriamento, o reservatório, o tanque de abastecimento e a bomba com acoplamento magnético.

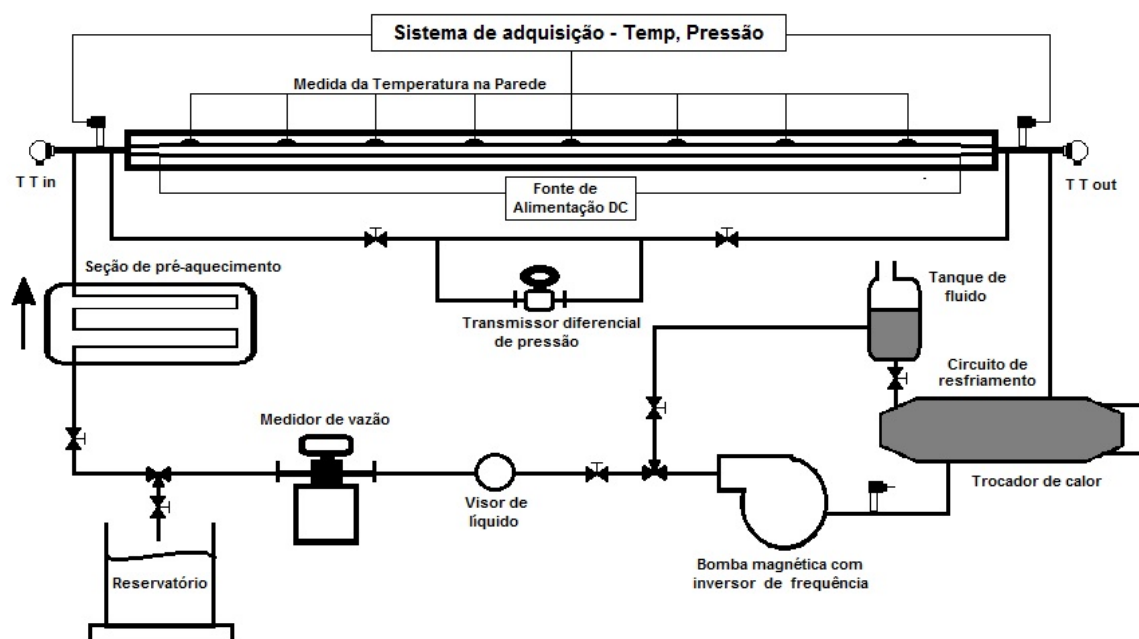


Figura 1. Diagrama esquemático da bancada experimental

O circuito de pré-aquecimento possui um funcionamento igual ao de um banho térmico, sendo composto por um reservatório de aço inoxidável, uma resistência elétrica tipo imersão para aquecimento, uma bomba para a recirculação do fluido de trabalho e um trocador de tubos concêntricos, o controle da temperatura é feito por um termostato elétrico (liga/desliga). O circuito de resfriamento é posicionado após a seção de testes, pois devido ao ganho de calor o nanofluido precisa ser resfriado para ser recirculado. Foi instalada uma unidade condensadora de 3,7 kW a fim de retirar o calor recebido pelo nanofluido, a troca de calor é realizada por um trocador de configuração casco-tubo. A seção de testes, por onde circula o nanofluido pela ação de uma bomba magnética de engrenagem, Rotogearmagnetic-Drive, com velocidade controlada por um inversor de frequência VLT 2800 DANFOSS, é constituída por um tubo circular de latão com o interior liso, de comprimento 2460 mm, diâmetro externo de 12,7mm e espessura de parede de 3,175mm. A medida na temperatura de parede ao longo do tubo é feita por 12 termopares tipo K fixados sobre o tubo em diferentes posições. As condições de temperatura e pressão na entrada e na saída são medidas por sensores RTD modelo PT100 e piezo resistivo, respectivamente. Para obter a condição de contorno de fluxo de calor constante na seção de testes, o calor é fornecido através de uma resistência elétrica tipo fita flexível de 1500 W, cuja potencia é fornecida por uma fonte elétrica DC. O isolamento térmico da seção de testes foi realizado com uma camada de lã de rocha de 25 mm de espessura. Para evitar a fuga de calor por condução axial, o tubo foi suportado em casquilhos de nylon tecnil e a seguir todo o conjunto foi recoberto com uma manta isolante de espuma elastomérica de borracha sintética com espessura de 20 mm.

Durante a operação da bancada, foram medidas as temperaturas na parede no tubo da seção de testes, assim como a temperatura e a pressão na entrada e saída do tubo para a amostra do nanofluido. A potência elétrica fornecida para o aquecimento da resistência e a vazão mássica do nanofluido também foram monitoradas. Os valores experimentais do coeficiente da transferência de calor por convecção do nanofluido e o número de Reynolds para escoamento completamente desenvolvido em regime turbulento, foram calculados pelas equações Eq. (1) e Eq. (2).

$$h_{nf} = \frac{q}{T_w - T_f} \quad (1)$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (2)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os propósitos desse trabalho, a avaliação do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de água destilada, a estratégia consiste em comparar os resultados adquiridos a partir do conjunto de ensaios das amostras de nanofluido com os resultados medidos para o fluido base (água) nas mesmas condições.

Os testes para as duas amostras de nanotubos e para água foram feitos com as seguintes condições: temperatura de entrada na seção de testes $T_{in}=10$ [°C], fluxo de calor constante $q=900$ [W/m²], vazão mássica de 20 a 80 [g/s] e concentrações volumétricas de 0,12% para a amostra NT₀₂ e 0,24% para NT₀₄. A comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção para as amostras NT₀₂ e NT₀₄ é avaliada com duas correlações para nanofluidos, que são apresentadas na fig. (2). Como não existem correlações da transferência de calor por convecção em regime turbulento para nanotubos de carbono, foram selecionadas a correlação de Sundar *et al.* (2012) para Fe₃O₄/H₂O e a correlação de Duangthongsuk e Wongwises (2010) para TiO₂/H₂O.

É interessante observar, que para a correlação de Duangthongsuk fig. (2b), 89% dos dados experimentais estão dentro da faixa de $\pm 20\%$ e apresentam um desvio médio de 10,97%, enquanto para a correlação de Sundar *et al.* fig. (2a), só 22% dos dados experimentais estão na faixa de $\pm 20\%$ e seu desvio médio foi de 35,67%. A correlação de Sundar *et al.* é definida como:

$$Nu = 0,02172Re^{0,8}Pr^{0,3}(1 - \varphi)^{0,5181} \quad (3)$$

A correlação de Duangthongsuk e Wongwises é definida como:

$$Nu = 0,074Re^{0,707}Pr^{0,385}\varphi^{0,074} \quad (4)$$

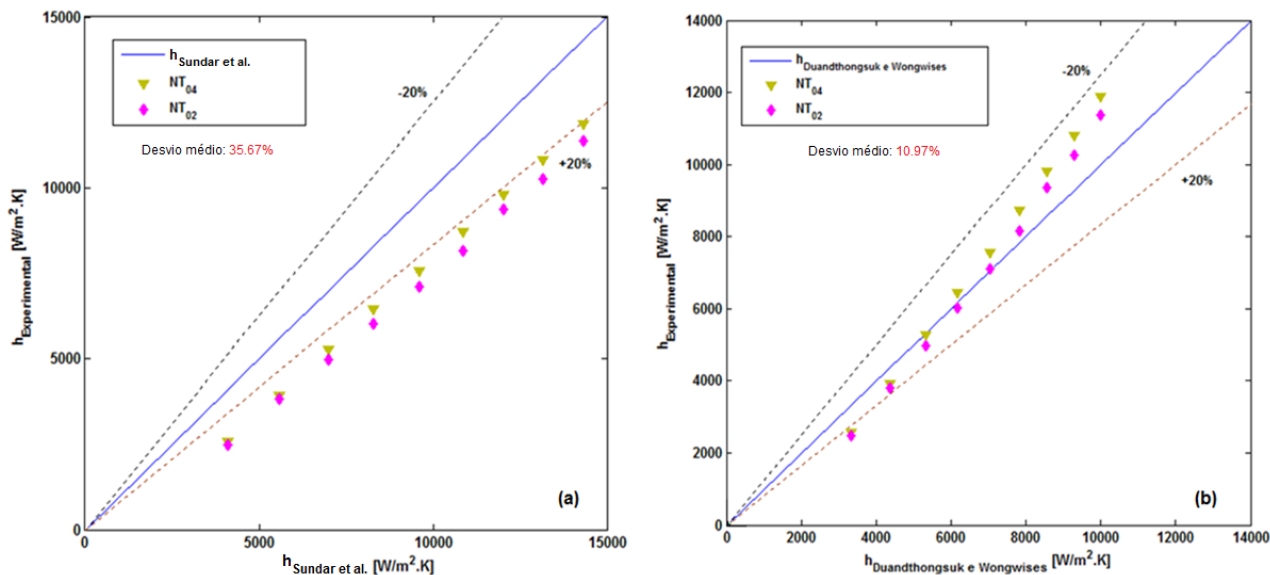


Figura 2. Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente e aquele calculado pelas correlações; (a) h_{exp} vs $h_{Sundar et al.}$; (b) h_{exp} vs $h_{SDuangthongsuk e Wongwises}$

A seguir é apresentada, a comparação entre os resultados experimentais levantados durante os ensaios realizados com as amostras de nanofluidos de NTCs/H₂O com os resultados obtidos para água. Os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor, h_{exp} , são determinados através da Eq. (1) e são apresentados em função do número de Reynolds, que é um dos parâmetros que mais afeta o coeficiente de transferência de calor. A Fig. (3) ilustra os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor, h_{exp} [W/m² K] para as amostras NT₀₂, NT₀₄ e H₂O em função do número de Reynolds, todos sob as mesmas condições nominais de ensaio, que foram comparados com a correlação de Sundar *et al.* (2012) e a correlação de Duangthongsuk e Wongwises (2010).

Observa-se pela fig. (3) que a amostra de nanofluido de NTCs/H₂O, NT₀₂, com concentração em volume de 0,12%, apresentou coeficiente de transferência de calor, em média, 8,16% acima do coeficiente de transferência de calor do

fluido base, enquanto que a amostra de nanofluido NT₀₄, com concentração em volume de 0,24%, apresentou coeficiente de transferência de calor, em média, 14,59% acima do coeficiente de transferência de calor do fluido base.

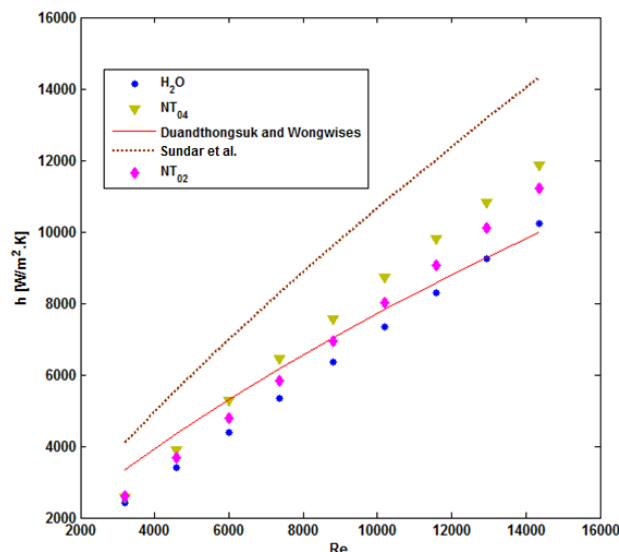


Figura 4. Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para as amostras NT₀₂, NT₀₄ e água.

4. CONCLUSÕES

Pode ser observado nas comparações feitas, que os dados experimentais para as duas amostras apresentam um desvio médio de 10,97% em relação à correlação de Duangthongsuk e Wongwises (2010) para escoamento em regime turbulento, enquanto o desvio médio obtido dos dados experimentais em relação à correlação de Sundar *et al.* (2012) foi de 35,67%.

Para a mesma condição de número Reynolds, na faixa de $3000 < Re < 16000$, as amostras NT₀₂ com concentração em volume de 0,12% e NT₀₄ com concentração de 0,24% em volume, apresentaram um coeficiente de transferência de calor, em média, 8,16% e 14,59% acima do fluido base (água).

5. REFERÊNCIAS

- L. Syam Sundar, Manoj K. Singh, Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 20, April 2013, Pages 23-35, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.041>.
- L. Syam Sundar, M.T. Naik, K.V. Sharma, M.K. Singh, T.Ch. Siva Reddy, Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 37, February 2012, Pages 65-71, ISSN 0894-1777, <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.10.004>.
- Pak, B. C., and Cho, Y. I., 1998, "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles," Exp. Heat Transfer, 11, Pages 151-170.
- R.C. Prasad, JihuaShen, Performance Evaluation of Convective Heat transfer Enhancement Devices Using Exergy Analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 36, Issue 17, November 1993, Pages 4193-4197, ISSN 0017-9310, [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(93\)90081-G](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(93)90081-G).
- S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles, in: D.A. Siginer, H.P. Wang (Eds.), Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, FED-V231/MD-V.66. ASME, New York, 1995, Pages 99-105.
- Weerapun Duangthongsuk, Somchai Wongwises, An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 53, Issues 1-3, 15 January 2010, Pages 334-344, ISSN 0017-9310, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.024>.
- Y. Xuan, Q. Li, Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids, ASME J. Heat Transfer, Volume 125, February 2003, Pages 151-155.